

Recent Science and Technology

ISSN 3057-0786 (Online)

Volume 17
Issue 3

(September - November 2025)



Rajamangala University of Technology Srivijaya



TABLE OF CONTENTS

Application of Machine Learning Algorithms for Prediction and Influential Parameter Analysis of Mechanical Property of Tea Residual-Filled Recycled Polypropylene Composite Materials	266715
Anuchit Khongrit, Cheevin Limsiri and Sureeporn Meehom	
Development of a Community-Level Dried Fish Strip-Cutting Machine	266114
Jaran Tamjai, Nasaporn Thammachot, Tawichart Yenwiset and Jirawan Jansuwan	
Enhancement of Downdraft Gasifier using Cashew Nut Shell Waste as Fuel with Automatic Control System	263440
Pitak Khlaichom and Gunt Intuwong	
Deterioration of Sandwich Composites between Plastics and Woven Bamboo Plates under Natural Weathering	259829
Chatree Homkhiew, Chainarong Srivabut, Watthanaphon Cheewawuttipong, Surasit Rawangwong and Teerapong Lemkhun	
Development of Biodegradable Plant Pots from Thermoplastic Starch/Water Hyacinth/Peanut Hulls Polymer Composites	262954
Pimpanitpa Kunthadong, Ratthaphat Bunkerd, Chatrachatchaya Chotichayapong and Panida Sawadee	
Study of Adhesion Force Between Rubber Pins and Concrete Slats	261936
Satta Srewaradachpisal, Nuannoppamon Sri-Uthai, Theerawat Petdee and Arthit Sawatdiraksa	
Feasibility of Using Durian Seeds, Jackfruit Seeds and Cassava as a Replacement for Rice in the Culture of <i>Trichoderma harzianum</i> in the Khao Khitchakut Community	259206
Titi Thongkamngam, Wannaporn Thanyaphon and Sukritta Anutrakunchai	
Effects of Using Spent Coffee Grounds as a Substrate Supplement for Cultivation of Abalone Mushroom (<i>Pleurotus cystidiosus</i>)	262649
Waraporn Kaewkhon and Nikhom Naksupan	

- Effect of Combination between Insecticide and Fruit Bagging for the Control of Durian Fruit Borer, *Conogethes punctiferalis* Guenée (Lepidoptera: Crambidae)** **262706**
Pacharaporn Vanichpakorn, Pornsil Seephueak and
Sakulrat Hansuek
- Development of *Trichoderma* Cream Formulation for Controlling the Repeated Dissemination Disease of Stem Rot in Durian Plantations in the Eastern Region** **260505**
Titi Thongkamngam, Khomsan Supong and Sukritta Anutrakunchai
- Nutrient Quality and Digestibility Improvement of Suwan Corn Ensiled with Microorganisms by *in vitro* Technique** **261001**
Natchanan Boonkong, Chanya Plumejai, Phongthorn Kongmun,
Chaiyapoom Banchasak, Panatda Bungsisawat, Savek Kiatsomphob
and K.Teepalak Rangubhe
- Effects of Some Calcium Compounds and Plant Growth Regulators on the Fruit Quality of *Ficus carica* L. cv. Black Genoa** **261838**
Rawipon Taikhong, Chaiya Wongsasuk, Warakorn Rammawut and
Natthawee Mabangkhu
- Effect of Vermicompost Liquid on Growth of Mizuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) in a Hydroponic System** **261967**
Rungroj Kraisittipanit, Arnat Tancho, Wasin Charentantanakul,
Suphathida Aumtong and Waraphas Nontati
- Comparision of Mixed Formula Planting Materials and Chemical Fertilizer (15-15-15) on Leaf Phosphorus Content Affecting Inflorescence Quantity and Fruit Set in Mango** **261906**
Natthapong Pechampai and Sirikanjana Sirinon
- Optimization of In Vitro Propagation of *Curcuma longa* Linn. var. Trang 1** **261510**
Sakulrat Hansuek, Pornsil Seephueak and Pitipat Bootkote

Investigation of Surface Sterilization Procedure for Japanese Mini Rose Hohoemi (<i>Rosa</i> ‘Hohoemi Rouge’)	263449
Thiwthong Thongraphai, Rodjanacorn Chuengpanya and Apiradee Siangsuepchart	
Development of Value-Added Products from the Processing of Vacuum-Fried Vegetable and Fruit Residues: A Case Study of Furikake	262661
Nawaporn Hongpan, Sarita Chansuek, Satita Khammee, Sarun Nemahawan and Soontreeya Kalawong	
Puffed Brown Rice from Hom Chaiya using Heated Plate: Composition and Glycemic Index	261749
Supaporn Apirattananusorn	
Effect of Fermentation on Physical and Chemical Characteristics, Bioactive Compounds, and Antioxidant Activity in Bitter Bean and Bamboo Shoot	263787
Sukanya Maicaurkaew, Supaporn Apirattananusorn, Chalida Lueamsaisuk, Wannapit Junlakan and Supannikar Sribuathong	
Effects of Boiling and Drying Conditions on the Quality of Pra Seed (<i>Elateriospermum tapos</i> Blume)	261507
Donrudee Pichairat and Nopparat Mahae	
A Study on the Optimum Conditions for Producing Bacterial Cellulose and Its Antioxidant Properties from Mulberry Pomace by <i>Acetobacter xylinum</i>	262167
Tasneem Somwong, Nuramalee Deenamo and Wassamon Wathanayon	
Shelf Life Evaluation of Soft Dried Banana	262835
Thanyanun Rithmanee and Apirada Phonpanawit	
The Utilization of Bromelain Enzyme Crude Extract from Pineapple Waste	261933
Wanida Maksiri, Warinthorn Maneerat, Pitunart Noosen, Wisut Maitreejet, Samruay Malithod and Jenjina Tamraungit	

Effect of Tamarind Seed Husk and Sodium Nitrate for Reducing Methane Production in Rumen Fermentation: <i>In vitro</i> studies Tuchchameth Tianwithkul, Manison Srisupha, Sopita Buaban, Anchalee Khongpradit and Suriya Sawanon	263451
Effects of Restricted Feeding Total Mixed Ration on Growth Performance and Volatile Fatty Acids in Rumen of Crossbred Castrated Male Goats Sanalak Sapsiri, Thaintip Kraiprom, Katekanok Boonrod and Umaporn Pastsart	262329
Effects of Feeding Patterns on Feed Intake, Nutrient Utilization and Volatile Fatty Acids in the Rumen of Crossbred Meat Goat Katekanok Boonrord, Thaintip Kraiprom, Sanalak Sapsiri and Umaporn Pastsart	262331
Sex Identification of Beautiful Birds from Feathers by PCR Method Kittikorn Kraithep, Panik Muadthongon and Umaporn Khimmakthong	257545
A Model for Forecasting the Gold Bullion Selling Price in Thailand Warangkhan Riansut, Supamit Wiriyaikulopast, Nipat Tantiputtikul and Netitorn Kawmali	261162
Air Pollutant Amounts Classified by Season in the Upper Northern Region of Thailand Sujaree Damsri and Anongnat Promkaew	261507
Two-Dimensional Numerical Modeling of Water Circulation along the Coast of Trang Province Nikom Onsri, Kattinat Sagulsawasdipan, Suriyan Saramul and Itchika Sivaipram	262233

Research Article

Application of Machine Learning Algorithms for Prediction and Influential Parameter Analysis of Mechanical Property of Tea Residual-Filled Recycled Polypropylene Composite Materials

Anuchit Khongrit^{*}, Cheevin Limsiri and Sureeporn Meehom

Department of Engineering Management, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Mueang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2025-03-14
 Revised: 2025-05-06
 Accepted: 2025-05-13

Keywords:

recycled polypropylene
 composites;
 tea residual;
 machine learning;
 parameter analysis;
 mechanical property

This research aims to study the application of artificial intelligence algorithms or machine learning in analyzing the influence of factors affecting the mechanical properties of recycled polypropylene composite materials mixed with tea residual. The factors examined include the type of tea waste (Thai tea and green tea), the coupling agent (PP-g-MA), and the thermoplastic elastomer. The study uses 5 algorithms: Generalized Linear Model, Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine, and Artificial Neural Network. The results show that thermoplastic elastomer has a negative effect on strength and hardness, but a positive effect on flexibility and impact resistance. PP-g-MA has a positive effect on strength and interfacial adhesion. The type of tea residue affects mechanical property differently depending on structure and chemical composition.

Comparing the prediction performance of algorithms, Decision Tree and Random Forest provide the most accurate predictions for most mechanical properties, with high R^2 values and low error rates. The average R^2 values across all mechanical properties for Decision Tree and Random Forest are 0.856 and 0.858, respectively. The Artificial Neural Network shows excellence in predicting percentage elongation with RSME only 6.73%. Support Vector Machine shows limitations in predicting mechanical property, especially in predicting elongation percentage and impact resistance. The results of this research demonstrate that Decision Tree and Random Forest show the potential of using machine learning techniques to efficiently design and develop composite materials with desired properties.

© 2025 Khongrit, A., Limsiri, C. and Meehom, S. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

Research and development of wood-plastic composites (WPCs) have advanced rapidly in recent years, with increasing applications of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML). These methods have shown potential in solving traditional production problems that rely on trial and error, which are time-consuming and costly. Popular ML algorithms used in WPC research include Artificial Neural Networks, Linear and Logistic Regression, Convolutional Neural

Networks, and Gaussian Processes. Notable research includes developing Artificial Neural Networks (ANN) models to predict the mechanical property of high-density polyethylene composites mixed with Scots pine wood, achieving high accuracy with an R^2 value over 0.90. Additionally, Graph Neural Networks (GNNs) have been applied to predict the tensile strength of PLA composites mixed with wood powder and formed by 3D printing, comparing performance with other

^{*} Corresponding author.

E-mail address: anuchit_kho@vu.ac.th

Cite this article as:

Khongrit, A., Limsiri, C. and Meehom, S. 2025. Application of Machine Learning Algorithms for Prediction and Influential Parameter Analysis of Mechanical property of Tea Residual-Filled Recycled Polypropylene Composite Materials. *Recent Science and Technology* 17(3): 266715.

models like Support Vector Machine and Extreme Gradient Boosting.

These techniques can accurately predict various mechanical property such as tensile strength, flexural strength, elastic modulus, and impact resistance. Developing reliable and accurate engineering models remains a significant challenge, requiring the selection of suitable ML algorithms and integration with other analysis techniques like finite element methods.

Despite some limitations, ML techniques offer significant benefits in reducing time and cost in research and production processes, especially for manufacturers with limited equipment or specialized expertise. They also aid in designing and optimizing material compositions, such as WPCs, to meet specific requirements and cater to diverse customer needs more effectively. This includes adjusting the mixing ratio, developing materials to withstand tensile or flexural forces according to set standards, and reducing errors from traditional experimental methods. Integrating ML with traditional techniques helps balance model accuracy with practical feasibility, enabling industries to develop innovative materials more efficiently. (Ramesh *et al.*, 2022; Rahaman *et al.*, 2023; Feng *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2023; Eroğlu *et al.*, 2024; Nakayama and Sakakibara, 2024; Qin and Bing, 2024; Sorour *et al.*, 2024)

Previous studies by researchers have identified opportunities to develop wood-plastic composites from recycled polypropylene from beverage containers and tea residual collected from beverage shops. This research aligns with the circular economy approach of creating value from post-consumer materials. The study examined the effects of key variables on the mechanical property of composites made from recycled polypropylene and tea residual. (Ramesh *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2023; Rahaman *et al.*, 2023; Eroğlu *et al.*, 2024; Nakayama and Sakakibara, 2024; Qin and Bing, 2024; Sorour *et al.*, 2024)

Previous studies by researchers have identified opportunities to develop wood-plastic composites from recycled polypropylene from beverage containers and tea residual collected from beverage shops. This research aligns with the circular economy approach of creating value from post-consumer materials. The study examined the effects of key variables on the mechanical property of composites made from recycled polypropylene and tea residual. The research utilized a General Factorial Design to evaluate the influence of

significant variables, including types of tea waste (Thai tea and green tea), the proportion of PP-g-MA compatibilizer, and the amount of thermoplastic elastomer (TPE). Statistical analysis using ANOVA showed that all three variables significantly affected the mechanical property of the material. However, linear regression analysis revealed a limited ability to predict mechanical property, with R^2 values ranging from 47.29% to 67.77% for all properties. (Khongrit *et al.*, 2022; Khongrit *et al.*, 2023; Khongrit *et al.*, 2024a; Khongrit *et al.*, 2024b)

The reason for the low predictive ability of linear regression analysis is due to the low purity of the recycled material, which contains impurities, and the high dispersion of tea waste particles, leading to high standard deviations in the data. Additionally, the regression analysis showed that linear equations have limited ability to predict the research data because the factors do not have a linear relationship. Therefore, researchers have considered using machine learning (ML) to analyze the research results due to its advantages over traditional statistical methods. ML is better at learning complex and non-linear relationships, especially with large datasets. Unlike traditional statistical models that often rely on linear assumptions and a limited number of predictors, ML algorithms such as Artificial Neural Networks (ANN) and Random Forest can capture complex patterns and interactions within the data more deeply, resulting in higher predictive accuracy, which is significantly better than linear regression models. (Rahaman *et al.*, 2023)

From the above, the researchers used a dataset of the modulus of elasticity of composite materials to analyze using five machine learning algorithms: Generalized Linear Regression, Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine, and Artificial Neural Network. These algorithms were used to learn and predict the modulus of elasticity of recycled polypropylene composite materials mixed with tea waste. The research results showed that machine learning algorithms could predict more accurately when comparing actual test results with predicted values, as shown in Figure 1. a) This figure compares the General Linear Regression algorithm, where the P-value indicates that the actual and predicted values differ significantly statistically. For Figure 1 b), it shows the comparison results from the Artificial Neural Network algorithm, which has a higher R^2 value and a P-value greater than 0.05, indicating that the predicted and actual values do

not differ significantly and are correlated by 88.28%. (Khongrit *et al.*, 2024b)

The conclusion of this study shows that artificial intelligence algorithms using machine learning techniques can learn complex, non-linear data with high variability and predict more accurately than traditional linear regression analysis conducted in previous research. This method can effectively be used to analyze other properties of recycled polypropylene composite materials mixed with tea residual. The expected outcome of this research aims to enhance understanding in using artificial intelligence technology to develop environmentally friendly composite materials. Additionally, it opens opportunities for applying this technique to develop other types of composite materials in the future. This study also plays a crucial role in promoting the utilization of recycled materials and agricultural residual, aligning with the concepts of a circular economy and sustainable development.

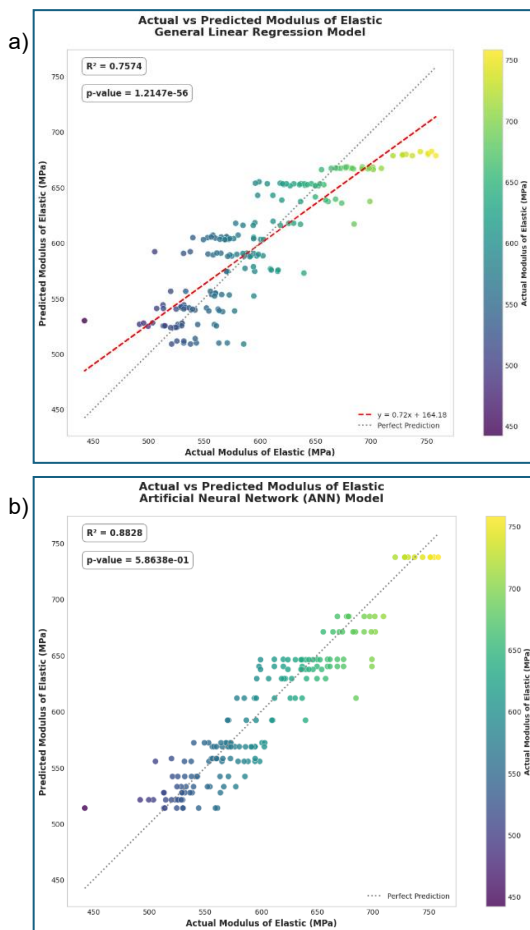


Figure 1 Comparison of Actual vs. Predicted Elastic Modulus Testing for Recycled PP-Tea Residual Composites: a) Generalized Linear Regression Model and b) Artificial Neural Network Model (Khongrit *et al.*, 2024b)

The above findings lead to the two main objectives of this research:

1.To apply artificial intelligence or machine learning algorithms to study the influence of factors affecting the mechanical property of recycled polypropylene composite materials filled with tea residual.

2.To compare the predictive efficiency of artificial intelligence algorithms on the mechanical property of these composite materials.

2. Materials and Methods

The research process can be illustrated as shown in Figure 2, with the following details:

2.1 Preparation of Composite Materials and Property Testing

The materials, chemicals, and methods for preparing composite materials, as well as the mechanical property testing, are based on previous research (Khongrit *et al.*, 2022). The main raw materials include recycled polypropylene from plastic drink cups and natural fillers such as Thai tea waste and green tea waste, which were sun-dried for three days and then sifted through a 30 Mesh sieve. The compatibilizer used was PP-g-MA grade POLYB® AM-920 from Hannanotech at concentrations of 0, 2.5, and 5 wt%. The polyolefin elastomer (TPE) used was Engage 7447 from Dow Chemical at concentrations of 0, 5, and 10 wt%. The antioxidant used was Sunox 168 from Polychem Premier, applied at 0.1 wt% in all formulations. The factors and levels of factors studied are shown in Table 1. This research includes one qualitative factor (type of tea waste) and two quantitative factors (PP-g-MA and TPE). The experiment consists of 18 basic runs (base runs), with each model tested ten times. The instruments and machines used for research and property testing were kindly provided by the Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima Campus

The preparation of raw materials began with mixing recycled polypropylene, tea waste powder, and other additives according to the formula (the amount of recycled polypropylene varied inversely with the amount of other factors, ranging from 64.9 to 79.7 wt%). The mixture was blended using a mixing machine and then dried for one hour to remove moisture. It was then compounded using a twin-screw extruder with an L/D

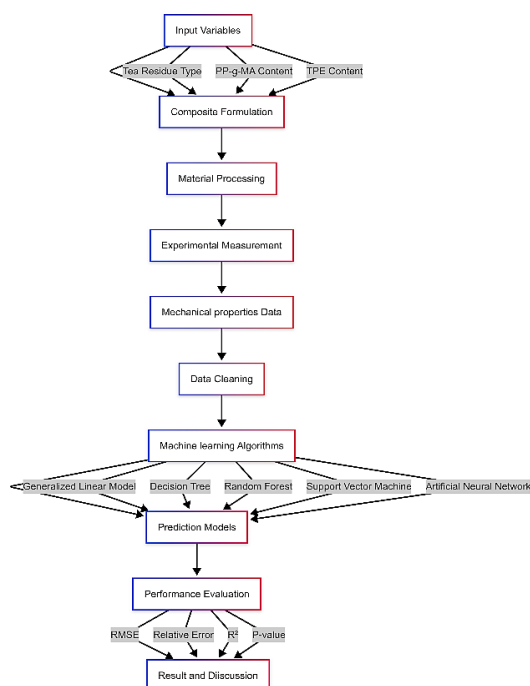


Figure 2 Flow chart of the research methodology

The material was cooled with air and then pelletized. After drying, the material was molded into test specimens according to ASTM standards using injection molding. The molded specimens were stored in a desiccator for 2 days before property testing. The mechanical properties testing was conducted using 10 specimens per experimental model. The mechanical property testing included:

- Tensile testing according to ASTM D638 using a LLOYD LR10K (10 kN) machine at a drawing rate of 50 mm/min. The yield strength, tensile strength (in MPa), and percentage elongation (%Elongation) were measured.
- Impact testing according to ASTM D256 using an Instron CEAST 9050 pendulum impact tester with an energy of 2.7 J. The results were reported in kJ/m².
- Surface hardness testing according to ASTM D2240 using a Teclock GS-612 machine with a 5 kg force applied for 1 second. Each specimen was tested at five different points, and the results were expressed in Shore D units.

Table 1 Factors and levels of factors studied in the research

Composite designation	Type of tea residual(20wt%)	PP-g-MA (wt%)	TPE (wt%)
rPP/T	Thai	0	0
rPP/T/MA2.5	Thai	2.5	0
rPP/T/MA5	Thai	5	0
rPP/T/TPE5	Thai	0	5
rPP/T/TPE10	Thai	0	10
rPP/T/MA2.5/TPE5	Thai	2.5	5
rPP/T/MA5/TPE5	Thai	5	5
rPP/T/MA2.5/TPE10	Thai	2.5	10
rPP/T/MA5/TPE10	Thai	5	10
rPP/G	Green	0	0
rPP/G/MA2.5	Green	2.5	0
rPP/G/MA5	Green	5	0
rPP/G/TPE5	Green	0	5
rPP/G/TPE10	Green	0	10
rPP/G/MA2.5/TPE5	Green	2.5	5
rPP/G/MA5/TPE5	Green	5	5
rPP/G/MA2.5/TPE10	Green	2.5	10
rPP/G/MA5/TPE10	Green	5	10

Table 2 Algorithms and Parameters Used in This Research

Algorithms	Parameters
Generalized Linear Regression	Family : Automatic selection Solver : Automatic selection Reproducible : false maximum number of threads : 4 lambda : 0.0 - 1.79769313486 stopping rounds/tolerance : 3/0.001 alpha : 0.05
Decision Tree	Criterion : gain ratio maximal depth : 10 apply pruning : true confidence : 0.1 minimal gain : 0.01 minimal leaf size/size for split : 2/4 pre-pruning alternatives : 3
Random Forest	number of trees : 100 criterion : gain ratio maximal depth : 10 minimal gain/leaf size/size for split : 0.01/2/4 confidence : 0.1 pre-pruning alternatives : 3 apply pruning : true
Support Vector Machine	kernel type : dot kernel sigma1/2/3 : 1.0/0.0/2.0 kernel gamma : 1.0 kernel cache : 200 complexity constant : 0.0 convergence epsilon : 0.001 max iterations : 100000 L pos/L neg : 1.0/1.0
Artificial Neural Network	operator learns : feed-forward neural network trained : back propagation algorithm activation function : sigmoid function hidden layers : 2 training cycles : 200 learning rate : 0.01 momentum : 0.9 error epsilon : 1.0E-4

2.2 Data Analysis Using Machine Learning

After completing the mechanical property testing, the data was processed through a data cleaning procedure. This involved managing missing values and outliers using Python scripts on Google Collaboration. The cleaned dataset was then saved as a .csv file. The data was imported into AI Studio 2024.1.0, a program used for data preparation, analysis, and prediction, which supports data mining and machine learning. The workflow of the analysis in this research is shown in Figure 2, with the algorithms and parameters detailed in Table 2. This study employed five algorithms: Generalized Linear Regression, Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine, and Artificial Neural Network.

The parameters of each algorithm are shown in Table 2. Cross-validation was used to split the data for training and testing, reducing the risk of random data splits that do not adequately represent the dataset due to its high variability. This approach also helps mitigate overfitting, allowing for a more reliable evaluation of model accuracy across diverse datasets (Faurika *et al.*, 2024; Lumumba *et al.*, 2024). The influence of each factor will be analyzed using the Model Analysis Description of each algorithm.

Subsequently, the comparison of the predictive performance for mechanical property will utilize the results of Performance Regression obtained from analyzing the efficiency of each algorithm. This is used for statistical evaluation and provides the performance metrics for each algorithm, including:

- Root Mean Square Error (RMSE): This indicates the average magnitude of prediction errors. A lower RMSE value signifies higher predictive accuracy.

- Relative Error: This is the proportion of error relative to the actual value, expressed as a percentage, making it easier to compare.

- Coefficient of Determination (R^2): This value indicates how well the model explains the data variability, ranging from 0 to 1 or 0% to 100%. A higher R^2 value means the algorithm can predict the mechanical property of composite materials more effectively.

- P-Value: This statistical value is used to test hypotheses. In the context of machine learning, it evaluates the significance of the results or the relationship found between actual and predicted values, determining whether they differ significantly (in this study, significance is set at 0.05).

3. Results and Discussion

3.1 The results of the mechanical property testing

Results of the mechanical property testing include Yield Strength, Tensile Strength, Percentage Elongation, Impact Strength, and Hardness. These properties can be seen in Figures 3 to 7, respectively.

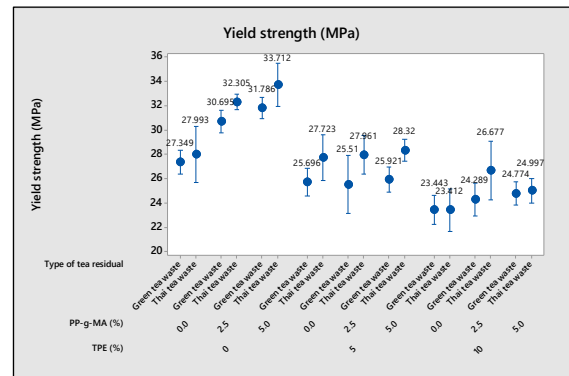


Figure 3 Results of Yield Strength Testing

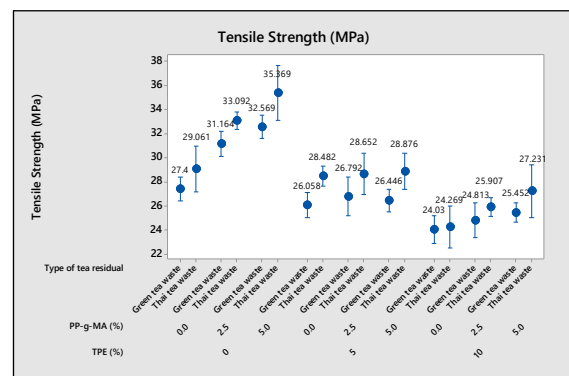


Figure 4 Results of Tensile Strength Testing

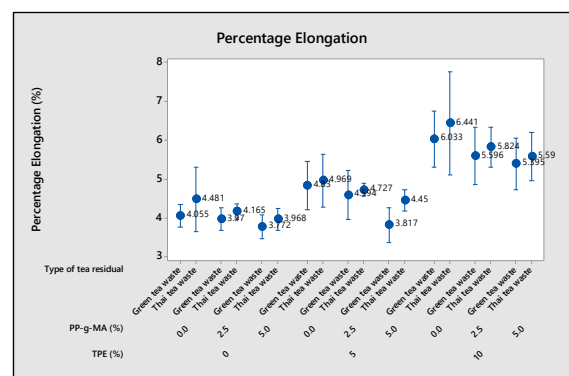


Figure 5 Results of Percentage Elongation Testing

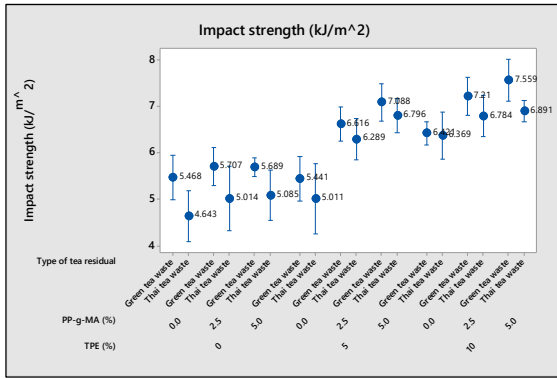


Figure 6 Results of Impact Strength

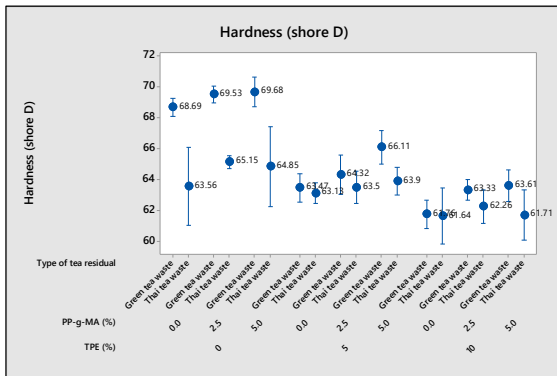


Figure 7 Results of Hardness Testing

The yield strength of rPP composites showed Thai tea waste provided slightly higher values than green tea waste (27.84 ± 2.79 MPa vs 27.05 ± 1.47 MPa). Adding PP-g-MA significantly improved yield strength in both composites, with rPP/T/MA5 reaching the highest at 33.90 ± 2.28 MPa. Conversely, TPE addition reduced yield strength, with rPP/T/TPE10 showing the lowest at 23.97 ± 2.24 MPa. Similar trends were observed for tensile strength, with Thai tea waste composites slightly outperforming green tea waste (29.16 ± 2.28 MPa vs 27.29 ± 1.27 MPa). PP-g-MA enhanced tensile strength proportionally to its content, with rPP/T/MA5 achieving the highest value (35.37 ± 3.01 MPa), while TPE decreased it, with rPP/T/TPE10 showing the lowest (24.27 ± 2.15 MPa). The elastic modulus was comparable for both tea wastes (approximately 625 MPa), indicating tea type minimally affected composite stiffness. PP-g-MA increased the modulus, particularly in Thai tea waste composites (rPP/T/MA5: 742.31 ± 33.88 MPa), while TPE reduced it (rPP/T/TPE10: 513.52 ± 35.82 MPa). Percentage elongation was similar for both composites ($3.96 \pm 0.39\%$ for green tea waste; $4.28 \pm 1.14\%$ for Thai tea waste). PP-g-MA slightly decreased elongation as its content increased, while TPE significantly improved it, with rPP/T/TPE10 showing the highest value at $6.44 \pm 1.93\%$.

Impact Strength of rPP composites with green tea waste showed slightly higher impact strength than those with Thai tea waste (5.49 ± 0.62 vs 4.66 ± 0.87 kJ/m²), suggesting better toughness. Adding PP-g-MA gave a minor improvement in impact resistance, but not clearly proportional to its content. In contrast, TPE significantly increased impact strength, especially at higher levels, with rPP/G/MA5/TPE10 reaching the highest value (7.42 ± 0.69 kJ/m²), indicating TPE is more effective than PP-g-MA for toughness enhancement. Finally, Hardness Property of green tea waste composites had slightly higher hardness than Thai tea waste (68.69 ± 0.90 vs 63.46 ± 3.34 Shore D). PP-g-MA slightly increased hardness in both composites, while TPE addition significantly reduced hardness, especially at 10% content. This reduction in hardness with TPE corresponded with increased elongation and impact strength, showing TPE enhances flexibility and toughness but lowers hardness.

3.2 Studying the Influence of Factors Using Machine Learning Algorithms

After testing the mechanical property of recycled polypropylene composite materials filled with tea residual, the obtained data was used in the machine learning process to analyze and predict the mechanical property of the materials. The results of this analysis not only provided insights into the predictive capabilities of the algorithms but also helped in studying the influence of each factor on the mechanical property of the composite materials. This analysis enabled an understanding of the relationship between various components and the mechanical property of the composite materials in this research. However, due to the large amount of data, we propose to present the analysis results for Yield Strength as an example of how machine learning outcomes can explain the influence of each factor, followed by a summary table of all mechanical property.

Figure 8 shows the results of the analysis using the Generalized Linear Model (GLM). It was found that TPE had the most significant negative effect (Coefficient = -0.616) on the predicted values, with the highest importance at 48.43% . This was followed by PP-g-MA, which had a positive effect (Coefficient = 0.465) and a secondary importance of 18.27% . The factors related to the type of green tea and Thai tea had negative and positive influences, respectively (Coefficients = -0.867 and 0.867), with equal importance weights of 16.65% .

for both factors. The intercept value was 29.258, which is a constant used in the algorithm for prediction.

Attribute	Coefficient	Std. Coefficient
Type_of_tea.Green	-0.867	-0.867
Type_of_tea.Thai	0.867	0.867
PP_graft_MA_percentage	0.465	0.951
PTE_Percentage	-0.616	-2.522
Intercept	29.258	27.339

Variable Importances:				
Variable	Relative Importance	Scaled Importance	Percentage	
PTE_Percentage	2.522235	1.000000	0.484259	
PP_graft_MA_percentage	0.951423	0.377214	0.182669	
Type_of_tea.Green	0.867390	0.343897	0.166536	
Type_of_tea.Thai	0.867390	0.343897	0.166536	

Figure 8 Model Analysis Description of the Generalized Linear Model Algorithm

Figure 9 shows the results from the analysis using the Decision Tree algorithm. It was observed that TPE played the most crucial role in the decision tree structure. The first splitting criterion at TPE (wt%) > 2.5 and > 7.5 indicated that the percentage of TPE had a negative effect on the predicted values, as the predicted values decreased with increasing TPE content. Meanwhile, PP-g-MA had a positive effect, with predicted values increasing when the percentage of PP-g-MA was higher than 1.250 and 3.750. Additionally, the type of tea residual had both positive and negative effects depending on the type of tea. Green tea was generally associated with lower predicted values, while Thai tea was associated with slightly higher predicted values. The prioritization of factors showed that TPE was the most significant factor, followed by PP-g-MA, and finally the type of tea waste, which had a secondary impact on the predicted values.

Figure 10 shows the results of the analysis using the Random Forest algorithm. It was found that TPE played the most significant role in data partitioning, with values below 2.500 or above 7.500 clearly affecting changes in the predicted values. This indicates a negative effect when TPE values increase. For PP-g-MA, there was a positive effect, particularly when values exceeded 1.250 and 3.750, significantly enhancing the predicted values. The type of tea waste showed different effects depending on the type; green tea was generally associated with lower predicted values, while Thai tea tended to slightly increase the predicted values. The prioritization of factors showed that TPE was the most influential variable, followed by PP-g-MA, and finally the type of tea waste, which had a secondary impact that varied depending on the type of tea.

RegressionTree	
TPE_percentage > 2.500	
TPE_percentage > 7.500	
PP_graft_MA_percentage > 1.250	
Type_of_tea = Green	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 24.632 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750: 24.063 {count=10}	
Type_of_tea = Thai	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 24.861 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750: 26.522 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250: 23.327 {count=20}	
TPE_percentage ≤ 7.500	
Type_of_tea = Green	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 26.082 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750	
PP_graft_MA_percentage > 1.250: 24.882 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250: 26.030 {count=10}	
Type_of_tea = Thai	
PP_graft_MA_percentage > 1.250: 28.415 {count=20}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250: 27.725 {count=10}	
TPE_percentage ≤ 2.500	
PP_graft_MA_percentage > 1.250	
Type_of_tea = Green	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 31.610 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750: 30.179 {count=10}	
Type_of_tea = Thai	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 34.241 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750: 32.354 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250	
Type_of_tea = Green: 27.291 {count=10}	
Type_of_tea = Thai: 28.154 {count=10}	

Figure 9 Model Analysis Description of the Decision Tree Algorithm

RegressionTree	
PTE_Percentage > 2.500	
PTE_Percentage > 7.500	
Type_of_tea = Green	
PP_graft_MA_percentage > 1.250	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 24.717 {count=9}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750: 24.282 {count=12}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250: 23.549 {count=7}	
Type_of_tea = Thai	
PP_graft_MA_percentage > 1.250	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 24.904 {count=9}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750: 26.690 {count=8}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250: 23.526 {count=9}	
PTE_Percentage ≤ 7.500	
Type_of_tea = Green	
PP_graft_MA_percentage > 1.250	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 25.840 {count=6}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750: 25.088 {count=10}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250: 25.822 {count=11}	
Type_of_tea = Thai	
PP_graft_MA_percentage > 3.750: 28.203 {count=16}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750	
PP_graft_MA_percentage > 1.250: 28.063 {count=18}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250: 28.104 {count=8}	
PTE_Percentage ≤ 2.500	
PP_graft_MA_percentage > 1.250	
PP_graft_MA_percentage > 3.750	
Type_of_tea = Green: 31.438 {count=8}	
Type_of_tea = Thai: 35.440 {count=7}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 3.750	
Type_of_tea = Green: 30.373 {count=13}	
Type_of_tea = Thai: 32.447 {count=12}	
PP_graft_MA_percentage ≤ 1.250	
Type_of_tea = Green: 27.063 {count=9}	
Type_of_tea = Thai: 28.399 {count=8}	

Figure 10 Model Analysis Description of the Random Forest Algorithm

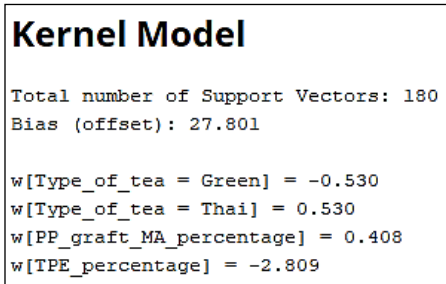


Figure 11 Model Analysis Description of the Support Vector Machine Algorithm

The results of the analysis using the Support Vector Machine (SVM) algorithm are shown in Figure 11. It was found that TPE had a significant negative effect on the predicted values, with a weight of -2.809, indicating a clear reduction in the predicted values. Meanwhile, PP-g-MA had a positive effect with a weight of 0.408, which slightly increased the predicted values. For the type of tea waste, green tea had a slight negative effect (-0.530), while Thai tea had a positive effect of the same magnitude (0.530). The bias (offset) value was 27.801, which is a constant used by the algorithm to calculate the predicted values. In summary, TPE was the factor with the most significant negative impact, followed by PP-g-MA with a positive effect, and the type of tea waste had the least influence compared to other factors.

Finally, the analysis using the Artificial Neural Network (ANN) is shown in Figure 12. It was found that TPE had the most pronounced negative influence, particularly in Node 1 (-4.264) and Node 3 (-2.143) of Hidden Layer 1, indicating that increasing TPE resulted in a decrease in yield strength. Meanwhile, PP-g-MA had a positive influence in Node 3 (1.566) and Node 2 (0.813) of Hidden Layer 1, significantly enhancing the yield strength. For the type of tea, Thai tea waste tended to have a positive effect, such as in Node 1 (0.466) and Node 2 (0.627) of Hidden Layer 1, while green tea had a slight negative influence, such as in Node 1 (-0.436) and Node 2 (-0.600) of Hidden Layer 1. The outputs from all nodes in the hidden layers were processed in the output layer, showing that TPE was the factor that most reduced yield strength, followed by PP-g-MA, which increased yield strength, and Thai tea waste, which tended to slightly increase the value compared to green tea.

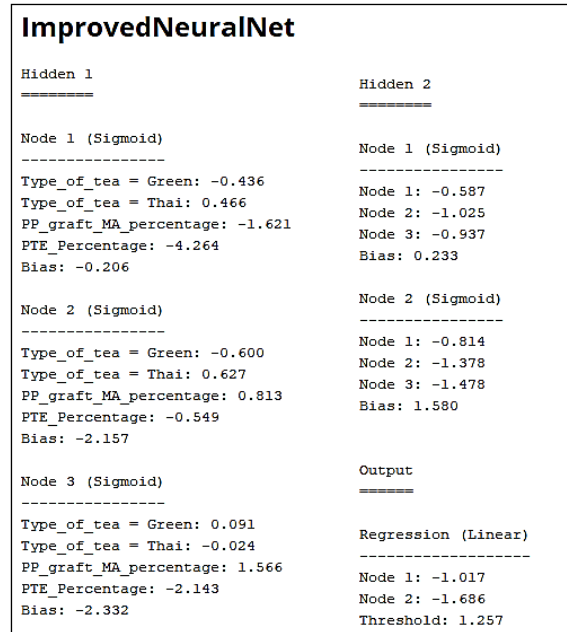


Figure 12 Model Analysis Description of the Artificial Neural Network Algorithm

Table 3 Summary of Factors Influencing Mechanical property Based on Machine Learning Algorithms

Mechanical property	Type of tea		PP-g-MA	TPE
	Thai	Green		
Yield Strength	+	-	++	---
Tensile Strength	+	-	++	---
%Elongation	++	--	--	+++
Impact Strength	-	+	++	+++
Hardness	--	++	+	---

Note: +++ indicates a strong positive influence with the highest weight.

--- indicates a strong negative influence with the highest weight.

Other mechanical property can be summarized in Table 3, which outlines the influence of various factors on the mechanical property of composite materials. It was found that the type of tea residual, PP-g-MA, and TPE had different effects on each property. Yield Strength and Tensile Strength were positively influenced by Thai tea residual and PP-g-MA but negatively affected by green tea residual and TPE. In contrast, Percentage Elongation was significantly positively influenced by Thai tea waste and TPE but negatively affected by Green tea residual and PP-g-MA. For Impact Strength, PP-g-MA and TPE had a strong positive influence, while the type of tea residual yielded different results; Green tea waste tended

to increase impact resistance, whereas Thai tea waste tended to decrease it. Finally, Hardness was positively influenced by Green tea residual but negatively affected by Thai tea residual and TPE, with PP-g-MA having a minor positive effect.

3.3 Comparison of Predictive Capabilities from Machine Learning Algorithms

After testing the mechanical property of recycled polypropylene composite materials filled tea residual, the obtained data was analyzed using supervised machine learning processes. A comparative analysis of the predictive performance for various mechanical property of these composite materials was then conducted. This evaluation considered key metrics such as Root Mean Squared Error (RMSE), Relative Error, R-squared (R^2), and P-Value ($\alpha = 0.05$) to understand the accuracy, explanatory power, and statistical significance of each algorithm in predicting different mechanical property. The purpose of this analysis was to identify the most suitable algorithm for predicting each type of mechanical property, which would be beneficial for efficiently developing composite materials with desired properties. The results can be seen in Table 4.

From the comparison of the performance of machine learning algorithms in predicting Yield Strength, it was found that Decision Tree and Random Forest algorithms yielded similar results, with the lowest Root Mean Squared Error (RMSE) values of 1.127 ± 0.217 MPa and 1.100 ± 0.224 MPa, respectively. These corresponded to relative errors of approximately $3.21\% \pm 0.52\%$ and $3.10\% \pm 0.59\%$, and both had the highest R^2 values of 0.879. Following these, the Artificial Neural Network had an RMSE of 1.204 ± 0.09 MPa, a relative error of $3.40\% \pm 0.37\%$, and an R-squared of 0.859. The Generalized Linear Model had an RMSE of 1.559 ± 0.293 MPa, a relative error of $4.62\% \pm 1.10\%$, and an R^2 of 0.758. The Support Vector Machine had the highest RMSE at 1.697 ± 0.064 MPa, a relative error of $4.84\% \pm 0.15\%$, and an R^2 of 0.746. Additionally, the P-value of the Support Vector Machine was less than 0.001, indicating a statistically significant difference when compared to actual values. While other algorithms had P-values greater than 0.05, the results for Tensile Strength were similar, with the Decision Tree algorithm still providing outstanding results. It had the lowest RMSE at 0.966 ± 0.184 MPa, a relative error of $2.63\% \pm 0.57\%$, and a high R-squared value of 0.913, which was close to the Random

Forest algorithm's performance. Random Forest had an RMSE of 0.932 ± 0.159 MPa, a relative error of $2.61\% \pm 0.49\%$, and an R^2 of 0.911. The Artificial Neural Network also performed well, with an RMSE of 1.127 ± 0.083 MPa, a relative error of $3.18\% \pm 0.25\%$, and an R^2 of 0.88. However, the Generalized Linear Model and Support Vector Machine continued to yield inferior results, particularly the Support Vector Machine, which had the highest RMSE at 1.574 ± 0.050 MPa and a P-value of 0.663, indicating that the results were not statistically significant compared to actual values.

The analysis to determine the capability of algorithms in predicting Percentage Elongation (%Elongation) found that the Artificial Neural Network provided the best results, with the lowest Root Mean Squared Error (RMSE) at $0.454 \pm 0.029\%$, a relative error of $6.73\% \pm 0.68\%$, and an R^2 value of 0.761. Following this, the Random Forest algorithm had an RMSE of $0.448 \pm 0.140\%$, a relative error of $6.52\% \pm 1.57\%$, and an R^2 of 0.747. The Decision Tree algorithm had an RMSE of $0.468 \pm 0.141\%$, a relative error of $6.94\% \pm 1.94\%$, and an R^2 of 0.718. The Generalized Linear Model yielded an RMSE of $0.527 \pm 0.123\%$, a relative error of $8.14\% \pm 1.82\%$, and an R^2 of 0.662. Finally, the Support Vector Machine had the highest RMSE at $0.809 \pm 0.034\%$, a P-value less than 0.001, and a relative error of $14.47\% \pm 0.75\%$. The results show that the Support Vector Machine's outcomes are statistically significantly different from actual values and have the lowest predictive performance compared to other algorithms.

When considering the ability to predict impact strength, it was found that the Decision Tree and Artificial Neural Network algorithms demonstrated outstanding predictive performance. The Decision Tree had the lowest Root Mean Squared Error (RMSE) at 0.332 ± 0.078 and a Relative Error of $4.44\% \pm 1.11\%$, with an R-squared value of 0.877. Meanwhile, the Artificial Neural Network showed similar results with an RMSE of 0.340 ± 0.022 , a Relative Error of $4.57\% \pm 0.35\%$, and an R-squared value of 0.871. The Random Forest algorithm also performed well, with an RMSE of 0.336 ± 0.083 and a Relative Error of $4.69\% \pm 1.19\%$. However, the Support Vector Machine had the highest RMSE at 0.910 ± 0.055 and a P-value < 0.001 , indicating a statistically significant difference compared to actual values. The Generalized Linear Model also performed poorly, with an RMSE of 0.462 ± 0.049 and a Relative Error of $6.61\% \pm 0.90\%$.

For hardness prediction, the Decision Tree and Artificial Neural Network algorithms again delivered strong results. The Decision Tree had the lowest RMSE at 0.855 ± 0.215 and a Relative Error of $1.00\% \pm 0.22\%$, with an R-squared value of 0.893. The Artificial Neural Network showed similar performance with an RMSE of 0.882 ± 0.049 , a Relative Error of $1.06\% \pm 0.06\%$, and an R-squared value of 0.877. The Random Forest algorithm also performed well, with an RMSE of 0.839 ± 0.240 and a Relative Error of $1.01\% \pm 0.27\%$. However, both the Support Vector Machine and Generalized Linear Model had higher RMSE values, particularly the Support Vector Machine, which had an RMSE of 1.409 ± 0.037 Shore D and a P-value of 0.234, indicating no statistical significance compared to actual values. The Generalized Linear Model had an RMSE of 1.308 ± 0.239 Shore D and a Relative Error of $1.66\% \pm 0.37\%$.

The analysis of the performance of machine learning algorithms in predicting the mechanical property of recycled polypropylene composite materials mixed with tea residual revealed significant differences among the algorithms. Decision

Tree and Random Forest demonstrated the highest performance in predicting several mechanical property, including Yield strength, Tensile Strength, Impact Strength, and Hardness, as reflected by their low RMSE and relative error values, as well as high R^2 values. Additionally, the Artificial Neural Network showed prominence in predicting percentage elongation, although it required appropriate tuning of its structure and hyperparameters. In contrast, the Support Vector Machine showed clear limitations in predicting mechanical property, particularly in predicting percentage elongation and impact strength, with high RMSE and relative error values, along with a P-value indicating statistically significant differences compared to actual values. Meanwhile, the Generalized Linear Model showed performance inferior to that of Decision Tree, Random Forest, and Artificial Neural Network. These analysis results suggest that Decision Tree and Random Forest are the most suitable algorithms for predicting the mechanical property of composite materials in this study.

Table 4 Comparison of the Performance of Machine Learning Algorithms in Predicting Mechanical property

properties	Algorithm	Algorithm Performance		Prediction Performance	
		RMSE	Relative_error	R^2	P-value ($\alpha=0.05$)
Yield Strength (MPa)	Generalized Linear Model	1.559 ± 0.293	$4.62\% \pm 1.10\%$	0.758	0.980
	Decision Tree	1.127 ± 0.217	$3.21\% \pm 0.52\%$	0.879	0.983
	Random Forest	1.100 ± 0.224	$3.10\% \pm 0.59\%$	0.879	0.967
	Support Vector Machine	1.697 ± 0.064	$4.84\% \pm 0.15\%$	0.746	<0.001
	Artificial Neural Network	1.204 ± 0.09	$3.40\% \pm 0.37\%$	0.859	0.873
Tensile Strength (MPa)	Generalized Linear Model	1.493 ± 0.117	$4.27\% \pm 0.43\%$	0.786	0.984
	Decision Tree	0.966 ± 0.184	$2.63\% \pm 0.57\%$	0.913	0.982
	Random Forest	0.932 ± 0.159	$2.61\% \pm 0.49\%$	0.911	0.991
	Support Vector Machine	1.574 ± 0.050	$4.52\% \pm 0.15\%$	0.760	0.663
	Artificial Neural Network	1.127 ± 0.083	$3.18\% \pm 0.25\%$	0.880	0.064
Elongation (%)	Generalized Linear Model	0.527 ± 0.123	$8.14\% \pm 1.82\%$	0.662	0.983
	Decision Tree	0.468 ± 0.141	$6.94\% \pm 1.94\%$	0.718	0.952
	Random Forest	0.448 ± 0.140	$6.52\% \pm 1.57\%$	0.747	0.992
	Support Vector Machine	0.809 ± 0.034	$14.47\% \pm 0.75\%$	0.679	<0.001
	Artificial Neural Network	0.454 ± 0.029	$6.73\% \pm 0.68\%$	0.761	0.480

Table 4 (Continuous)

properties	Algorithm	Algorithm Performance		Prediction Performance	
		RMSE	Relative_error	R ²	P-value ($\alpha=0.05$)
Impact Strength (kJ/m ²)	Generalized Linear Model	0.462 ± 0.049	6.61% ± 0.90%	0.760	0.994
	Decision Tree	0.332 ± 0.078	4.44% ± 1.11%	0.877	0.980
	Random Forest	0.336 ± 0.083	4.69% ± 1.19%	0.868	0.983
	Support Vector Machine	0.910 ± 0.055	12.67% ± 0.89%	0.758	<0.001
	Artificial Neural Network	0.340 ± 0.022	4.57% ± 0.35%	0.871	0.830
Hardness (Shore D)	Generalized Linear Model	1.308 ± 0.239	1.66% ± 0.37%	0.740	0.974
	Decision Tree	0.855 ± 0.215	1.00% ± 0.22%	0.893	0.991
	Random Forest	0.839 ± 0.240	1.01% ± 0.27%	0.885	0.983
	Support Vector Machine	1.409 ± 0.037	1.82% ± 0.04%	0.730	0.234
	Artificial Neural Network	0.882 ± 0.049	1.06% ± 0.06%	0.877	0.129

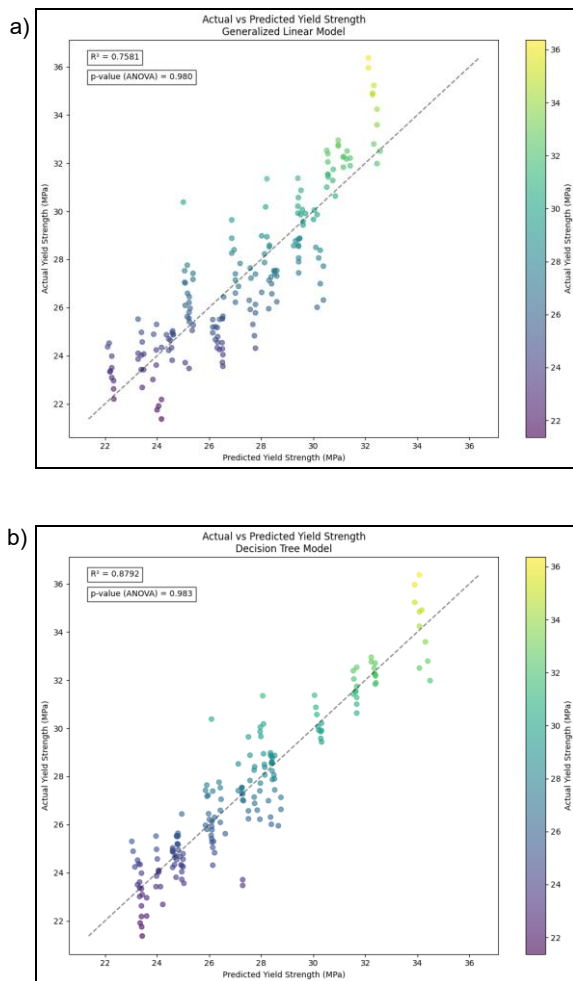


Figure 13 Example of Comparing Actual Yield Strength with Predicted Values for Recycled Polypropylene Composite

Materials Mixed with Tea Waste Using Algorithms a) General Linear Regression and b) Decision Tree

3.4 Research Discussion

From the analysis of the influence of factors on the mechanical property of composite materials, it was found that the TPE factor had the most significant impact, showing a negative effect on Yield Strength, Tensile Strength, and Hardness. However, it had a positive effect on Percentage Elongation and Impact Strength. This phenomenon can be explained by the toughening mechanism of TPE in composite materials, which acts as a high-elasticity phase (elastomeric phase) capable of absorbing a lot of energy. When the composite material is subjected to impact, the energy is distributed and absorbed by TPE particles, increasing impact resistance. Additionally, this leads to an increase in the material's ability to undergo plastic deformation, resulting in higher Percentage Elongation. Therefore, increasing the amount of TPE results in a decrease in the Strength and Hardness of the composite material. (Quaresimin *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024)

The addition of PP-g-MA showed a positive influence on the composite material, enhancing Yield Strength, Tensile Strength, and Impact Strength, as well as having a positive effect on Hardness. However, it had a negative influence on

Percentage Elongation. These experimental results align with the theory of interface improvement in composite materials, as PP-g-MA acts as a coupling agent. The maleic anhydride (MA) groups can form ester or hydrogen bonds with the hydroxyl (-OH) groups on the surface of the tea residual, while the polypropylene (PP) segment can interpenetrate and form physical entanglements with the polypropylene matrix material. This results in more efficient stress transfer between the matrix and reinforcement, leading to increased strength of the composite material. The increase in impact resistance after adding PP-g-MA is due to improved interface properties that reduce stress concentration, which is the starting point for cracking (GümüŖ, 2022; Tipboonsri and Memon, 2024). However, the decrease in Percentage Elongation of the composite material in this study is due to the increased stiffness of the composite material following interface improvement.

For the type of tea waste, its influence was less than the first two factors mentioned. The analysis found that Thai tea residual resulted in higher values for Yield Strength and Tensile Strength (+) compared to Green tea residual. However, Thai tea residual led to lower Impact Strength (-) and significantly lower Hardness (-) compared to Green tea residual. In contrast, green tea residual resulted in lower Yield Strength and Tensile Strength (-) than Thai tea residual but provided higher Impact Strength (+) and significantly higher Hardness (++) compared to Thai tea waste. The differences in mechanical property effects between these two types of tea residual can be explained by differences in molecular structure and chemical composition. Thai tea residual may have a cellulose structure that is more suitable for withstanding Tensile forces, leading to efficient stress transfer between tea residual particles and the Polymer Matrix. Green tea waste might have a different lignin composition, affecting its Hardness and ability to absorb energy from impact. The fact that Green tea waste has significantly higher Hardness than Thai tea residual may be related to differences in molecular orientation or crystallinity, which directly affect the composite material's resistance to deformation. Additionally, the microstructural arrangement capable of distributing and absorbing energy in each type of tea residual is related to differences in particle size, shape, or porosity. The uniform distribution of small particles is a key

mechanism for enhancing Impact Strength. (Nasri *et al.*, 2023; Poopakdee and Thammawichai, 2024; Tamura *et al.*, 2024)

The comparative analysis of machine learning algorithms' performance shows that Decision Tree and Random Forest are outstanding in predicting the mechanical property of composite materials. This is due to their key characteristics, including the ability to handle non-linear relationships without requiring predefined relationship forms, especially in datasets with multiple classes and complex interactions between features. Their mechanism for evaluating and selecting important variables helps reduce overfitting and increase predictive accuracy, as well as their robustness to outliers in the dataset. In contrast, the Support Vector Machine (SVM) exhibits significant limitations in its application for predicting mechanical property, particularly its sensitivity to hyperparameter tuning, which requires expertise and high computational resources. The complexity in processing large datasets may necessitate techniques like sampling or decomposition, the difficulty in interpreting physical models from support vectors, and the need to select an appropriate kernel function for the data characteristics. These factors result in SVM having lower performance in predicting mechanical property of composite materials compared to Decision Tree and Random Forest. (Kibrete *et al.*, 2023; Wang and Wu., 2023; Sorour *et al.*, 2024)

When discussing research related to using artificial intelligence algorithms to predict the mechanical property of Wood Polymer Composites, it is found that each study yields different results depending on the properties of interest, the composition used, and the choice of algorithms. For example, a study by Joo *et al.* (2022) aimed to develop models for predicting the properties of PP composites using Multiple Linear Regression (MLR), Deep Neural Network (DNN), and Random Forest (RF) algorithms. When comparing the performance of these algorithms, it was found that MLR had the highest efficiency in predicting flexural strength (RMSE 8.3122, R^2 0.9291) and melting index (RMSE 2.4072, R^2 0.9406), while DNN was most accurate in predicting tensile strength (RMSE 4.9358, R^2 0.9587). All algorithms had R^2 values above 0.8, exceeding the minimum standard of 0.7. This study confirms that the effectiveness of the same model can vary depending on the desired property, and selecting the appropriate model can lead to highly accurate predictions of the physical properties of composite materials. (Joo *et al.*,

2022; Türker *et al.*, 2024) conducted research testing the Flexural Properties of Glulam wood with different sizes, reinforced with Carbon Fiber-Reinforced Polymers. They then used Machine Learning techniques to predict these properties using three methods: Artificial Neural Network (ANN), Random Forest, and XGBoost. The study found that as the cross-sectional size of the wood increased, its Flexural Properties also improved. The use of reinforcement materials increased these properties by approximately 22%. Additionally, all three predictive techniques showed high accuracy, but Random Forest provided the best predictive results ($R^2 = 0.9892$). Therefore, it can be concluded that the Flexural Properties of Reinforced wooden beams of different sizes can be accurately predicted using Machine Learning techniques. (Wang *et al.*, 2023; Türker *et al.*, 2024) proposed a study on Plant Fiber-Reinforced Composite materials, focusing on predicting Mechanical property for optimal design and application. They conducted Tensile Property tests and simulations using finite element methods combined with Machine Learning. The study found that the type of resin, the interface between fibers and the matrix, the volume fraction of fibers, and the interaction among these factors affected the Tensile Properties of the Composite Materials. In comparing the performance of Machine Learning algorithms, it was found that the Gradient Boosting Decision Tree (GBDT) provided the best predictive results, with an R^2 value of 0.786. Other integrated models, such as Random Forest, XGBoost, and CatBoost, also showed better predictive capabilities than the basic Decision Tree model. Additionally, the analysis indicated that the properties of the resin and the volume fraction of fibers were critical parameters influencing the tensile strength of composite materials. This study provided in-depth insights and an effective approach to analyzing the tensile properties of complex bio-based composite materials. (Wang *et al.*, 2023)

From reviewing research related to the application of Artificial Intelligence Algorithms in predicting the Mechanical property of Wood Polymer Composites, it can be concluded that predictive efficiency depends on several factors, including the type of algorithm used, the specific properties being studied, and the composition of the material. It was found that Machine Learning algorithms such as Multiple Linear Regression, Deep Neural Network, Random Forest, Artificial Neural Network, and Gradient Boosting Decision Tree have the ability to accurately predict various mechanical property. Each

study found that the algorithm providing the highest performance varied depending on the properties being studied, such as Flexural Strength, Tensile Strength, and Melting Index, with most R^2 values exceeding 0.8, which is considered reliable. Additionally, factors such as the type of resin, the proportion of reinforcing fibers, and the interface between fibers and the matrix were found to significantly affect the mechanical property of composite materials. Therefore, selecting the appropriate algorithm can enhance the accuracy and reliability of predicting the physical and mechanical property of composite materials.

4. Conclusion

Based on the objectives of this research, the findings can be summarized as follows:

1) To apply Artificial Intelligence or Machine Learning Algorithms to study the influence of factors affecting the Mechanical property of Recycled Polypropylene Composite materials filled with tea residual. The study found that Artificial Intelligence Algorithms can effectively demonstrate the influence of various factors, consistent with related research that discovered TPE (Thermoplastic Elastomer) has the most significant impact on mechanical property. TPE negatively affects Strength and Hardness but Positively affects Flexibility and Impact Strength. Meanwhile, PP-g-MA improves Strength and interfacial adhesion between phases. The type of tea residual affects mechanical property differently based on its structure and chemical composition.

2) To compare the predictive efficiency of artificial intelligence algorithms on the mechanical property of recycled polypropylene composite materials mixed with tea waste. In terms of machine learning-based prediction, it was found that Decision Tree and Random Forest algorithms provided the most accurate predictions for most mechanical property, with R^2 values exceeding 0.8 and low error values. This aligns with related research. The study not only provides in-depth insights into the relationship between components and material properties but also demonstrates the potential of using machine learning techniques to efficiently design and develop composite materials with desired properties.

A major challenge in recycled materials research is the variability of data caused by material purity and impurities, making it hard to achieve reliable results. Traditional statistical methods often cannot fully capture the complex, nonlinear

influences in such data, highlighting the need for alternative approaches. Machine learning algorithms, now more accessible, can analyze complex datasets more accurately by identifying patterns that traditional methods may miss. As a result, integrating machine learning into materials research enables more precise predictions and deeper insights. This reflects the growing role of artificial intelligence in materials science, driving smarter and more sustainable innovations.

One key limitation of this research is the variability and inconsistency of data quality in recycled materials, which can hinder the accuracy of machine learning predictions. Additionally, the interpretability of complex algorithms remains a challenge, making it difficult for researchers to fully trust and apply these models in practical engineering contexts. The limited availability of large, standardized datasets and the potential lack of generalizability of models trained on specific material types further restrict the broader application of these AI-driven approaches in real-world recycling scenarios. To advance the use of machine learning in recycled materials research, it is important to build high-quality, standardized datasets, develop robust methods for integrating diverse data, and focus on interpretable models to foster trust and adoption. Additionally, applying techniques like transfer learning can help models generalize across different domains, while expanding real-world validation and encouraging interdisciplinary collaboration will ensure practical impact and continued progress in the field.

5. Acknowledgement

The research team would like to express their deepest gratitude to the Department of Engineering Management, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, for their valuable and crucial advice throughout this research project. Additionally, the research team would like to thank Altair Engineering Inc. for kindly providing AI Studio software version 2024.1.0. This cutting-edge technology tool has proven to be extremely important in the study of Artificial Intelligence Algorithms, significantly enhancing the depth and accuracy of the research findings.

6. Reference

Eroğlu, M.A., Altun, S. and Ciritcioğlu, H.H. 2024. Modeling of mechanical property of wood-polymer composites

with Artificial Neural Networks. **BioResources** 19(3): 4468-4485.

Faurika, F., Khudori, A.N. and Haris, M.S. 2024. Application of Cross-Validation techniques to handle overfitting in a case study of decision tree implementation for lung cancer prediction. **ROUTERS Jurnal Sistem Dan Teknologi Informasi** 2(2): 111-120.

Feng, L., Wang, D. and Yan, J. 2023. Reliability Study of Wood-Plastic composites based on probabilistic finite elements. **Polymers** 15(2): 312.

Gümüş, B.E. 2022. Effect of MA-g-PP addition on mechanical property of polypropylene/hollow glass spheres/nanoclay composites. **Polymer Bulletin** 80(3): 3405-3422.

Jiang, X., Wang, Z., Sun, D., Lu, T. and Wang, T. 2021. Toughening mechanism of unidirectional stretchable composite. **Frontiers in Robotics and AI** 8: 673307.

Joo, C., Park, H., Kwon, H., Lim, J., Shin, E., Cho, H. and Kim, J. 2022. Machine learning approach to predict physical properties of polypropylene composites: application of MLR, DNN, and random forest to industrial data. **Polymers** 14(17): 3500.

Khongrit, A., Limsiri, C. and Meehom, S. 2024a. Application of Generative Artificial Intelligence in Studying the Effect of Additives on Mechanical property of Recycled Polypropylene Composite with Green Tea Residue. pp. 913-929. *In* Nachaisit, P. ed. **The Engineering Science Technology and Architecture Conference 15th**. Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus. (in Thai)

Khongrit, A., Limsiri, C. and Meehom, S. 2024b. Comparative Analysis of Artificial Intelligence Algorithms for Predicting the Elastic Modulus of Recycled Polypropylene-Tea Residue Composites. **College of Asian Scholars Journal** 14(4): 31-45. (in Thai)

Khongrit, A., Limsiri, C. and Meehom, S. 2023. Effect of PP-g-MA and TPE on the Tensile Properties of Recycled Polypropylene/Thai Tea Waste Composites, pp. 176-186. *In* Yordle, C. ed. **Sci-Tech CMRU Conference 2024 2nd**. Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University. (in Thai)

Khongrit, A., Vongchavalitku, S. and Khodpun, M. 2022. A Preliminary Study on Composites from Recycled

- Grade Polypropylene Mixed with Spent Tea. **Rangsit University Journal of Engineering and Technology** 25(2): 43-56. (in Thai)
- Kibrete, F., Trzepieciński, T., Gebremedhen, H.S. and Woldemichael, D.E. 2023. Artificial intelligence in predicting mechanical property of composite materials. **Journal of Composites Science** 7(9): 364.
- Liu, S., Wang, D., Guo, G., Zhang, J., Qiu, J. and Zhang, A. 2024. Effect of composition on processing and mechanical property of TPE for injection molding automotive skin. **Macromolecular Chemistry and Physics** 226: 2400314.
- Lumumba, V., Kiprotich, D., Mpaine, M., Makena, N. and Kavita, M. 2024. Comparative analysis of Cross-Validation techniques: LOOCV, K-folds Cross-Validation, and repeated K-folds Cross-Validation in machine learning models. **American Journal of Theoretical and Applied Statistics** 13(5): 127-137.
- Ma, Q., Zhong, Y., Wang, Z. and Bukkapatnam, S. 2023. Effect of microstructure on the machinability of natural fiber reinforced plastic composites: A novel Explainable Machine Learning (XML) approach. **Journal of Manufacturing Science and Engineering** 146(3): 031003.
- Nakayama, K. and Sakakibara, K. 2024. Machine learning strategy to improve impact strength for PP/cellulose composites via selection of biomass fillers. **Science and Technology of Advanced Materials** 25(1): 2351356.
- Nasri, K., Loranger, É. and Toubal, L. 2023. Effect of cellulose and lignin content on the mechanical property and drop-weight impact damage of injection-molded polypropylene-flax and -pine fiber composites. **Journal of Composite Materials** 57(21): 3347-3364.
- Poopakdee, N. and Thammawichai, W. 2024. The effects of the crystallinity index of cellulose on the flexural properties of hybrid-cellulose epoxy composites. **Journal of Metals Materials and Minerals** 34(3): 1902.
- Qin, N. and Bing, S. 2024. Prediction of longitudinal resonance elastic modulus of wood-plastic composites based on GM (1, N) neural network. **Journal of Physics Conference Series** 2785(1): 012157.
- Quaresimin, M., Salviato, M. and Zappalorto, M. 2015. Toughening mechanisms in nanoparticle polymer composites, pp. 113-133. In Qinghua, Q. and Jianqiao, Y., eds. **Toughening Mechanisms in Composite Materials**. Woodhead Publishing.
- Rahaman, N.M.M., Rani, N.S., Islam, N.M.R. and Bhuiyan, N.M.M.R. 2023. Machine Learning in Business Analytics: Advancing Statistical Methods for Data-Driven Innovation. **Journal of Computer Science and Technology Studies** 5(3): 104-111.
- Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvaneshwari, V. and Bhoopathi, R. 2022. A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. **Polymers** 14(3): 589.
- Sorour, S.S., Saleh, C.A. and Shazly, M. 2024. A review on machine learning implementation for predicting and optimizing the mechanical behaviour of laminated fiber-reinforced polymer composites. **Heliyon**. 10(13): e33681.
- Tamura, N., Hasunuma, K., Saito, T. and Fujisawa, S. 2024. Mechanical and thermal properties of porous Nanocellulose/Polymer composites: influence of the polymer chemical structure and porosity. **ACS Omega** 9(17): 19560-19565.
- Tipboonsri, P. and Memon, A. 2024. The Impact of PP-g-MAH on Mechanical property of Injection Molding of Long Glass Fiber/Polypropylene Pellets from Thermoplastic Pultrusion Process. **Journal of Manufacturing and Materials Processing** 8(2): 53.
- Türker, Y.Ş., Kiliçarslan, Ş. and Ince, E.Y. 2024. Performance of ANN, Random Forest and XGBoost methods in predicting the flexural properties of wood beams reinforced with carbon-FRP. **Wood Material Science and Engineering** 1: 1-12.
- Wang, S. and Wu, X. 2023. The Mechanical Performance Prediction of Steel Materials based on Random Forest. **Frontiers in Computing and Intelligent Systems** 6(1): 1-3.
- Wang, W., Wu, Y., Liu, W., Fu, T., Qiu, R. and Wu, S. 2023. Tensile performance mechanism for bamboo Fiber-Reinforced, Palm Oil-Based resin Bio-Composites using finite element simulation and machine learning. **Polymers** 15(12): 2633.



Research Article

Development of a Community-Level Dried Fish Strip-Cutting Machine

Jaran Tamjai ^a, Nasaporn Thammachot ^{a*}, Tawichart Yenwiset ^a and Jirawan Jansuwan ^b^a Industrial Engineering Program, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Mueang, Songkhla 90000, Thailand.^b Department of Management, Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Mueang, Songkhla 90000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2025-01-28

Revised: 2025-04-24

Accepted: 2025-05-13

Keywords:

slicing machine;

dried fish line slicing machine;

dried fish

This research aimed to develop a community-scale dried fish slicing machine designed for simplicity, ease of use, and enhanced productivity for its users. The machine was engineered to produce dried fish slices with a width ranging from 3.5 to 4 centimeters, powered by a 1/3 horsepower motor driving two sets of blades in opposite directions. When dried fish is fed into the blades, it is sliced into strips. Performance testing revealed that the machine achieved an average processing capacity of 6.98 ± 0.028 kilograms per hour with an average efficiency of $99.50 \pm 0.005\%$, compared to manual slicing, which averaged 0.70 kilograms per hour. This indicates that the machine operates approximately 10 times faster than manual labor. Economic analysis demonstrated that using the machine incurs a cost of 7.57 THB per kilogram, with a payback period achieved after processing 782.96 kilograms of dried fish strips, making it a cost-effective alternative to manual labor.

© 2025 Tamjai, J., Thammachot, N., Yenwiset, T. and Jansuwan, J. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

Coastal fishing in the Gulf of Thailand is a primary occupation for the people of Songkhla, providing income and sustenance for their families. However, the seasonal environmental and weather conditions affect fishing activities, leading to inconsistent incomes. Fishermen often face challenges such as catching either too few or too many fish compared to market demand. To mitigate these challenges, fishing communities have formed occupational groups to process seafood into products that can be consumed or sold year-round. This processing not only helps stabilize income but also adds value to seafood products.

Currently, the Ban Suan Kong Coastal Resource Conservation and Restoration Group in Nathap Subdistrict, Chana District, Songkhla Province, has been processing small, low-value fish into dried fish, sun-dried fish, and fish strips. Among these, fish strips have gained significant market popularity due to high demand. However, the group struggles to meet market needs as fish strip production is labor-intensive, relying on manual cutting with scissors. This results in slow production rates and workplace accidents.

To address these issues, various slicing and cutting machines have been developed to improve efficiency, reduce accidents, and ensure consistent product quality. These machines are often tailored to specific raw materials. For

* Corresponding author.

E-mail address: nasaporn.t@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Tamjai, J., Thammachot, N., Yenwiset, T. and Jansuwan, J. 2025. Development of a Community-Level Dried Fish Strip-Cutting Machine. *Recent Science and Technology* 17(3): 266114.

example, the black ginger slicing machine (Yotphet, 2009) features a cylindrical centrifugal chamber with adjustable stainless steel blades for precise slicing. The fish skin cutting machine (Kongsuk, 2009) uses motor-powered circular blades with uniform spacing to ensure consistent cuts. Other examples include the cracker cutting machine, which reduces cutting time by 44% (Khunburi and Wongmanee, 2020); the semi-automatic Thai sweet cereal bar cutting machine, which improves efficiency by 68.29% (Dulyala, 2020); the sliced bamboo-shoots cutter, designed to cut bamboo shoots into sheets approximately 3 mm thick. The cutting unit consists of two blades aligned in parallel with alternating edges, rotating at a speed of 800 rpm. Performance testing using three types of bamboo shoots revealed an average processing time of 32.32 seconds per kilogram. The machine demonstrated an efficiency improvement of 78.71% compared to similar conventional models (Jairtalawanich, 2021); the sajor-caju mushroom shredding machine was designed to slice oyster mushrooms into strips with a width of 5-8 millimeters. The cutting mechanism comprises two sets of circular blades, each set consisting of 18 blades with a radius of 40 millimeters, aligned in a straight line along the shaft. The spacing between each blade is 5 millimeters. Performance testing showed that at a rotational speed of 250 rpm, the machine reduced the processing time to 6.81 minutes, compared to 25.53 minutes when performed manually representing a fourfold improvement in processing speed. The operational efficiency was comparable to manual labor, at 89% (Sumrit *et al.*, 2022); the fish double-blade filleting machine, which operates twice as fast as manual labor (Nuchangsing and Maneesaeng, 2024), was designed to slice and peel mangoes. The slicing mechanism consists of four double-edged circular stainless-steel blades, each with a diameter of 9.5 centimeters and a thickness of 0.1 centimeters, arranged in parallel with an inter-blade spacing of 1.5 centimeters. The peeling unit employs an adjustable double-edged blade, allowing for customization of both blade distance and peeling angle. Peeling is performed after slicing, with the sliced mango conveyed via a belt system. Performance testing showed that slicing alone yielded a throughput of 105.61 kg/hr, while combined slicing and peeling operations achieved 48.70 kg/hr, both at a constant rotational speed of 80 rpm (Paurrat *et al.*, 2024); the cassava cubes cutting machine was designed with two integrated cutting units:

one for slicing cassava into sheets and another for dicing the sheets into cubes, connected by a conveyor belt system. The slicing unit employs a circular saw blade with pointed teeth, featuring a diameter of 10 inches and 30 teeth, operating at a rotational speed of 1,430 rpm. The dicing unit consists of 14 interlaced stainless-steel blades arranged to form square cutting grids with dimensions of 2.54 × 2.54 centimeters, operating at 1,400 rpm. Performance evaluation using two cassava cultivars yielded cubing efficiencies of $38.01 \pm 2.35\%$ and $40.23 \pm 2.46\%$, respectively (Maichoon *et al.*, 2024) and the vegetable shredder was designed to cut vegetables into strips ranging from 2 to 5 millimeters in width. The machine is equipped with three blades and two feeding channels. Performance testing was conducted on five types of vegetables: potatoes, carrots, daikon radish, cucumbers, and onions at rotational speeds of 500, 600, 700, and 800 rpm. The results indicated that rotational speed had a significant effect on the quality of the shredded products, with each type of vegetable having an optimal cutting speed. The percentage of material loss across different operating conditions ranged from $5.28 \pm 0.84\%$ to $19.15 \pm 1.89\%$ (Suriwong *et al.*, 2024).

Previous research has highlighted two key considerations in the design and development of cutting machines. First, the desired shape of the cut product such as slices, cubes, or strips determines the design of the blade system. Second, the type of raw material being processed influences the selection of motor size and the rotational speed of the blades. Typically, motors of 1 horsepower (HP) or 1/2 HP are used. The rotational speed is adjusted depending on the material's properties: lower speeds are applied for materials that are easily deformed, while higher speeds are used for tougher, more rigid materials. The machine is constructed from food-grade stainless steel, and its design is tailored to meet operational requirements. This study aims to design and develop a dry fish strip cutting machine capable of producing strips with the desired width specified by the user. The machine is constructed from food-grade materials, ensuring ease of use and maintenance. Its compact design makes it portable, and it operates with low energy consumption, providing both efficiency and cost-effectiveness.

2. Materials and Methods

2.1 Study of Current Working Conditions

The research team studied the working conditions of the Conservation and Restoration of Coastal Resources Group at Ban Suang Kong, Na Thap Subdistrict, Chana District, Songkhla Province. The group consists of 12 members, most of whom are primarily fishermen but have with low income. Therefore, a group of fisherwomen came together to process low-value fish, such as greenback fish, catfish, fox fish, and garfish, into sun-dried fish, dried fish, and fish strips to increase their household income. Fish strips are sold at a higher price and are the most popular product. However, the group faces challenges when they receive high orders, as they cannot process the required amount in time.

Currently, the group processes fish strips by hand. The production process involves removing the head of fresh fish, slicing the fish without removing the bones, and sun-drying them until the moisture content is about 50%, as shown in Figure 1. The fish is then cut into strips manually with scissors, as shown in Figure 2. This cutting process is labor-intensive and time-consuming. Moreover, prolonged cutting can result in injuries to the workers, leading to a shortage of available workers for the task and the inability to meet customer demand.

Data collected indicate that a single worker can cut 0.7 kilograms of fish strips per hour. The width of the strips is inconsistent throughout their length. A sample of 100 fish strips was measured at three points: Point A (head), Point B (middle), and Point C (tail), as shown in Figure 3. The results revealed that the width at Point A ranged from a minimum of 1.5 mm to a maximum of 6.0 mm, with an average of 3.512 ± 1.135 mm; at Point B, the width ranged from a minimum of 1.0 mm to a maximum of 6.0 mm, with an average of 3.342 ± 1.127 mm; and at Point C, the width ranged from a minimum of 1.0 mm to a maximum of 7.0 mm, with an average of 3.074 ± 1.314 mm, as shown in Table 1.

The graphs in Figure 3 and Figure 4, depicting box-and-whisker plots of the width of the fish strips at each of the three points, reveal that the manual cutting process results in inconsistent strip widths across all three sections.



Figure 1 Dried fish for cutting



Figure 2 Traditional production process

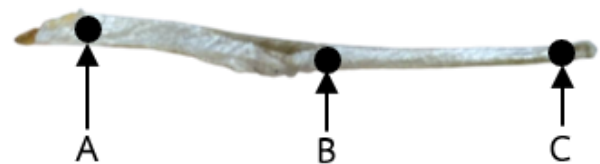


Figure 3 Measurement of the width of dried fish fillet cut into strips

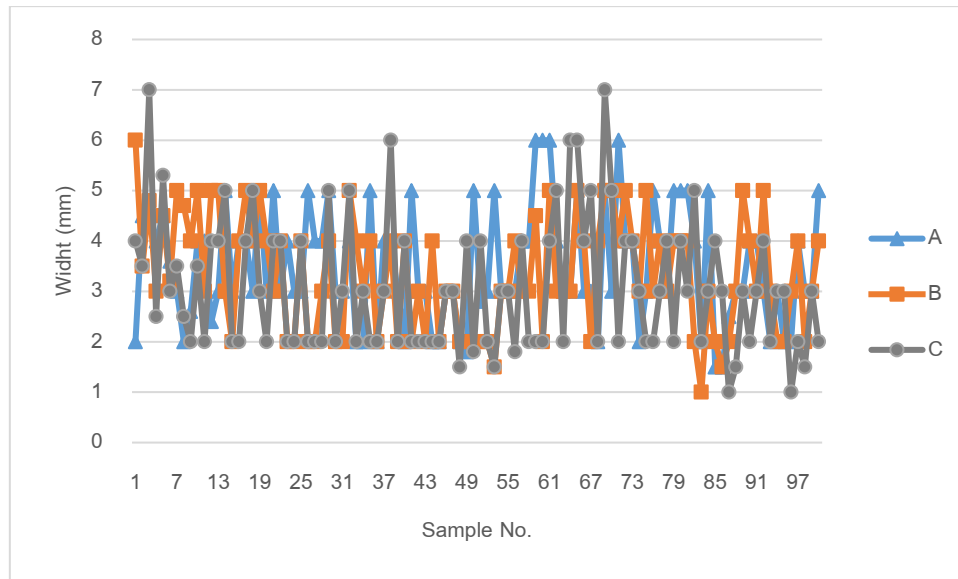


Figure 4 The line graph compares the width of dried fish strips cut by manual labor

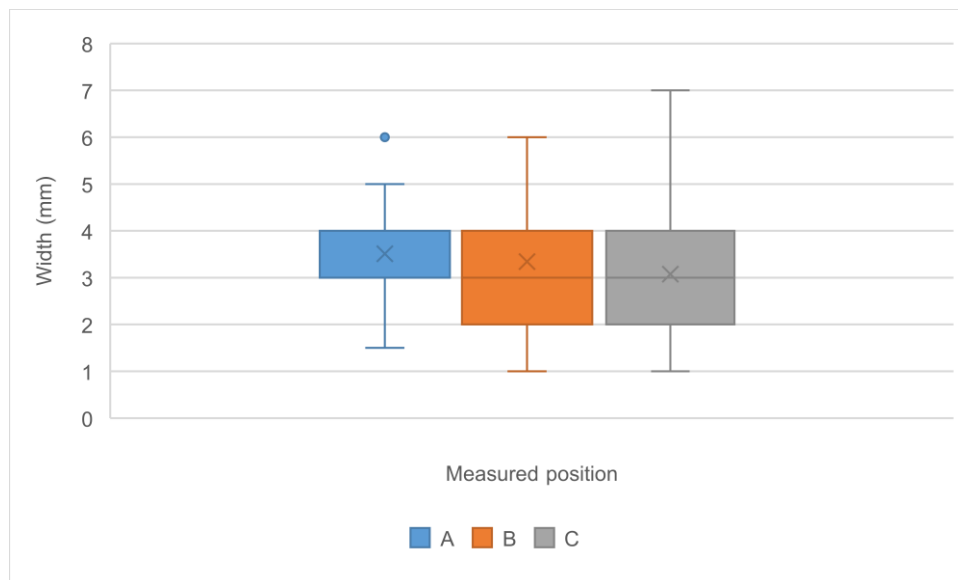


Figure 5 The box-and-whisker plot compares the average width of dried fish strips cut by manual labor

Table 1 The width of dried fish fillet cut into strips manually by human labor

Example	Width (mm)		
	A	B	C
Min	1.5	1.0	1.0
Max	6.0	6.0	7.0
Average	3.512±1.135	3.342±1.127	3.074±1.314

2.2 Design of a Machine for Cutting Dried Fish into Strips

2.2.1 Structure of a Machine for Cutting Dried Fish into Strips

Design a compact structure for a dried fish strip-cutting machine suitable for community use. The structure is constructed from food-grade stainless steel, ensuring portability and lightweight characteristics, as illustrated in Figure 6.

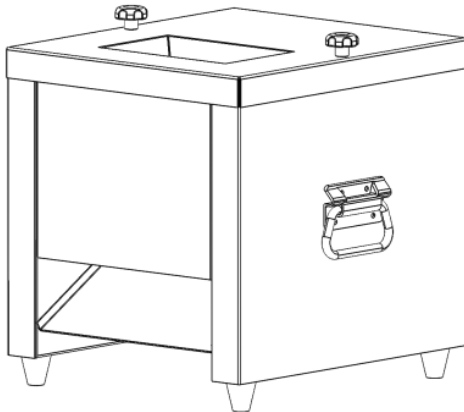


Figure 6 Structural Design of a Dried Fish Strip-Cutting Machine

2.2.2 Cutting Blade Assembly

The cutting blade assembly is designed using food-grade stainless steel to produce dried fish strips with a width (W) of approximately 3.5 millimeters, as specified by customer requirements. The term 'width' refers to the transverse dimension of the dried fish strips obtained after the cutting process (Figure 7). The blades are made from circular stainless-steel plates with a diameter of 80 millimeters and a thickness of 0.8 millimeters. These blades are alternately arranged with spacer rings of 3.5 millimeters thickness along a shaft, comprising 18 blades per set, for a total of two sets (Figure 8).

The two shafts are positioned 75 millimeters apart, with the blades of each set interleaved to achieve shearing action as the shafts rotate toward each other. The total length of the blade assembly is 100 millimeters, enabling efficient cutting of dried fish into uniform strips.

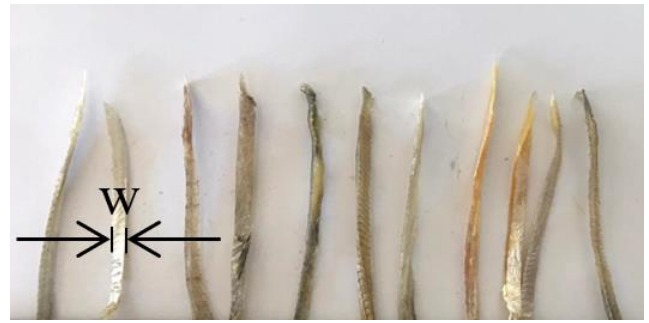


Figure 7 Measurement of the Width of Dried Fish Strips

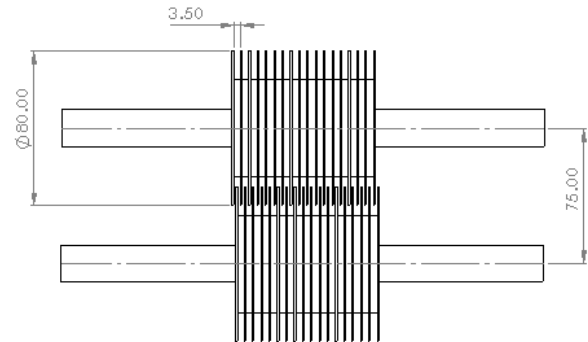


Figure 8 Cutting Blade Assembly

2.2.3 Motor and Power Transmission System

A 1/3 horsepower electric motor is selected as the primary power source. The power is transmitted to the system via a pulley mechanism. The driving pulley has a diameter of 1.5 inches, while the driven pulley has a diameter of 3 inches, connected by a belt. This configuration reduces the rotational speed from 1,450 revolutions per minute (RPM) to 725 RPM. The reduced speed ensures optimal cutting performance and minimizes the risk of jerking or uneven motion during the cutting process of dried fish strips.

2.3 Results of the Design and Construction of the Dried Fish Strip-Cutting Machine

The dried fish strip-cutting machine was designed and constructed with dimensions of 30 x 34 x 33 cm. The main components of the machine include the following:

Frame Structure (1): Designed with a compartment for loading dried fish, constructed from 1-millimeter-thick stainless steel.

Feeding Slot (2): A channel for placing the dried fish was designed with a width of 10 millimeters and a length of 150 millimeters.

Output Slot (3): The channel, where the cut strips are discharged at a 45-degree inclination, is designed to facilitate efficient material flow.

Motor (4): Provides the driving force for the machine. The motor is a 1/3 horsepower electric motor.

Pulley (5, 7): Transmits rotational power from the motor to the blade shafts. The driving pulley has a diameter of 1.5 inches, while the driven pulley has a diameter of 3 inches.

Belt (6): Transfers power between the pulleys. (V-belt)

Gears (9): Facilitate synchronization and smooth rotation of the blade assembly, including two gears with a diameter of 2.5 inches.

Blade Assembly (10): Consists of two rotating sets of blades for cutting the dried fish into strips. The blades are made from circular stainless-steel plates with a diameter of 80 millimeters and a thickness of 0.8 millimeters.

The operation of the machine, as shown in Figure 9 and Figure 10, begins with activating the switch to power the motor. Dried fish, pre-split into halves, are placed in the designated feeding slot. The fish passes through two sets of rotating blades that cut the fish into strips. The power from the motor is transmitted through the pulleys and belt system to the blade shafts. Once the dried fish is cut into strips, it falls into the output channel at the front of the machine.

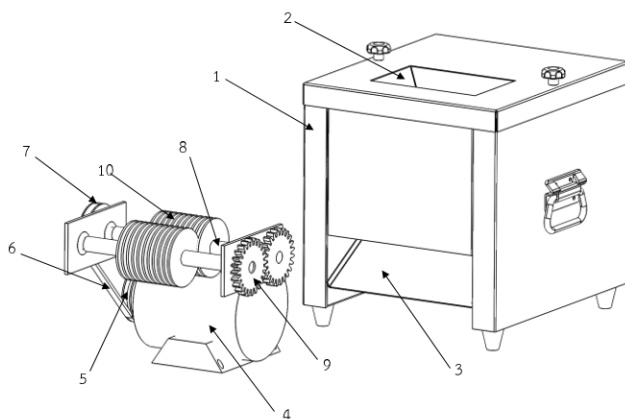


Figure 9 Components of the Dried Fish Strip-Cutting Machine



Figure 10 The Constructed Dried Fish Strip-Cutting Machine

2.4 Testing the Operation of the Machine

The performance and efficiency of the dried fish strip-cutting machine were tested following the procedure outlined below:

1. Weigh 200 grams of dried fish.
2. Place the weighed dried fish into the machine for cutting, with one operator feeding the fish. Record the time taken for the cutting process and the weight of the dried fish strips produced.
3. Repeat steps 1-2 five times and record the results.
4. Measure the width of the cut strips at three random locations: the beginning, middle, and end of the strip.
5. Calculate the capacity and efficiency of the machine using the formula provided in equation (1).

Note: In the machine operation test, dried fish were fed one at a time to facilitate comparison. Nevertheless, the machine is designed to handle multiple fish simultaneously during normal operation.

This testing procedure aims to assess the machine's cutting precision, consistency, and overall performance under typical operational conditions. (Thongkham *et al.*, 2022)

$$C_c = \frac{W_1}{t} \quad (1)$$

When:

C_c = Capacity for cutting dried fish (kilograms per hour)

W_1 = Weight of the dried fish strips produced (kilograms)

t = Time taken for the operation (hours)

This equation determines the output efficiency of the machine in terms of the amount of dried fish processed per hour.

The efficiency of the machine can be calculated using the following formula (2) (Thongkham *et al.*, 2022):

$$C_t = \frac{W_1}{W} \times 100 \quad (2)$$

When:

C_t = Efficiency of the machine (%)

W_1 = Weight of the dried fish strips produced to specification (fragment excluded) (kg)

W = Total weight of the dried fish (kg)

This formula calculates the operational efficiency of the machine as the ratio of the weight of the cut fish strips to the total weight of the dried fish, expressed as a percentage.

2.5 Economic Analysis

In the economic analysis, the total cost of the dried fish slicing machine was evaluated, including fixed costs, variable costs, depreciation (Stonier, 1980), electricity expenses (Beaty, 1984), and the payback period (Hunt and Wilson, 2016). The calculations were compared against the use of one laborer performing traditional manual slicing versus slicing with the developed machine.

3. Results and Discussion

3.1 Results of the Machine's Operational Testing

The results of the operational testing of the dried fish strip-cutting machine revealed that the machine was able to cut

dried fish strips at an average rate of 6.96 ± 0.043 kilograms per hour. The machine's efficiency averaged 99.40 ± 0.224 percent, as shown in Table 2.

Additionally, a random sample of 100 dried fish strips was measured, revealing the following dimensions for the width of the strips:

Head (A): The minimum width was 3.6 millimeters, the maximum width was 4.2 millimeters, and the average width was 3.965 ± 0.064 millimeters.

Middle (B): The minimum width was 3.5 millimeters, the maximum width was 4.0 millimeters, and the average width was 3.957 ± 0.077 millimeters.

Tail (C): The minimum width was 3.8 millimeters, the maximum width was 4.2 millimeters, and the average width was 3.965 ± 0.058 millimeters.

These measurements are presented in Table 3. The results indicate that the machine produces dried fish strips with consistent dimensions and high efficiency.

Figures 11 and 12 present a comparison of the average width of dried fish strips cut by the machine, using box-and-whisker plots. These plots visually represent the distribution of strip widths, including the minimum, maximum, and median values, as well as the interquartile range. The data displayed in these figures highlight the consistency and uniformity in the cutting process, demonstrating that the machine produces dried fish strips with minimal variation in width.

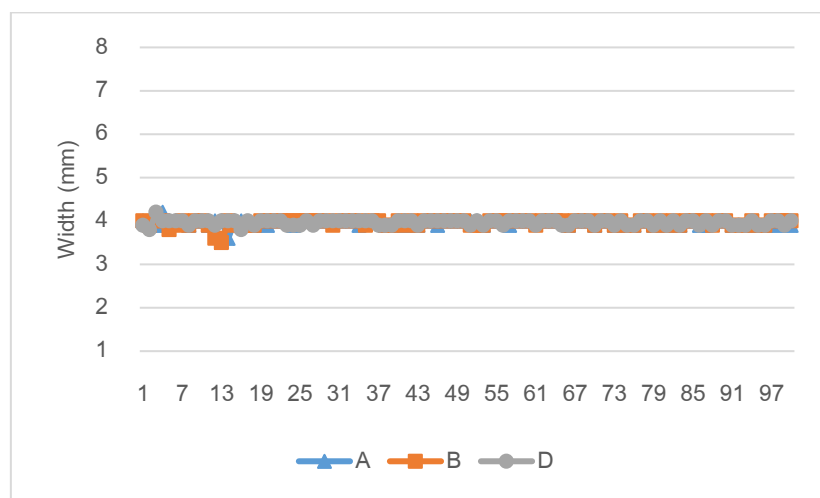


Figure 11 The line graph compares the width of dried fish strips cut by the dried fish strip-cutting machine.

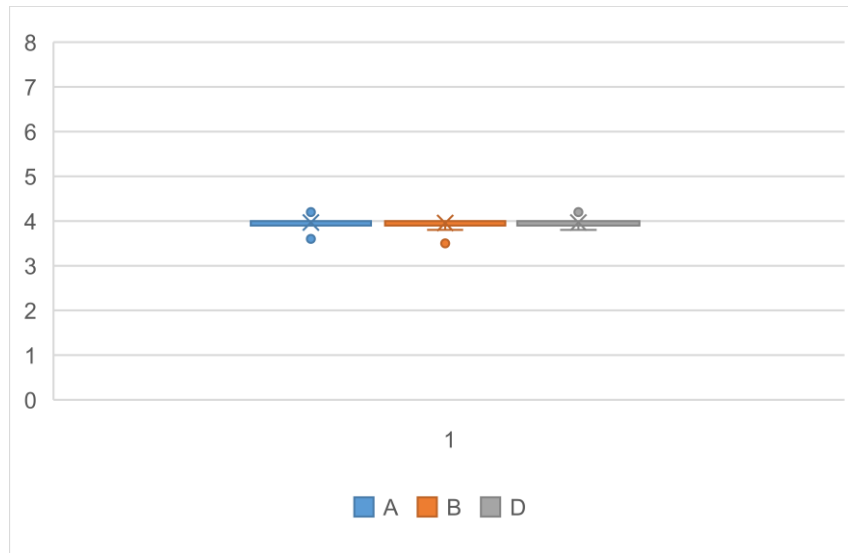


Figure 12 The box-and-whisker plot compares the average width of dried fish strips cut by the dried fish strip-cutting machine

Table 2 Performance Testing of the Dried Fish Slicing Machine

No.	W (g)	W ₁ (g)	t (s)	Cc (Kg/hr)	Ct (%)
1	198	197	101	7.02	99.49
2	200	199	103	6.96	99.50
3	203	202	104	6.99	99.51
4	200	199	103	6.96	99.50
5	199	198	102	6.99	99.50
Average	200.00±1.871	198.80±1.871	102.60±1.140	6.98±0.028	99.50±0.005

Table 3 Width of the dried fish strips sliced by the machine

Example	Width (mm)		
	A	B	C
Min	3.6	3.5	3.8
Max	4.2	4.0	4.2
Average	3.965±0.064	3.957±0.077	3.965±0.058

When comparing the line graphs representing the strip width of dried fish from three sampling points (100 samples each), Figure 4 (manual cutting) demonstrated a higher degree of variation, with the majority of minimum values around 2 mm and maximum values reaching up to 5 mm. In contrast, Figure 11 (machine cutting) exhibited significantly lower variability, with widths narrowly distributed between 3.9 mm and 4 mm. These findings suggest that manual cutting introduces greater inconsistency in strip width, while machine cutting achieves more uniform results with a lower standard deviation.

A similar trend is observed in the box-and-whisker plots, which illustrate the distribution of strip widths at the three

locations. In Figure 5, Point A showed most data points within the 3-4 mm range, whereas Points B and C displayed a slightly wider distribution, ranging from 2 to 4 mm. Conversely, Figure 12 revealed a much narrower distribution across all three points, with most values falling between 3.9 and 4 mm. This further supports the conclusion that machine cutting provides greater consistency and less variability in strip width compared to manual cutting.

3.2 Economic Analysis Results

Based on the economic analysis, with a prototype machine price of 50,000 THB, a service life of 10 years, and an interest rate or opportunity cost of 10%, it was found that

operating the machine with one laborer incurs a total annual cost of 86,718.75 THB. This comprises a total fixed cost of 7,250 THB per year and a total variable cost of 79,468.75 THB per year. The operational cost of the dried fish slicing machine

was calculated at 7.57 THB per kilogram. The net benefit is 63.86 THB per kilogram, and the payback period is achieved after processing 782.96 kilograms of dried fish, compared to manual labor. Details are presented in Table 4.

Table 4 Economic Analysis of the Dried Fish Slicing Machine

Details	Cost	Unit
Fixed cost		
Price of the Dried Fish Slicing Machine (P)	50,000	Baht
The value of the dried fish slicing machine at the end of its 10th year is estimated to be 10 percent of its initial cost. (S)	5,000	Baht
Depreciation (D) = (P-S)/L	4,500	Baht
Interest or Opportunity Cost (I) = (P+S)/2 x (10/100)	2,750	Baht
Total Fixed Cost per Year = D+I	7,250	Baht per year
Variable cost		
Maintenance cost is 10 THB per day, with 250 working days per year.	2,500	Baht per year
The average electricity consumption is 0.375 kWh, with an electricity price of 3.5 THB per unit. The machine operates 250 days per year, with 6 hours of operation per day.	1,968.75	Baht per year
The labor wage is 300 THB per day for 1 person, working 250 days per year.	75,000	Baht per year
Total Variable Cost	79,468.75	Baht per year
Total Cost	86,718.75	Baht per year
The cost per kilogram, based on 1 year of operation (1,500 hours/year), with the machine operating at a capacity of 7 kilograms per hour.	7.57	Baht per kilogram
The labor cost for manually slicing dried fish is 0.7 kilograms per hour (4.2 kilograms in 6 hours).	71.43	Baht per kilogram
Net Benefit	63.86	Baht per kilogram
Payback Period	782.96	Kilogram

The dry fish strip cutting machine shares a similar blade design with the sajan-caju mushroom shredding machine described by Sumrit *et al.* (2022), particularly in the arrangement of blades intended to produce strip-shaped cuts. However, the dry fish cutting machine utilizes a 1/3 horsepower (HP) motor operating at 725 RPM, while the sajan-caju mushroom shredding machine employs a 1/2 HP motor at 250 RPM, making the dry fish cutter more energy-efficient. In terms of performance, the dry fish cutting machine processes material ten times faster than manual labor, with an average operational efficiency of 99.40%. In comparison, the oyster mushroom slicer is only four times faster than manual slicing and has an average efficiency of 89.30%. Therefore, the dry fish strip cutting machine is a suitable replacement for manual labor,

offering high consistency in strip dimensions and improved energy efficiency.

4. Conclusion

A developed dried fish slicing machine is capable of producing strips with consistent width along their entire length, operating at an average capacity of 6.98 ± 0.028 kilograms per hour. The machine demonstrates an efficiency of 99.50 ± 0.005 percent. In comparison, manual slicing achieves an average capacity of only 0.70 kilograms per hour, indicating that the machine operates approximately 10 times faster than manual labor. Economic analysis reveals that utilizing the dried fish slicing machine incurs a cost of 7.57 THB per kilogram, with a break-even point achieved after processing 782.96 kilograms of dried fish.

5. Acknowledgement

This study was funded by the Fundamental Fund (FF) through the Program Management Unit on Area Based Development (PMU A) for the fiscal year 2022 under the framework of Innovation Communities for Sustainable Development. The researchers wish to extend their profound gratitude and sincere appreciation for this support.

6. Reference

- Beaty, H.W. 1984. **Handbook of Electric Power Calculation**. McGraw Hill, New York.
- Dulyala, R. 2020. Design and development of semi-automatic Thai sweet cereal bar cutting machine. **Academic Journal Uttaradit Rajabhat University** 15(2): 117-131.
- Hunt, D. and Wilson, D. 2016. **Farm Power and Machinery Management** (11thed). Waveland Press, Waveland.
- Jairtalawanich, S. 2021. Design and Development a Sliced Bamboo-shoots Cutter. **Kasem Bundit Engineering Journal** 11(3): 38-55.
- Khunburi, P. and Wongmanee, A. 2020. The cracker cutting machine development to production OTOP product of Tambon Tha Phutsa District Amphoe khlong khlung in Kamphaeng Phet Province. **Journal of Science and Technology Northern** 1(4): 42-48.
- Kongsuk, S. 2009. **Fish skin cutting machine (Thailand, patent number 5588)**. Department of Intellectual Property. Available Source: <https://www.ipthailand.go.th>, January 15, 2024.
- Maichoon, T., Pholpho, T. and Udompetaikul,V. 2024. Development and Efficiency Evaluation of Cassava Cubes Cutting Machine. **Thai Society of Agricultural Engineering Journal** 30(1): 21-28.
- Nuchangsing, W. and Maneesaeng, T. 2024. Development of Flat Fish Double Blade Filleting Machine for Community Business. **Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University** 7(1): 59-78.
- Paurat, N., Meethaworn, K., Wongsakulsukool, K., Pathaveerat, S. and Noypitak, S. 2024. Study on Physical Properties of Mango for Design and Fabrication Picked Mango Cutting and Peeling Machine. **Thai Society of Agricultural Engineering Journal** 30(1): 1-9.
- Stonier, A.W. 1980. **A Text Book of Economic Theory**. Longman, New York.
- Sumrit, T., Deeli, N., Pinthong, C. and Inirai, P. 2022. Design and Construct of the Sajor-caju Mushroom Shredding Machine Prototype. **Life Sciences and Environment Journal** 23(1): 170-183.
- Suriwong, V., Inirai, P., Swaeng-ngam, S., Sumrit, T., Khamphumee, T. and Meebun, S. 2024. Design and Performance Evaluation of Vegetable Shredder. **Burapha Science Journal** 29(1): 18-35.
- Thongkham, P., Langkapin, J., Kalsirisilp, R. and Parnsakhorn, S. 2022. Design and Fabrication of Straw Cutting Machine. **Srinakharinwirot University Engineering Journal** 17(2): 31-41.
- Yotphet, S. 2009. **Black ginger slicing machine (Thailand, Patent application number 0901005490)**. Department of Intellectual Property. Available Source: <https://www.ipthailand.go.th>, January 15, 2024.

Research Article

การเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊สชีไฟเออร์แบบไหลลง
ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ

**Enhancement of Downdraft Gasifier
using Cashew Nut Shell Waste as Fuel with Automatic Control System**

พิทักษ์ คล้ายชม ^{a*} และ กันต์ อินทวงศ์ ^b

Pitak Khlaichom ^{a*} and Gunt Intuwong ^b

^a สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

^a Computer Engineering Program, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Mueang, Uttaradit 53000, Thailand.

^b สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

^b Industrial Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Mueang, Uttaradit 53000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-05-22

Revised: 2024-10-12

Accepted: 2024-11-06

Keywords:

automatic control system;

downdraft gasifier;

cashew nut shell waste

Automatic control systems are technologies designed to manage processes based on preset conditions, eliminating the need for direct human intervention. These systems enhance efficiency, speed, and safety in operations. The objective of this research was to increase the efficiency of a downdraft gasifier with an automatic control system. Thermocouples were used to measure the temperature inside the furnace, sending signals to a PLC controller for processing. A PID control program operated the inverter to regulate blower speed and control the air flow into the furnace. The system included a touch screen display for viewing various furnace status values and controlling the reduction zone temperature according to specified values. Additionally, it allowed both manual and automatic control of the blower and fuel feed motor. The experiment aimed to determine the thermal efficiency of a gasifier stove using cashew nut shell waste as fuel. The temperature of the reduction zone was controlled at three levels: 515 °C, 615 °C, and 715 °C. Samples of the producer gas were analyzed in a laboratory using a gas chromatography machine. The research results found that the composition of the producer gas at the reduction zone temperature level of 515 °C yielded the highest heating value, measured at 4.39 MJ/Nm³. The proportions of combustible gases CO, H₂, and CH₄ were 21.0%, 13.5%, and 0.8%, respectively. The gasification system's efficiency with an automatic control system was calculated to be 48.68%, compared to that of the original gasification system without an automatic control system, which had an efficiency value of 39.92%, indicating that the automatic control system increased the gasification system efficiency by 21.94 %. The producer gas can be used as heat energy in the processing process to replace firewood and LPG.

* Corresponding author.

E-mail address: pitak.khl@uru.ac.th

Cite this article as:

Khlaichom, P. and Intuwong, G. 2025. Enhancement of Downdraft Gasifier using Cashew Nut Shell Waste as Fuel by Automatic Control System. **Recent Science and Technology** 17(3): 263440.

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยไม่ต้องมีการควบคุมจากมนุษย์โดยตรง ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และความปลอดภัยมากขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิภายในเตาส่งสัญญาณไปประมวลผลที่เครื่องควบคุมพีแอลซี ใช้โปรแกรมควบคุมแบบพีไอดี สั่งงานเครื่องอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์เพื่อควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตา โดยมีจอแสดงผลระบบสัมผัส สามารถดูค่าสถานะต่าง ๆ ของเตา ควบคุมค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันได้ตามค่าที่กำหนด และควบคุมการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งแบบแมนนวลและแบบอัตโนมัติ ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันจำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C และส่งตัวอย่างโปรดิวเซอร์แก๊สไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ผลการวิจัยพบว่าองค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ระดับอุณหภูมิโซนรีดักชัน 515 °C สามารถคำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สได้มากที่สุด เท่ากับ 4.39 MJ/Nm³ มีสัดส่วนของแก๊สติดไฟ CO H₂ และ CH₄ เท่ากับ 21.0 % 13.5 % และ 0.8 % ตามลำดับ และคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซีไฟเคชั่นที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติได้เท่ากับ 48.68 % เปรียบเทียบกับระบบแก๊สซีไฟเคชั่นเดิมที่ไม่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพ 39.92 % แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตโนมัติทำให้ระบบแก๊สซีไฟเคชั่นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 21.94 % สามารถนำโปรดิวเซอร์แก๊สไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูปทดแทนฟืนและ LPG ได้มากขึ้น

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอัตโนมัติ, เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง, กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

1. บทนำ

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชเศรษฐกิจของอำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ มีพื้นที่ปลูกมะม่วงหิมพานต์มากเป็นอันดับ 1 ของประเทศ มีพื้นที่ปลูกทั้งหมด 91,904 ไร่ ได้ผลผลิต 7,267 ตันต่อปี ราคาเฉลี่ย 35.30 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 257 ล้านบาทต่อปี (Department of Agriculture Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2019) หลังจากกะเทาะเมล็ดแล้วจะทำให้มีปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้ง ประมาณ 5,400 ตันต่อปี สำหรับวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไเก้ต้อย อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ มีปริมาณการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กะเทาะเปลือก ประมาณ 88 ตันต่อปี มีปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป ประมาณ 250 ตันต่อปี นำไปสกัดน้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ด้วยเครื่องสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบเกลียวอัด (Screw Press) จะเหลือกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ประมาณ 185 ตันต่อปี (Phankam, 2022) หากมีการกำจัดโดยการกองกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทิ้งไว้ให้ย่อยสลายไปตามธรรมชาติ และทำลายโดยวิธีการเผาในพื้นที่โล่งแจ้ง จะก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ สารพิษจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ปนเปื้อนแหล่งน้ำชุมชน เกิดปัญหาขยะ ประกอบกับผลการศึกษาคูณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของน้ำมัน CNSL ของ Division of Agricultural Chemistry , Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives (1991) พบว่า น้ำมัน CNSL มีเป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ เหนียวข้น เป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันดังกล่าวได้รับความร้อนสูงบางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุน กัดเยื่อจมูกและเยื่อตา การเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่โล่งแจ้ง ยังก่อให้เกิดก๊าซ

ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ได้แก่ ฝุ่นละออง (TSP, PM10) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ มีเทน เป็นต้น แนวทางการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ของ Sangmanee (2021) นำเปลือกหุ้มเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาเป็นวัตถุดิบในการทำถ่านชีวภาพ (Cashew Nut Shell Biochar, CNSC) และศึกษาผลของการใช้ CNSC ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH, EC และการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชในดิน โดยใส่ปูนขาวและยิปซัมในการเปรียบเทียบ พบว่า CNSC มีประสิทธิภาพในการปรับค่า pH ของ CNSC น้อยกว่าปูนขาว โดยมีโพแทสเซียมซึ่งเป็นแคโทไอออนที่เป็นต่างเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความเป็นกรดในดินลดลง การใช้ CNSC ยังช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า และ Khlaichom (2021) นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์บิบน้ำมัน CNSL ออกเหลือเป็นกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบแก๊สซีไฟเคชั่น มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 39.92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนการใช้ฟืนและแก๊สหุงต้มในขั้นตอนการต้มเมล็ด การให้พลังงานความร้อนกับตูบเมล็ดของกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งช่วยลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงทั้งฟืนและแก๊ส LPG ได้ถึง 59,280 บาทต่อปี

จากปัญหาด้านการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จากกระบวนการแปรรูปมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างระบบแก๊สซีไฟเคชั่นขึ้น โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงเพื่อนำโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ระบบแก๊สซีไฟเคชั่นมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ซึ่งเป็นเตาที่ออกแบบเพื่อทำให้น้ำมันดินที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ โดยจุดเด่นของเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิด V-Hearth จะออกแบบเป็นเหล็ก

รูปวงแหวนรูปตัว V คว่ำลง โดยบริเวณระหว่างระนาบของหัวฉีดและวงแหวนเหล็กจะมีเก๋าก่อตัวขึ้น ช่วยเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อนทำให้เตาแก๊สซีฟิเออร์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น และมีส่วนประกอบของไซโคลน สกรับเบอร์ หัวเผาในการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแก๊สซีฟิเคชั่น พบว่ามีประสิทธิภาพทางความร้อนเพียง 39.92 % ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 2.22 มีอัตรากำลังความร้อน 26.82 kW องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้มีสัดส่วนของแก๊ส CO H_2 และ CH_4 คิดเป็น 16% 9.7% และ 1.5% ตามลำดับ มีค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สเท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากระบบแก๊สซีฟิเคชั่นที่สร้างขึ้น อาศัยการเหนี่ยวนำของสกรับเบอร์แบบเวนจูรีสร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาทดแทนการใช้เครื่องเป่าลมซึ่งมีอัตราการไหลของอากาศที่จำกัด (Khlaichom, 2021) และไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและสภาวะต่าง ๆ ภายในเตาแก๊สซีฟิเออร์ได้อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับ Samutjak and Jakrawatana (2016) ประเมินประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าชีวมวลเหลือทิ้งด้วยเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลง ด้วยการทดสอบระบบแก๊สซีฟิเคชั่นแบบไหลลงขนาด 20 kW โดยใช้ขี้ขี้ข้าวโพดสามารถผลิตแก๊สได้ในระบบประกอบด้วย CO H_2 และ CH_4 คิดเป็น 20% 18% และ 2% ตามลำดับ ค่าความร้อนของแก๊ส 6 MJ/Nm³ แก๊สที่ผลิตได้จะถูกทำความสะอาดไซโคลนและชุดตัวกรอง และสอดคล้องกับ Homdoun et al. (2010) ทำการทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตความร้อนจากกระบวนการแก๊สซีฟิเคชั่นที่ใช้งานร่วมกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมในการอบแห้งเมล็ดพืช เตาแก๊สซีฟิเออร์ที่ใช้ทดสอบเป็นแบบไหลลงขนาด 600 kWth ติดตั้งร่วมกับระบบทำความสะอาดแก๊สโดยทดสอบเป็นระยะเวลา รวม 30 ชั่วโมงต่อเนื่อง ผลการทดสอบพบว่าระบบแก๊สซีฟิเออร์ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงขี้ข้าวโพดเฉลี่ย 88.05 kg/h ค่าความร้อนและอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊สตลอดช่วงทดสอบมีค่าเฉลี่ย 5.3 MJ/Nm³ และ 252.09 m³ /h ตามลำดับ ประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 63.41% การใช้ระบบแก๊สซีฟิเออร์ร่วมกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมให้อัตราการเปลี่ยนแปลงชีวมวลและพลังงานต่ำกว่าการใช้เตาชีวมวลชนิดเดียว 30% และให้ต้นทุนการผลิตความร้อนในการอบแห้งพืชต่ำกว่าเตาชีวมวล แบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลงมักเกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิและคุณภาพของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ เนื่องจากระบวนการแก๊สซีฟิเคชั่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เหมาะสมในแต่ละโซน โดยเฉพาะโซนรีดักชันซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นโปรตีนเซอร์แก๊ส ควรรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 800 - 1,000 °C เพื่อการผลิตแก๊สที่เหมาะสมที่สุด (Unsomsri, 2022)

จากปัญหาดังกล่าว ทีมวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมาะสมกับเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง โดยการควบคุม

อุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซีฟิเออร์ให้สม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส และลดปริมาณน้ำมันดินและขี้เถ้าลง รวมถึงมีการวัดและแสดงผลค่าสภาวะต่าง ๆ ของเตา และแจ้งเตือนหากเกิดความผิดปกติขึ้นเพื่อความสะดวกปลอดภัยต่อการใช้งาน สามารถนำโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูป ได้แก่ การต้มเมล็ด การอบแห้ง และการอบปรุงรส เกิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติกับเตาแก๊สซีฟิเออร์ ลดต้นทุนค่าฟืนและ LPG ลดปริมาณขยะ ลดการปล่อยมลพิษจากกระบวนการผลิตได้มากยิ่งขึ้น เป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพก่อให้เกิดความยั่งยืนของการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยใช้รูปแบบการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) เพื่อการพัฒนาและหาประสิทธิภาพเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตพลังงานความร้อน

2.1 กลุ่มตัวอย่าง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดกลุ่มตัวอย่างการทดลองผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สด้วยเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งเป็นเศษที่เหลือจากการสกัดเอาน้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แล้ว

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ระบบเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด โซนเผาไหม้ และเส้นรอบวงของปลายหัวฉีด 130, 300 และ 248 mm. ตามลำดับ มีความสูงของโซนเผาไหม้ 275 mm. และความสูงของโซนรีดักชัน 115 mm.
- 2) ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่พัฒนาขึ้น
- 3) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ได้แก่ เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องชั่งน้ำหนัก เครื่องจับเวลา ชุดปั๊มดูดโปรตีนเซอร์แก๊ส ถังเก็บแก๊ส และเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย

- 1) ลงพื้นที่สำรวจวัสดุเหลือทิ้งและการใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูปของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไเก้ต้อย ตำบลหาดล้า อำเภอบ้านลาด จังหวัดอุดรธานี
- 2) ออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth และจัดหาและจัดเตรียมอุปกรณ์เพื่อสร้างและประกอบระบบควบคุมอัตโนมัติ
- 3) สร้างและติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth
- 4) ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์ที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติที่อุณหภูมิภายในโซนรีดักชัน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C
- 5) ส่งตัวอย่างโปรตีนซีโรสไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส และประเมินประสิทธิภาพของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative : PID) ประกอบด้วยควบคุม 3 ส่วน (Kiatsunthorn, 2015) ได้แก่

1. ตัวควบคุมแบบพี ส่วนนี้สัญญาณควบคุม (CVp) เท่ากับผลคูณของอัตราการควบคุมแบบพี (Kp) กับผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (SV) กับตัวแปรกระบวนการ (PV) หาได้จากสมการที่ 1

$$CVp = Kp(SV - PV) \quad (1)$$

2. ตัวควบคุมแบบไอ ส่วนนี้สัญญาณควบคุม (CVi) เท่ากับผลคูณของอัตราการควบคุมแบบไอ (Ki) กับปริพันธ์ (Integrate) ผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (SV) กับตัวแปรกระบวนการ (PV) หาได้จากสมการที่ 2

$$CVi = Ki \int (SV - PV) dt \quad (2)$$

3. ตัวควบคุมแบบดี ส่วนนี้สัญญาณควบคุม (CVD) เท่ากับผลคูณของอัตราการควบคุมแบบดี (Kd) กับอนุพันธ์ (Derivative) ผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (SV) กับตัวแปรกระบวนการ (PV) หาได้จากสมการที่ 3

$$CVD = Kd \frac{d(SV - PV)}{dt} \quad (3)$$

การควบคุมแบบ PID จึงเป็นการรวมสามส่วนเข้าด้วยกัน หาได้จากสมการที่ 4

$$CVpid = Kp(SV - PV) + Ki \int (SV - PV) dt + Kd \frac{d(SV - PV)}{dt} \quad (4)$$

ค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส มีหน่วยเป็น MJ/Nm³ ซึ่งประกอบด้วย แก๊ส CO H₂ และ CH₄ สามารถหาได้จากสมการที่ 5 (Basu, 2010)

$$HV_{gas} = (XCO \times 12.63) + (XH_2 \times 10.78) + (XCH_4 \times 35.88) \quad (5)$$

โดยที่ HV_{gas} คือ ค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส (MJ/Nm³)
 XCO คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์
 XH_2 คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของไฮโดรเจน
 XCH_4 คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของมีเทน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น เป็นค่าพลังงานความร้อนจากโปรตีนซีโรสที่ระบบสามารถผลิตได้ เทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในระบบ สามารถหาได้จากสมการที่ 6 (Food and Agriculture Organization of The United Nations, 1986)

$$\eta_{th} = \frac{HV_{gas} \times Q_{gas}}{HV_{fuel} \times FCR_{fuel}} \times 100 \quad (6)$$

โดยที่ η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น (%)

HV_{gas} คือ ค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส (MJ/Nm³)

Q_{gas} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของโปรตีนซีโรสที่ออกจากระบบ (Nm³/hr)

HV_{fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

FCR_{fuel} คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/s)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ดัง Figure 1 มีหน้าที่หลักในการควบคุมค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันภายในเตาให้มีค่าตามที่ตั้งค่าไว้ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตา แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วยโมดูลรับค่าเทอร์โมคัปเปิล ส่งข้อมูลอุณหภูมิไปประมวลผลที่เครื่องควบคุม PLC โดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมการทำงานของโบลเวอร์ให้ป้อนอากาศเข้าสู่เตาด้วยการสั่งงานอินเวอร์เตอร์ผ่านพอร์ต RS-485 อีกส่วนหนึ่งเป็นระบบป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติ และใช้เซนเซอร์วัดค่าน้ำหนักไหลดเซลล์แบบ Shear Beam ขนาด 500 kg จำนวน 4 ตัว ต่อเข้ากับรวมสัญญาณ ทำการอ่านค่าน้ำหนักทั้งหมดด้วยตัวแสดงผลค่าน้ำหนักและคำนวณค่าน้ำหนักของเชื้อเพลิงคงเหลือในเตา ส่งข้อมูลค่าน้ำหนักไปยังเครื่องควบคุม PLC ผ่านพอร์ต RS-485 เพื่อประมวลผลควบคุมการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงด้วยการ

สั่งงานเปิดปิดแมกเนติกตามเงื่อนไขค่าน้ำหนักที่ตั้งค่าไว้
จอแสดงผลระบบสัมผัส HMI ทำงานร่วมกับเครื่องควบคุม PLC ทำให้ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ V-Hearth สามารถตั้งค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชัน ค่าน้ำหนักเชื้อเพลิง สามารถดูสถานะการทำงานของเตาในขณะปัจจุบัน ได้แก่ ค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันและโซนไพโรไลซิส ค่าน้ำหนักเชื้อเพลิง การทำงานของโบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง สามารถควบคุม

การทำงานของโบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งแบบ
แมนนวลและแบบอัตโนมัติ สามารถดูค่าที่บันทึกไว้ย้อนหลัง ได้แก่ ค่าวันที่และเวลา ค่าเวลาทำงานของชุดป้อนเชื้อเพลิง ค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงคงเหลือ ค่าอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิไฟเออร์ และค่าอุณหภูมิภายในโซนไพโรไลซิสของเตาแก๊สซิไฟเออร์ได้

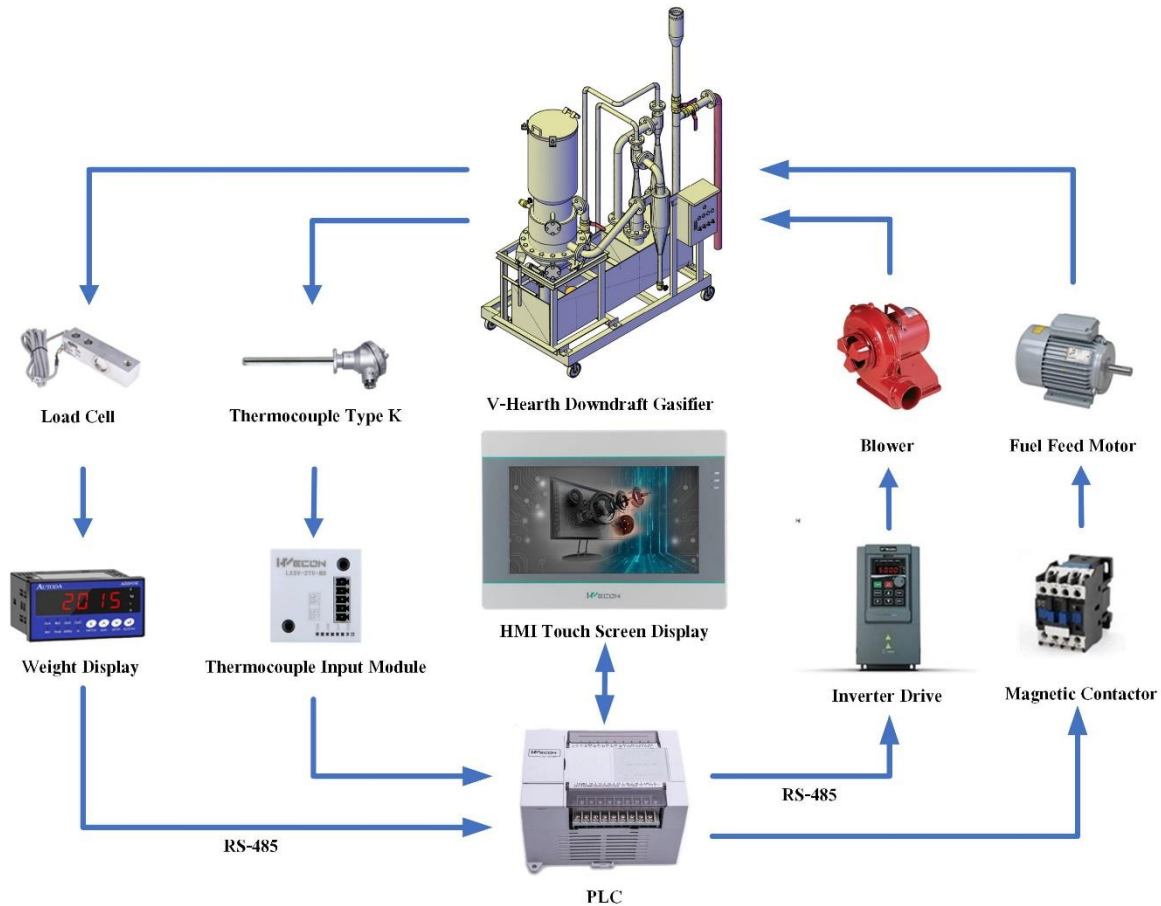


Figure 1 Overview of the automatic control system for the V-Hearth gasifier

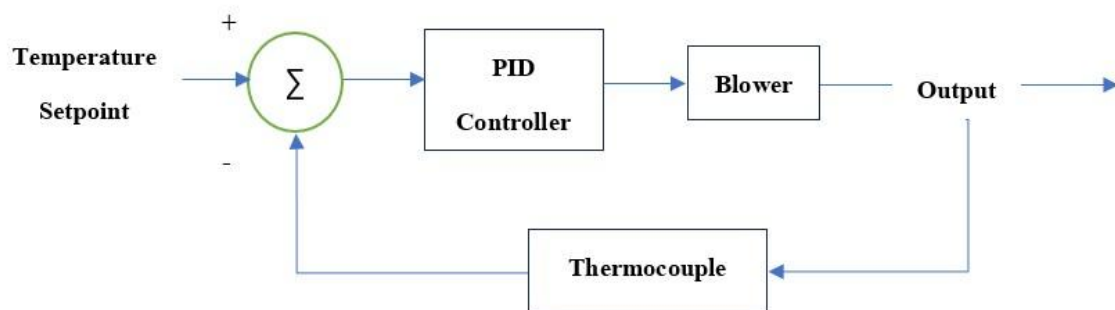


Figure 2 Temperature control system inside the V-Hearth gasifier

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟเอร์แบบ V-Hearth มีการออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา ดัง Figure 2 เป็นการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ โดยเริ่มจากการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (Setpoint) ระบบจะคำนวณหาค่าความผิดพลาดหรือผลต่างของค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้กับค่าอุณหภูมิปัจจุบันของเตาที่วัดได้จากเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิ้ล และนำไปประมวลผลด้วยตัวควบคุม PID เพื่อหาค่าเอาต์พุตไปสั่งงานอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ขับโบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตา หากอุณหภูมิปัจจุบันของเตามีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ค่าผิดพลาดจะมีค่าเป็นบวก ตัวควบคุม PID จะส่งค่าเอาต์พุตให้มากขึ้น ทำให้โบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตามากขึ้น การเผาไหม้ภายในเตาจะมากขึ้น แปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในเตา แต่ถ้าอุณหภูมิภายในเตาเข้าใกล้หรือสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ตัวควบคุม PID จะลดปริมาณเอาต์พุตลง ทำให้โบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตาน้อยลง

รูปแบบนี้ไปเรื่อย ๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่ตั้งไว้

3.2 การสร้างและติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีพี
เฮอร์แบบ V-Hearth ที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

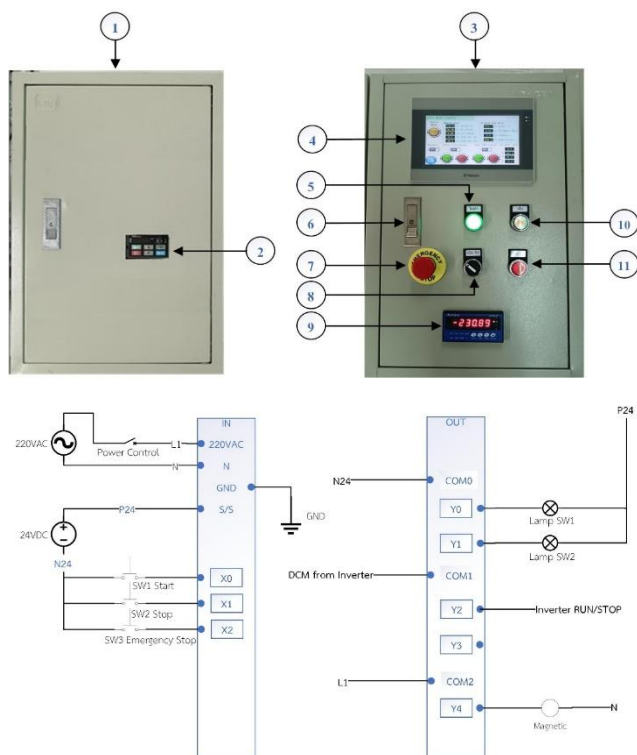


Figure 3 Components and circuits of the automatic control cabinet for the V-Hearth gasifier

รายละเอียดส่วนประกอบภายนอกตู้ระบบควบคุม
อัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ตามFigure 3
ได้แก่

1. ตั๋วควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า
2. หน้าจอของอินเวอร์เตอร์ควบคุมโวลเวอร์

3. ตูร์ระบบควบคุมอัตโนมัติ
4. หน้าจอแสดงผลระบบ HMI
5. หลอดไฟแสดงสถานะไฟเข้า
6. กุญแจเปิดบานหน้าต่าง
7. สวิตช์หยุดการทำงานฉุกเฉิน
8. สวิตช์เปิด-ปิดไฟเข้าตูร์ระบบควบคุมอัตโนมัติ
9. หน้าจอตัวแสดงค่าน้ำหนักเชื้อเพลิง
10. สวิตช์เริ่มต้นการทำงานและหลอดไฟแสดงผล
11. สวิตช์หยุดการทำงานและหลอดไฟแสดงผล

การทำงานของโปรแกรมระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟเอร์แบบ V-Hearth แบ่งออกเป็น 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดแบบแมนนวล (Manual) และโหมดแบบอัตโนมัติ (Auto)



Figure 4 Operation screen in Manual mode

การทำงานในโหมด Manual ดัง Figure 4 ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการทำงานได้เอง ในส่วนของการควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้ดูในกรอบของ MOTOR FEED โดยให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเปิดมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เตาจะทำให้ตัวเลขค่าน้ำหนัก PV. WEIGHT KG เพิ่มขึ้น เมื่อหยุดป้อนเชื้อเพลิงให้กดที่ปุ่ม STOP มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงจะหยุดทำงาน ส่วนการควบคุมความเร็วของโบลเวอร์ป้อนอากาศให้ดูในกรอบของ BLOWER VFD HEAT ให้รอกค่าความเร็วของโบลเวอร์ที่ต้องการในช่อง SET SPEED ตั้งค่าได้ 0 – 50 จากนั้นให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเปิดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมโบลเวอร์ สามารถดูค่าความเร็วของโบลเวอร์ได้ที่ช่อง PV INVERTER SPEED และดูค่ากระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในช่อง PV INVERTER AMP เมื่อต้องการปิดการทำงานของอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์ให้กดที่ปุ่ม STOP ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนโหมดการควบคุมเป็นโหมด AUTO ได้โดยการกดปุ่ม SELECT MODE



Figure 5 Operation screen in AUTO mode

การทำงานในโหมด AUTO ดัง Figure 5 ระบบจะควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงและโบลเวอร์เองอัตโนมัติตามค่าที่ได้ตั้งไว้ในการตั้งค่าการควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้ดูที่กรอบของ MOTOR FEED โดยให้กรอกค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงขั้นสูงสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขให้มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงหยุดการทำงาน ในช่อง SV HI WEIGHT ให้กรอกค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงขั้นต่ำสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขให้มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงเปิดการทำงาน ในช่อง SV LOW WIEGHT ให้กรอกค่าเวลาสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขจำกัดเวลาที่มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงสามารถเปิดการทำงานแต่ละครั้งได้นานเท่าไร ในช่อง SV TIME OFF (SEC) เมื่อตั้งค่าการควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้ว ให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเริ่มต้นการทำงาน ในขณะที่ระบบทำงานแบบอัตโนมัติ ผู้ใช้งานสามารถดูค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงคงเหลือปัจจุบันได้ในช่อง PV WEIGHT KG และดูการนับเวลาการเปิดการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงแต่ละครั้งได้ที่ช่อง PV TIME OFF (SEC) สามารถดูสถานะการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ที่ช่อง MAGNETIC เมื่อต้องการหยุดการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้กดที่ปุ่ม STOP

ส่วนการตั้งค่าการควบคุมโบลเวอร์ให้ระบุที่กรอบ BLOWER VFD HEAT โดยกรอกตัวเลขค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันภายในเตาที่ต้องการ ในช่อง SV TEMP SETTING จากนั้นให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเริ่มต้นการทำงานของอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์แบบอัตโนมัติ สามารถดูค่าความเร็วของโบลเวอร์ได้ที่ช่อง PV INVERTER SPEED ดูค่ากระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ใช้ ในช่อง PV CURRENT A และสามารถดูค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันในปัจจุบันได้ในช่อง PV TEMP1 C หากอุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ระบบจะควบคุมอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์ให้ป้อนอากาศเข้าสู่เตามากขึ้น หากอุณหภูมิเข้าใกล้หรือถึงค่าที่ตั้งไว้ ระบบจะควบคุมอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์ให้ป้อนอากาศเข้าสู่เตาน้อยลง โดยอาศัย

โปรแกรมควบคุมแบบ PID ซึ่งโปรแกรมจะปรับจูนค่าพารามิเตอร์ PI และ D ที่เหมาะสมแบบอัตโนมัติ และแสดงค่าพารามิเตอร์บนหน้าจอ เมื่อต้องการหยุดการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้กดที่ปุ่ม STOP

3.3 การติดตั้งตู้ควบคุมของระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth

ในการติดตั้งตู้ควบคุมอัตโนมัติเข้ากับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ดัง Figure 6 เริ่มจากการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลโซนรีดักชัน และเทอร์โมคัปเปิ้ลโซนไฟโรไลซิส เข้ากับโมดูลอ่านค่าอุณหภูมิ CH1 และ CH2 ตามลำดับ จากนั้นเชื่อมต่อสายสัญญาณจากกล่องรวมสัญญาณโหลดเซลล์ เข้ากับตัวแสดงผลค่าน้ำหนัก ภายในตู้ระบบควบคุมอัตโนมัติ ในส่วนภาคเอาต์พุต ให้ทำการต่อสายไฟของโบลเวอร์เข้ากับเครื่องอินเวอร์เตอร์ ทำการต่อสายไฟของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงเข้ากับแมกเนติกคอนแทคเตอร์ ต่อสายไฟปั๊มน้ำ และต่อสายไฟเมนเข้าตู้ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยทำการต่อสายไฟเข้ากับคอนเน็คเตอร์ที่กำหนดให้ถูกต้อง



Figure 6 Installation of automatic control cabinet to V-Hearth gasifier

เมื่อเชื่อมต่อสายสัญญาณและสายไฟต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เบรกเกอร์ปั๊มน้ำ เบรกเกอร์ตู้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ เบรกเกอร์มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง และเบรกเกอร์เครื่องอินเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ทั้งหมดของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth หลังจากนั้น ให้ทำการตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ได้แก่ การอ่านค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงคงเหลือ และการอ่านค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล เลือกโหมดควบคุมแบบ Manual แล้วทำการทดลองควบคุมโบลเวอร์ที่ความเร็วต่าง ๆ และการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง หากพบข้อผิดพลาดให้ดำเนินการหาสาเหตุและแก้ไขให้เป็นปกติก่อน แล้วจึงเริ่มต้นการทดลอง

ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟเอร์แบบ V-Hearth ที่ใช้กากเปลือกมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาระบบที่ใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เครื่องควบคุม PLC เป็นตัวควบคุมหลัก แตกต่างจากระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปลา ของ Khlaichom *et al.* (2018) ที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผลหลัก ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ในการรับค่าจากเซนเซอร์และส่งค่าไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก และระบบเตาเผาถ่านชีวมวลควบคุมระบบด้วยอินเทอร์เนตของสรรพสิ่ง ของ Homsri *et al.* (2023) ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวควบคุมหลักและเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เนตของสรรพสิ่ง จะเห็นได้ว่าทั้ง PLC และไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถใช้งานควบคุมอุปกรณ์และควบคุมกระบวนการได้ โดยมีความแตกต่างกันที่ PLC ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม เขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษา Ladder มีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพสูงในสภาพแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรม ในขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นแพลตฟอร์ม Open Source ออกแบบมาสำหรับนักพัฒนาระบบ เขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาซี และภาษาไพธอน ใช้งานได้ง่าย มีแหล่งข้อมูลออนไลน์มากมาย มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถเชื่อมต่อสื่อสารต่างๆ ได้ง่าย และมีราคาถูก (Polaridad, 2024) ดังนั้น การเลือกใช้งาน PLC หรือไมโครคอนโทรลเลอร์จึงขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมของแต่ละงาน สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัว

ควบคุม PLC เนื่องจากระบบที่มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือสูง ในสภาพแวดล้อมการทำงานภายนอกอาคาร มีอุณหภูมิและความชื้นสูง มีสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กของมอเตอร์มาก แต่มีเงื่อนไขในการควบคุมไม่ซับซ้อนมาก

3.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตาแก๊สซีฟเอร์

การทดลองควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตาแก๊สซีฟเอร์ด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี กำหนดค่าอัตราการควบคุม Kp Ku และ Kd เท่ากับ 283.5 61.5 และ 16.4 ตามลำดับ เริ่มต้นการทำงานในโหมดแบบอัตโนมัติเมื่อโซนรีดักชันมีอุณหภูมิถึง 515 °C จึงตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการเป็น 615 °C เป็นเวลา 60 นาที แล้วให้เปลี่ยนอุณหภูมิที่ต้องการเป็น 715 °C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการให้สูงขึ้นจาก 515 °C เป็น 615 °C และ จาก 615 °C เป็น 715 °C มีค่าช่วงเวลาขึ้น (Rise time) 43 นาที และ 18 นาที ตามลำดับ ไม่มีโอเวอร์ชูต (Overshoot) มีค่าผิดพลาดสถานะคงตัว (Steady – state error) เล็กน้อย มีเสถียรภาพดี ตาม Figure 7

ค่าอุณหภูมิโซนรีดักชันที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ต่ำกว่าค่าตามทฤษฎี เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ห่างจากช่องอากาศเข้าของโซนเผาไหม้ถึง 275 mm. ทำให้วัดอุณหภูมิได้ค่าต่ำลงไป สอดคล้องกับผลการทดลองของ Hirunprasertsri and Butdee (2014) ที่ศึกษาสภาวะเหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบโดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 227 °C – 896 °C

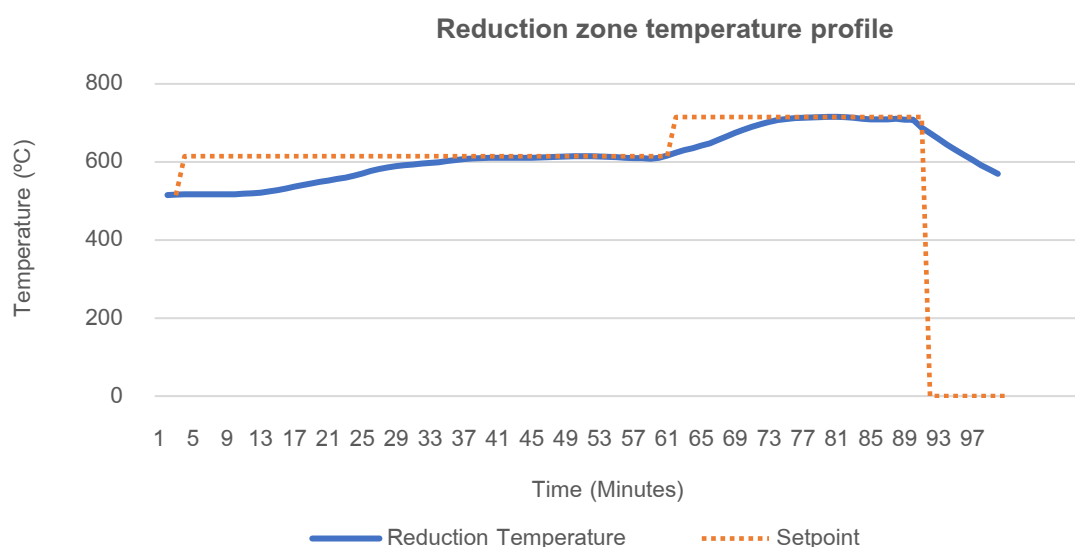


Figure 7 Reduction zone temperatures profile

Table 1 The composition of the producer gas is regulated by controlling the temperature in the reduction zone of the V-Hearth gasifier with an automatic control system, using cashew nut shell waste as fuel

The composition of the producer	Proportion of gas (%)			
	Temperature ^{1/}	Temperature ^{1/}	Temperature ^{1/}	No control system ^{2/}
	515 °C	620 °C	715 °C	
Methane (CH ₄)	0.8	0.9	0.4	1.5
Carbon Monoxide (CO)	21.0	15.8	14.4	16
Carbon dioxide (CO ₂)	9.8	13.4	13.5	10
Oxygen (O ₂)	0.9	1.1	1.0	4.7
Nitrogen (N ₂)	54.0	57.0	61.1	61
Hydrogen (H ₂)	13.5	11.8	9.6	9.7

^{1/} The composition of the producer gas is regulated by controlling the temperature in the reduction zone of the V-Hearth gasifier with the automatic control system

^{2/} The composition of producer gas is generated from V-Hearth gasifier without the automatic temperature control system (Khlaichom, 2021)

3.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโปรดิวเซอร์แก๊สจากห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C เพื่อทำการศึกษาร้อยละขององค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการคำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส ผู้วิจัยจึงได้เก็บตัวอย่างโปรดิวเซอร์แก๊ส และส่งตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ซึ่งองค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สประกอบด้วยมีเทน (CH₄) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกซิเจน (O₂) ไนโตรเจน (N₂) และไฮโดรเจน (H₂) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโปรดิวเซอร์แก๊ส แสดงดัง Table 1 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัดส่วนของ H₂ จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาน้ำแปลงแก๊ส (Water gas reaction) ลดลง และสัดส่วนของ CH₄ มีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาแปลงมีเทน (Methanation) มักเกิดขึ้นในอุณหภูมิที่ต่ำ และมีเทนจะแตกตัวเป็น CO และ H₂ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกับสัดส่วนของ CO จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกินค่าที่เหมาะสม เนื่องจากปฏิกิริยาบูดัวร์ด (Boudouard) เกิดขึ้นได้น้อยลง ส่งผลให้ CO₂ เพิ่มมากขึ้น

3.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อน ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ

จากการควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C เมื่อแทนค่าสัดส่วนของแก๊สติดไฟที่เกิดตาม Table 1 ในสมการที่ 5 แล้ว สามารถคำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้เท่ากับ 4.39 3.59 และ 3.00 MJ/Nm³ ตามลำดับ

ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีอัตราการไหลของแก๊ส (Q_{gas}) เท่ากับ 26.79 m³/h มีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (FCR_{fuel}) เท่ากับ 11.4 kg/h และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่าความร้อน 21.22 MJ/kg (Khlaichom *et al.*, 2020) สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน (η_{th}) จากการควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C ตามสมการที่ 6 ได้ค่าดัง Table 2 สังเกตได้ว่าการตั้งค่าให้อุณหภูมิของโซนรีดักชันสูงขึ้น จะทำให้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสั่งงานให้โบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตามากขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น CO₂ จึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ CH₄ CO และ H₂ ลดลง ทำให้ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สและค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันลดต่ำลงไปด้วย

Table 2 Efficiency values of the gasification system with temperature control in the reduction zone by the automatic control system

Temperature in reduction zone	The heating value of producer gas (MJ/Nm ³)	Efficiency of gasification system (%)
515 °C ^{1/}	4.39	48.68
615 °C ^{1/}	3.59	39.81
715 °C ^{1/}	3.00	33.27
No control System ^{2/}	3.60	39.92

^{1/} Efficiency values of the gasification system with automatic control system^{2/} Efficiency values of the gasification system without automatic control system (Khlaichom, 2021)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ และใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง จากการทดลองควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันที่ระดับ 515 °C 615 °C และ 715 °C พบว่าที่ระดับอุณหภูมิ 515 °C มีค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สมากที่สุดเท่ากับ 4.39 MJ/Nm³ มีค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันสูงสุดเท่ากับ 48.68 % มีค่ามากกว่าโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันเดิมที่ไม่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ (Khlaichom *et al.*, 2018) ซึ่งมีค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส เท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ มีค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันเท่ากับ 39.92 % เนื่องจากระบบควบคุมแบบอัตโนมัติช่วยให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สที่ค่าความร้อนสูง โดยสามารถลดปริมาณ O₂ ลงได้อย่างชัดเจน และเพิ่มเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นว่าระบบแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ที่ตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาแก๊สซิฟิเคชันบริเวณโซนรีดักชันให้มีค่าเท่ากับ 515 °C ทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 21.94 % โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง ของ Samutjak and Jakrawatana (2016) เท่ากับ 54 % และประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง ของ Sabpayasan *et al.* (2018) เท่ากับ 50.49 %

4. สรุป

ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบ V-Hearth ที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันภายในเตาให้มีค่าตามที่ตั้งค่าไว้ โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตา ประมวลผลด้วยเครื่องควบคุม PLC โดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบพีไอดี เพื่อควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาด้วยการควบคุมความเร็วของโบลเวอร์ โดยมีจอแสดงผลระบบสัมผัส HMI ทำงานร่วมกับเครื่องควบคุม PLC สามารถควบคุมการทำงานของโบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งแบบ Manual และ Auto จากการทดลองควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C

คำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สได้เท่ากับ 4.39 3.59 และ 3.00 MJ/Nm³ ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันจากการควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ ได้เท่ากับ 48.68 % 39.81 % และ 33.27 % ตามลำดับ การใช้โปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเตาแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงทดแทน LPG ในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์อย่างเต็มศักยภาพ จะมีระยะเวลาคืนทุน (PB) 2.6 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 302,594 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 37 % อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) 2.5 จะทำให้การลงทุนสร้างเตาแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ มีความคุ้มค่าต่อการลงทุน และมีอัตราผลตอบแทนสูง นอกจากนี้ยังเกิดรูปแบบการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบใหม่ที่ก่อให้เกิดรายรับและลดต้นทุนค่าพลังงาน คิดเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 801,280 บาท/ปี เพิ่มขึ้นจากการจัดการในรูปแบบเดิม 551,280 บาท/ปี และสามารถนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ ไปประยุกต์ใช้งานในสถานประกอบการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรและมีวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเตาแก๊สซิฟิเคชันได้ หรือนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมเตาเผาชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น เตาเผาชีวมวลแบบเผาตรง เตาถลุงโลหะ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานีที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณนางวันทนา ผ่านคำ ประธานกลุ่มวิสาหกิจชุมชนส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไเก้ต้อย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบเตาแก๊สซิฟิเคชัน ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่สนับสนุนงานวิจัยอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนาม ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Basu, P. 2010. **Gasification theory and modeling of gasifiers**. Available Source: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00005-2>, May 5, 2010. (in Thai)
- Department of Agriculture Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2019. **Cashew Nut**. Available Source: <http://production.doae.go.th/>, April 22, 2024. (in Thai)
- Division of Agricultural Chemistry, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 1991. **Cashew Nut**. Agricultur Co-Operative Federation of Thailand Printing Company Limited, Nonthaburi. (in Thai)
- Food and Agriculture Organization of The United Nations. 1986. **Wood Gas as Engine Fuel**. Mechanical Wood Products Branch Forest Industries Division FAO Forestry Department, Rome Italy.
- Hirunprasertsri, S. and Butdee, S. 2014. Experimental Study to Obtain Gas Production Conditions from the Old Landfill Solid Waste by using Gasification Process. **SWU Engineering Journal** 9(1): 16-27. (in Thai)
- Homsri, P., Jitchak, K. and Sitanon, J. 2023. A development of biomass charcoal kiln system control by internet of things. **Kasem Bundit Engineering Journal** 13(2): 42-62. (in Thai)
- Homdoug, N., Dussadee, N. and Sasujit, K. 2010. Testing and Performance Analysis of Gasifier System for Grain Drying, pp.103-108. In **The 8th Thailand Renewable Energy for Community Conference**. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Khlaichom, P. 2021. Gasification Technology for Cashew Nut Shell Residue Management. Doctor of Philosophy Program, Uttaradit Rajabhat University. (in Thai)
- Khlaichom, P., Phromfaiy, A. and Nathiang, P. 2018. Efficiency Improvement of Cupola Namphi Iron Ore Furnace by Using Automatic Control system. **UTK Journal** 12(2): 49-59. (in Thai)
- Khlaichom, P., Tangjuank, S. and Pinyaphong, P. 2020. Design and efficiency of downdraft gasifier using waste from processing of cashew nut as fuel. **Journal of Energy and Environment Technology** 7(1): 75-86. (in Thai)
- Kiatsunthorn, S. 2015. **Industrial automation PLCs and industrial automation systems**. SE-ED Education Public Company Limited, Bangkok. (in Thai)
- Phankam, W. 2022. **Management Model for Cashew Nut Shell Waste from the Processing Process**. Ban Hat Kai Toi Career Promotion Group, Uttaradit. (in Thai)
- Polaridad. 2024. **What is the difference between PLC and Arduino?**. Available Source: <https://www.polaridad.es/th/que-diferencia-hay-entre-un-plc-y-un-arduino/>, March 20, 2024. (in Thai)
- Sabpayasan, P., Thongbunchoo, J., Rukruang, A., Chaichana, T., Kongsune., P. and Kaew-On, J. 2018. Analysis of producer gas form downdraft gasifier by using coconut shell as fuel. **Thaksin University Journal** 21(2): 61-68. (in Thai)
- Samutjak, S. and Jakrawatana, N. 2016. Efficiency analysis of electricity production from biomass waste using downdraft gasifier. **Thai Environmental Engineering Journal** 30(3): 37-46. (in Thai)
- Sangmanee, P. 2021. Characteristics of Biochar Derived from Cashew Nut Shell and Potential for Acid Soil Amelioration. **Journal of Agriculture** 37(1): 39-49. (in Thai)
- Unsomsri, N. 2022. Development of small ceramic kiln employing syngas provided by biomass cross draft gasifier. Master of engineering (Mechanical Engineering), Srinakharinwirot University. (in Thai)

Research Article

การเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติก และแผ่นไม้ไผ่สานภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ

Deterioration of Sandwich Composites between Plastics and Woven Bamboo Plates under Natural Weathering

ชาตรี หอมเขียว ^{a,b*} ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร ^a วรณพชร ชีววุฒิพงศ์ ^{a,b} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ^{a,b}
และ ธีรพงษ์ เหลี่ยมขุน ^a

Chatree Homkhiew ^{a,b*}, Chainarong Srivabut ^a, Watthanaphon Cheewawuttipong ^{a,b}, Surasit Rawangwong ^{a,b}
and Teerapong Lemkhun ^a

^a สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

^a Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

^b หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

^b Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-07-21

Revised: 2023-10-05

Accepted: 2023-10-16

Keywords:

wood-plastic composites;

polymer;

compression molding;

mechanical property;

analysis of variance

The objective of this research was to analyze the effects of plastic types (polystyrene, polypropylene, and polylactic acid) and woven bamboo patterns (weave pattern and marble pattern) on the mechanical and physical properties of sandwich composites made from plastic and woven bamboo plates, subjected to natural weathering for 6 months. In manufacturing the sandwich composites, the sample panels were compressed using a compression molding machine. From the results of experiment, analysis of variance (ANOVA) indicated that the plastic types significantly ($p < 0.05$) affected modulus of rupture, tensile strength, shear strength, and puncture force, while with the same plastic type and woven bamboo pattern the 2-sample t -test revealed that the sandwich composites showed a significant decrease in mechanical properties ($p < 0.05$). Further, after being subjected to natural weathering for 6 months, the sandwich composites made from polypropylene showed the highest mechanical properties (7.22-16.1 MPa) and those made from polylactic acid exhibited the lowest mechanical properties (2.1-9.1 MPa). The sandwich composites made from plastic and bamboo plates with a weave pattern had significantly higher mechanical properties than those with a marble pattern, both before and after exposure to natural weathering. Finally, considering physical changes, it was revealed that the sandwich composites made from plastic and woven bamboo plates exhibited less surface roughness and fewer cracks than 100% pure plastic after exposure to natural weathering.

© 2025 Homkhiew, C., Srivabut, C., Cheewawuttipong, W., Rawangwong, S. and Lemkhun, T. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: chatree.h@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Homkhiew, C., Srivabut, C., Cheewawuttipong, W., Rawangwong, S. and Lemkhun, T. 2025. Deterioration of Sandwich Composites between Plastics and Woven Bamboo Plates under Natural Weathering. *Recent Science and Technology* 17(3): 259829.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบชนิดพลาสติก (พอลิไทรีน พอลิโพรพิลีน และพอลิแลกติกแอซิด) และลวดลายสานไม้ไผ่สาน (ลายสาน และลายลูกแก้ว) ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบแกนวิหะระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบแกนวิหะระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานเป็นแผ่นขึ้นงานตัวอย่างดำเนินการโดยใช้เครื่องอัดร้อน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่า ชนิดพลาสติกมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงเฉือน และค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุ ขณะเดียวกันค่ากลางของสองประชากรอิสระ (2-sample t -test) แสดงให้เห็นด้วยว่าที่ชนิดพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายเดียวกัน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหะมีสมบัติทางกลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้พบว่า หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหะที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีนมีสมบัติทางกลสูงที่สุด (7.22-16.1 MPa) และวัสดุเชิงประกอบแกนวิหะที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแลกติกแอซิด มีสมบัติทางกลน้อยที่สุด (2.1-9.1 MPa) ขณะเดียวกัน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหะระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหะระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้วอย่างเห็นได้ชัด ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหะระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีความขรุขระและรอยแตกร้าวน้อยกว่าพลาสติก 100% (Pure plastic) หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, พอลิเมอร์, การอัดร้อน, สมบัติทางกล, การวิเคราะห์ความแปรปรวน

1. บทนำ

ในหลายปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน วัสดุเชิงประกอบพลาสติกเป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความนิยมในหลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น การบินและอวกาศ รถยนต์ เรือ และการก่อสร้าง เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกมีสมบัติที่ดีและโดดเด่นหลายประการ เช่น ความหนาแน่นต่ำ ทนทานต่อการเสียดสี ความแข็งแรงจำเพาะ และ modulus ที่สูง (Cheewawuttipong *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบพลาสติกมักจะสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นหากมีการใช้วัสดุเสริมแรงจำพวกเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) ทำให้ผู้บริโภคเริ่มตระหนักกับปัญหานี้ (Wang and Young, 2022) ดังนั้นวัสดุเสริมแรงจำพวกเส้นใยธรรมชาติจะเข้ามาแทนที่เส้นใยดังกล่าวในการพัฒนาเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยธรรมชาติ

ในการปรับปรุงสมรรถนะของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยธรรมชาติ นอกจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบแล้ว การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบเนื้อเดียวเป็นโครงสร้างแบบแซนวิช หรือวัสดุแซนวิช (Sandwich-structured) ที่ประกอบด้วยแผ่นประกบ (Face-sheet) ด้านบนและด้านล่างมีความบางแต่แข็งแรงสูง และแกนกลาง (Core) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของวัสดุแซนวิช ทำมาจากวัสดุอ่อนมีจุดเด่นคือ น้ำหนักน้อย มีความคงรูป และรับแรงได้ดี (Promjan *et al.*, 2022; Nasirzadeh and Sabet, 2014; Vitale *et al.*, 2017; Jaturonlux and Ratanawilai, 2023) เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจและกำลังได้รับความนิยม โดย Promjan *et al.* (2022) ได้พัฒนาวัสดุแซนวิชจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ยางพาราที่มีแกนกลางจากพลาสติก และพบว่า แผ่นวัสดุแซนวิชมีความสามารถในการรับแรงดัด และแรงกระแทกได้ดีขึ้นถึง 63% และ 68% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบ

ชั้นเดียว Wang and Young (2022) ได้ศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยไม้ไผ่ทอ ซึ่งพบว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่เส้นใยไผ่ผ่านปรับปรุงผิวด้วยต่างมีความต้านทานแรงดึงที่ดีกว่าเส้นใยไม้ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว Hao *et al.* (2018) ได้พัฒนาวัสดุเชิงประกอบแซนวิชพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ที่มีแกนกลางเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง โดยพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีโครงสร้างเป็นแซนวิช สามารถปรับปรุงความแข็งแรงดัดและความแข็งแรงกระแทกได้ 42% และ 77% ตามลำดับ ขณะเดียวกัน Hao *et al.* (2019) ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณผงไม้ต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ ซึ่งพบว่า ค่าความแข็งแรงและค่า modulus การดัดเพิ่มขึ้น เมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสมในแผ่นประกบของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชมากขึ้น ผลจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบแซนวิชจะมีทั้งการนำพลาสติกล้วน วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ และเส้นใยธรรมชาติดังเช่นไม้ไผ่มาใช้เป็นวัสดุแกนกลาง ซึ่งไม้ไผ่เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุแกนกลางเนื่องจากมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบแซนวิชโดยใช้ไม้ไผ่เป็นวัสดุแกนกลาง

ไม้อยู่ในตระกูล Poaceae (เดิมคือ Gramineae) ในปัจจุบันพบอยู่ 47 สกุล แยกเป็น 1,250 ชนิด สำหรับประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อน ทำให้ไม้ไผ่เจริญเติบโตได้ดี (Phungchik *et al.*, 2013) ไม้มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในการสร้างความมั่นคงให้แก่ประเทศมากที่สุดชนิดหนึ่ง เพราะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ได้แก่ หน่อไม้ใช้เป็นอาหาร ลำไผ่ใช้สร้างที่พักอาศัย เครื่องใช้สอยในครัวเรือน และเครื่องมือจับสัตว์น้ำหลายชนิด เป็นต้น บทบาทสำคัญของไม้คือการเป็นอาหารและการใช้ในการอุตสาหกรรมกระดาษ (Phungchik *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2022;

Muhammad *et al.*, 2019) นอกจากนี้ ไม้ไผ่ยังได้รับการยกย่องอย่างกว้างขวางว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพน้ำหนักเบา ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่ววัสดุโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก และอลูมิเนียม โดยธรรมชาติแล้ว ไม้ไผ่สามารถรับน้ำหนักได้มาก เช่น แรงโน้มถ่วง (แรงคงที่) แรงลม (แรงแบบไดนามิก) และอื่น ๆ อีกทั้งมีโครงสร้างน้ำหนักเบาของวัสดุเชิงประกอบช่วยรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างที่ติของไม้ไผ่ และปรับปรุงสมบัติแรงดึง แรงอัด การโค้งงอ และแรงเฉือนของไม้ไผ่ (Sun *et al.*, 2022) ดังนั้น การใส่ไม้ไผ่จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นในอนาคต (Phungchik *et al.*, 2013; Phuangchik, 2013; Huang *et al.*, 2019; Nkeuwa *et al.*, 2022)

จากข้อมูลข้างต้น การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติยังมีความจำเป็นต่อไป เพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่สามารถตอบสนองการประยุกต์ใช้งานของมนุษย์ที่มีความซับซ้อนและหลากหลายมากขึ้น และต้องเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานจึงมีความน่าสนใจ เนื่องจากไม้ไผ่เป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพเชิงปริมาณของประเทศไทย และเพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่มีสมรรถนะสูง จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาผลกระทบชนิดพลาสติกและลวดลายสานไม้ไผ่สานต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน อีกทั้งในการประยุกต์ใช้งานวัสดุเชิงประกอบแซนวิชมักอยู่ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ เช่น วัสดุก่อสร้าง วัสดุโครงสร้างอาคาร และวัสดุตกแต่งนอกอาคาร เป็นต้น การศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งวิธีการดำเนินการวิจัยได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ วัสดุที่ใช้ในการวิจัย การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน และการวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย 1) พลาสติกพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) เกรด GP150 จัดซื้อมาจาก บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) 2) พลาสติกพอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) เกรด 486N จัดซื้อมาจากบริษัท HMC Polymer จำกัด 3) พลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรด 4043D จัดซื้อมาจากบริษัท บีซี โพลีเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด และ 4) แผ่นไม้ไผ่สานลายสาน (Weave pattern) ดังแสดงในภาพที่ 1(a) และแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว (Marble pattern) ดังแสดงในภาพที่ 1(b) จัดซื้อจากกลุ่มฝาสานไม้ไผ่บ้านค่ายรวมมิตร ตำบลทุ่งนุ้ย อำเภอกวนกาหลง จังหวัดสตูล ซึ่งทั้ง 2 ลายนี้ เป็นลาย

สานที่ความซับซ้อนแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดและเป็นลายสานที่ได้รับความนิยม ดังนั้น จึงเลือก 2 ลายสานนี้ในการศึกษาวิจัย โดยไม้ไผ่ที่นำมาสานมีขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม ก่อนการนำแผ่นไม้ไผ่สานไปขึ้นรูป แผ่นไม้ไผ่สานได้รับการอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

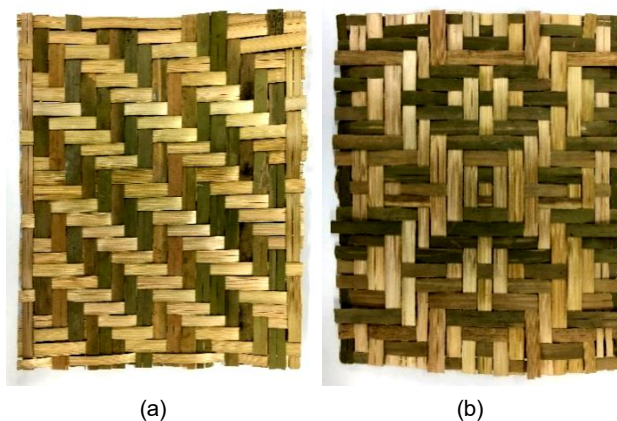


Figure 1 Weaving bamboo plates (a) weave pattern and (b) marble pattern.

2.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน

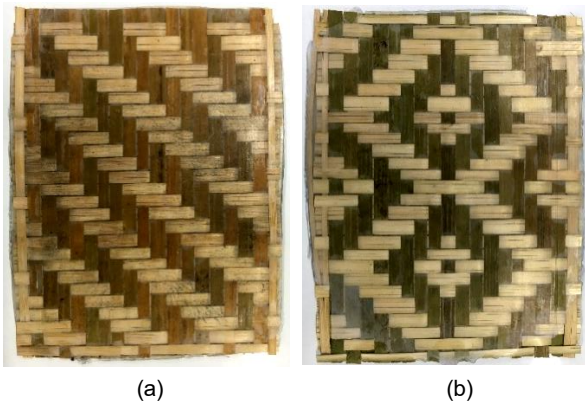
การขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานตัวอย่างจากวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีรายละเอียดดังนี้

1) นำเม็ดพลาสติกพอลิสไตรีน หรือพอลิโพรพิลีน หรือพอลิแลคติกแอซิด ขึ้นรูปเป็นแผ่นที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร กว้าง 200 มิลลิเมตร และยาว 250 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นแผ่นประกบ โดยใช้เครื่องอัดร้อนและมีการควบคุมอุณหภูมิการอัดร้อน 190 องศาเซลเซียส และแรงดันอัด 2,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 10 นาที

2) นำแผ่นพลาสติกประกบแผ่นที่ 1 วางในแม่พิมพ์ จากนั้นใส่แผ่นไม้ไผ่สานเป็นไส้กลางในแม่พิมพ์ หลังจากนั้นวางแผ่นพลาสติกประกบแผ่นที่ 2 ในแม่พิมพ์ ตามสภาวะการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 1 หลังจากนั้นอัดวัสดุทั้งหมดด้วยเครื่องอัดร้อนที่มีอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และแรงดันอัด 2,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 8 นาที ซึ่งจะได้แผ่นขึ้นงานตัวอย่างจากวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน ที่มีขนาดประมาณความหนา 4 มิลลิเมตร กว้าง 200 มิลลิเมตร และยาว 250 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2

Table 1 Experimental design of sandwich composites between plastics and weaving bamboo plates.

Sample code	PS	PP	PLA	Pattern
PS	✓			-
PP		✓		-
PLA			✓	-
PSW	✓			Weave
PPW		✓		Weave
PLW			✓	Weave
PSM	✓			Marble
PPM		✓		Marble
PLM			✓	Marble

**Figure 2** Sandwich composites between plastics and weaving bamboo plates (a) weave pattern and (b) marble pattern.

3) ทำการตัดแผ่นชิ้นงานตัวอย่างด้วยเลื่อยฉลุไฟฟ้าตามตำแหน่งของแผ่นชิ้นงานตัวอย่างแต่ละแผ่น เพื่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบในแต่ละประเภท จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มาขัดตกแต่งขอบด้วยเครื่องขัดไม้ เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบมีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

2.3 การทดสอบชิ้นงานภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ

การทดสอบวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ ชิ้นงานทดสอบถูกติดตั้งเข้ากับชั้นวางที่เอียง 45 องศา และด้านหน้าของชิ้นงานหันไปทางทิศใต้ (Homkhiew *et al.*, 2022) ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งเป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D1435 โดยชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์ทั้งหมดถูกวางบนดาดฟ้าชั้น 11 อาคารศรีวิศวรวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา ประเทศไทย เป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2565 ถึง วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2565 ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน

ของภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย จากนั้น เมื่อครบระยะเวลา 0, 2, 4 และ 6 เดือน ชิ้นงานทดสอบถูกนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ

**Figure 3** Experimental set-up for sandwich composites between plastics and weaving bamboo plates under natural weathering test.

2.4 การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติ

2.4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นงาน

ตัวอย่าง

การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิววัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 6 เดือน ดำเนินการวิเคราะห์โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ รุ่น Zeiss Axioskop (Oberkochen, Germany)

2.4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลกระทบของชนิดพลาสติกต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชดำเนินการวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และการเปรียบเทียบเชิงซ้อนทุกคู่ (Tukey's multiple comparison test) ในขณะเดียวกัน การวิเคราะห์ผลกระทบของสภาพแวดล้อมธรรมชาติต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชดำเนินการโดยการทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรอิสระ (2-Sample *t*-test) ซึ่งในการวิเคราะห์ทางสถิตินี้ดำเนินการที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha=0.05$) (Homkhiew *et al.*, 2021)

2.4.3 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบการดัด เพื่อหาค่าความแข็งแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) เป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด ซึ่งปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ (รุ่น NRI-TS500-50 จาก บริษัท นรินทรอินสตรูเมนต์ จำกัด) และชิ้นงานทดสอบมีขนาด 13 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว) ระยะห่างระหว่างบารองรับชิ้นงาน (Span) มีระยะ

80 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดัด คือ 2 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบการดึง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; TS) เป็นการทดสอบดึงที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 12 มิลลิเมตร × 160 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว) ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดึง คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบการเฉือน เพื่อหาค่าความแข็งแรงเฉือน (Shear Strength; SS) เป็นการทดสอบแรงเฉือนแบบเดี่ยว (Single shear) ที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D5379 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 20 มิลลิเมตร × 76 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว) ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบแรงเฉือนคือ 2 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบการทิ่มทะลุ เพื่อหาค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุ (Puncture Force; PF) เป็นการวัดแรงต้านทานการทิ่มทะลุ ซึ่งในการทดสอบการทิ่มทะลุปฏิบัติตามมาตรฐาน ISO 3036 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ และชิ้นงานทดสอบมีขนาด 80 มิลลิเมตร × 80 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว) ในการทดสอบใช้ความเร็ว 30 มิลลิเมตรต่อนาที นอกจากนี้ การทดสอบสมบัติทางกลทั้ง 4 ประเภท ดำเนินการทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส และทดลองแบบสุ่มจำนวน 5 ชิ้นงานตัวอย่าง

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการออกแบบการทดลองมีตัวแปรอิสระคือ ชนิดพลาสติก ลวดลายแผ่นไม้ไผ่สาน และระยะเวลาการตากแดด ซึ่งสามารถออกแบบสภาวะที่ใช้ในการทดลองได้ 9 สภาวะ และค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงเฉือน และค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุ

3.1 การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชหลังอยู่ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ก่อนและหลังอยู่ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 6 เดือน แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อวัสดุเชิงประกอบแซนวิชหลังอยู่ในสภาพแวดล้อมธรรมชาตินานขึ้น พื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบมีความขรุขระและรอยแตกกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ผลกระทบจากรังสียูวีจากธรรมชาติสามารถทำลายพันธะเคมีของพลาสติก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกที่ผ่านสภาวะสภาพแวดล้อมมีขนาดสั้นลง ทำให้พลาสติกเกิดการแตกร้าวและมีลักษณะเปราะ ส่งผลให้อายุการใช้งานของพลาสติกลดลง (Ratanawilai and Taneerat, 2018; Srivabut *et al.*, 2021) ในขณะเดียวกัน ที่ระยะเวลาการอยู่ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติเท่ากัน สังเกตเห็นว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีความขรุขระมากกว่าวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิสไตรีนและพอลิโพรพิลีน เนื่องจากพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน (Saengwong-ngam *et al.*, 2020) โดยมีระยะเวลาการสลายตัวได้รวดเร็วกว่าพลาสติกพอลิสไตรีนและพอลิโพรพิลีน ดังนั้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตจากพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิดมีรอยแตกร้าวและมีการสลายตัวได้รวดเร็วกว่าพลาสติกพอลิสไตรีนและพอลิโพรพิลีนหลังผ่านสภาพแวดล้อมธรรมชาติ (Spiridon *et al.*, 2016; Gramlich *et al.*, 2006; Sangnak *et al.*, 2021) นอกจากนี้ พบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีความขรุขระและรอยแตกร้าว น้อยกว่าพลาสติก 100% (Pure plastics) หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ เนื่องจาก การยึดเกาะที่มีความแข็งแรงของพลาสติกที่เสริมแรงด้วยวัสดุแกนกลางแผ่นไม้ไผ่สาน ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Promjan *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022) เมื่อผ่านสภาวะธรรมชาติจึงมีความขรุขระและรอยแตกร้าวน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติก 100% (Pure plastics)

Table 2 Optical microscopy images of the sandwich composite surfaces at different weathering stages.

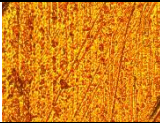
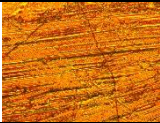
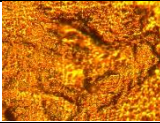
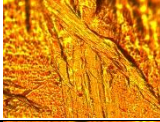
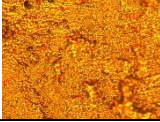
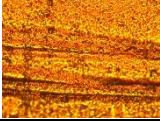
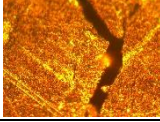
Code	Un-weathered	Weathered for 2 months	Weathered for 4 months	Weathered for 6 months
PS				
PP				
PLA				

Table 2 (Continuous)

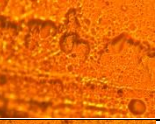
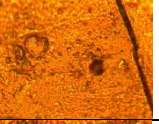
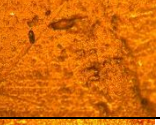
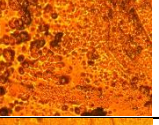
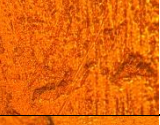
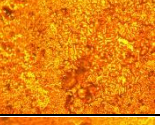
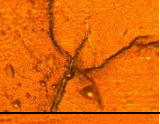
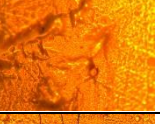
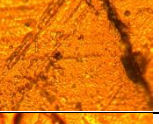
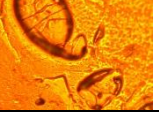
Code	Un-weathered		Weathered for 2 months		Weathered for 4 months		Weathered for 6 months
PSW							
PPW							
PLW							
PSM							
PPM							
PLM							

Table 3 Results of the statistical analysis on the effects of plastic types and exposure time on the mechanical properties of the sandwich composites.

Code	Modulus of rupture (MPa)			Tensile strength (MPa)			Shear strength (MPa)			Puncture force (N)		
	0 M	6 M	% Loss	0 M	6 M	% Loss	0 M	6 M	% Loss	0 M	6 M	% Loss
PS	38.7 ^{a A}	15.8 ^{a B}	59.2	13.3 ^{a A}	4.56 ^{ab B}	65.7	24.3 ^{a A}	6.8 ^{a B}	72.0	-	-	-
PP	49.2 ^{b A}	19.1 ^{b B}	61.2	23.5 ^{b A}	7.2 ^{a B}	69.4	35.5 ^{b A}	13.0 ^{b B}	63.4	-	-	-
PLA	72.8 ^{c A}	9.4 ^{c B}	87.1	46.7 ^{c A}	2.5 ^{b B}	94.6	49.4 ^{c A}	6.0 ^{a B}	87.9	-	-	-
<i>p</i> -value	0.000*	0.000*	-	0.000*	0.032*	-	0.000*	0.009*	-	-	-	-
PSW	30.1 ^{a A}	12.3 ^{ab B}	59.1	54.0 ^{a A}	8.90 ^{a B}	83.5	64.7 ^{a A}	15.3 ^{a B}	76.4	13.2 ^{a A}	4.2 ^{a B}	68.2
PPW	38.2 ^{b A}	15.0 ^{a B}	60.7	74.8 ^{b A}	12.16 ^{a B}	83.7	71.0 ^{b A}	16.1 ^{a B}	77.3	17.6 ^{b A}	4.6 ^{a B}	73.9
PLW	67.1 ^{c A}	9.1 ^{b B}	86.4	100.5 ^{c A}	3.51 ^{b B}	96.5	87.7 ^{c A}	7.0 ^{b B}	92.0	18.3 ^{b A}	3.4 ^{a B}	81.4
<i>p</i> -value	0.000*	0.001*	-	0.000*	0.002*	-	0.000*	0.006*	-	0.0287*	0.102	-
PSM	29.5 ^{a A}	7.7 ^{a B}	73.9	48.3 ^{a A}	5.99 ^{a B}	87.6	55.3 ^{a A}	14.3 ^{a B}	74.1	12.2 ^{a A}	3.7 ^{a B}	69.7
PPM	32.4 ^{a A}	12.6 ^{b B}	61.1	69.6 ^{b A}	7.22 ^{a B}	89.6	63.1 ^{b A}	14.4 ^{a B}	77.2	13.3 ^{ab A}	4.3 ^{a B}	67.7
PLM	49.4 ^{b A}	7.4 ^{a B}	85.0	99.8 ^{c A}	2.10 ^{b B}	97.9	82.5 ^{c A}	5.7 ^{b B}	93.1	15.1 ^{b A}	2.9 ^{a B}	80.8
<i>p</i> -value	0.000*	0.006*	-	0.000*	0.011*	-	0.000*	0.002*	-	0.0351*	0.163	-

Note: M: Month; Means within each column of each formulation at 0 M and 6 M with the same superscripts a-c indicate no significant difference ($\alpha = 0.05$) according to ANOVA. Different superscripts A-B of each property and code indicate a significant difference ($\alpha = 0.05$) between mechanical properties of the composites before and after 6 months of natural weathering. Percentage loss was calculated after 6 months of natural weathering.

3.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติในการเสื่อมสภาพสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบแกนวิห

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในผลกระทบของชนิดพลาสติกและสภาพแวดล้อมธรรมชาติต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ชนิดพลาสติก (พอลิโพรพิลีน และพอลิแล็กติกแอซิด) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ต่อสมบัติทางกลคือ ค่าความแข็งแรงดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงเฉือน และค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุ นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์โดยใช้การเปรียบเทียบเชิงซ้อนทุกคู่ แสดงให้เห็นว่า หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพอลิโพรพิลีนและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน (ตัวอักษร a) มีค่าความแข็งแรงดัดน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพอลิโพรพิลีนและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน (ตัวอักษร a) อย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน (ตัวอักษร b) อย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบสภาพแวดล้อมธรรมชาติโดยใช้ 2-Sample *t*-test พบว่า ที่ชนิดพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายเดียวกัน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหมีสมบัติทางกล คือ ค่าความแข็งแรงดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงเฉือน และค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ยกตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพอลิโพรพิลีนและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว ก่อนอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ (ตัวอักษร A) มีค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่าหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน (ตัวอักษร B) อย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) นอกจากนี้ พบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (% Loss) ของทุกสมบัติทางกลมากกว่าที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนอย่างชัดเจน หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน ในขณะเดียวกันพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียสมบัติทางกลแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน

3.3 การเสื่อมสภาพในความแข็งแรงดัด

ผลกระทบของชนิดพลาสติกและสภาพแวดล้อมธรรมชาติต่อค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบแกนวิห

ระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน แสดงดังภาพที่ 4 โดยแสดงให้เห็นว่า ก่อนอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด (67.1 MPa และ 49.4 MPa ที่เสริมแรงด้วยแผ่นไม้ไผ่สานลายสานและลายลูกแก้ว ตามลำดับ) รองลงมาเป็นวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน (38.2 MPa และ 32.4 MPa) และวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีค่าความแข็งแรงดัดต่ำที่สุด (30.1 MPa และ 29.5 MPa) อย่างไรก็ตาม หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุด (15.0 MPa และ 12.6 MPa) และวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าความแข็งแรงดัดน้อยที่สุด (9.1 MPa และ 7.4 MPa) เนื่องจาก พลาสติกพอลิโพรพิลีนมีการเชื่อมต่อด้านพันธะโมเลกุลที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ของโพรพิลีน โดยพันธะดังกล่าวมีความทนต่อไขมันและตัวทำละลายอินทรีย์เกือบทั้งหมด คุณสมบัติมีความแข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก ทนทานต่อการขีดข่วน ไม่เสีรูปร่าง ซึ่งไอน้ำและออกซิเจนมีการซึมผ่านได้น้อย (Xu *et al.*, 2016; Guo *et al.* 2019; Homkhiew *et al.*, 2014) ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิโพรพิลีน โดยผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ratanawilai and Taneerat (2018) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบพลาสติกแต่ละชนิดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพภายใต้สภาวะธรรมชาติ พบว่า พลาสติกพอลิโพรพิลีนมีการต้านทานแรงดัด แรงดึง และแรงอัดมากที่สุด ในขณะเดียวกันพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหมีค่าความแข็งแรงดัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามระยะเวลาการอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น 2, 4 และ 6 เดือน เนื่องจากระยะเวลาในการอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ต่อความแข็งแรงดัด กล่าวคือ วัสดุเชิงประกอบแกนวิหภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่าความแข็งแรงดัดน้อยที่สุด (Ratanawilai and Taneerat 2018; Srivabut *et al.*, 2021) ตัวอย่างเช่นวัสดุเชิงประกอบแกนวิหจากพลาสติก 3 ชนิดและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน PSW, PPW และ PLW มีค่าความแข็งแรงดัด เท่ากับ 12.3, 15.0 และ 9.1 MPa โดยมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความแข็งแรงดัด เท่ากับ 59.1, 60.7 และ 86.4 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

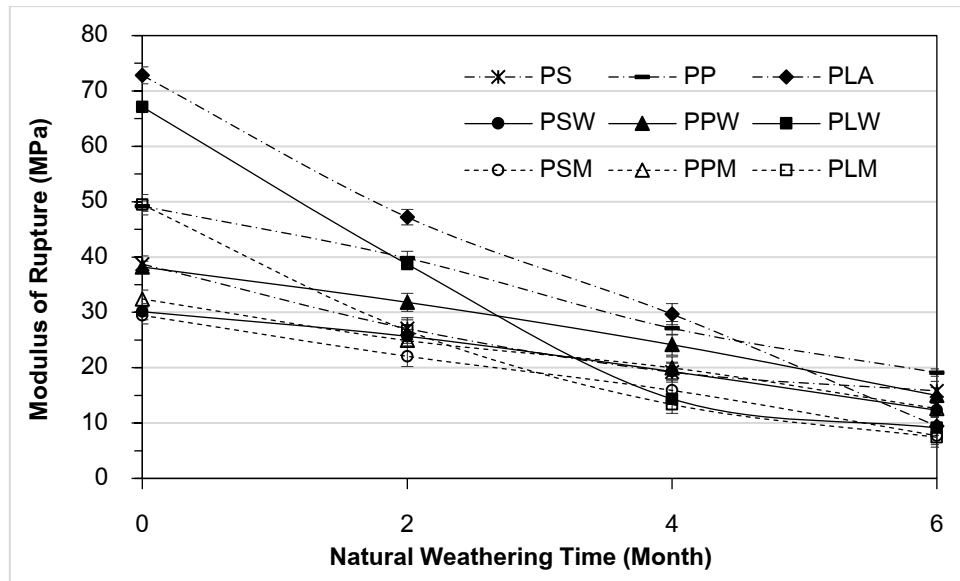


Figure 4 Deterioration in modulus of rupture of the sandwich composites between plastics and weaving bamboo plates under natural weathering.

ภาพที่ 4 แสดงผลกระทบของรูปแบบลวดลายแผ่นไม้ไผ่สานอีกด้วย โดยชี้ให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีความแข็งแรงดัดสูงกว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิช ระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้วอย่างเห็นได้ชัด ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ เนื่องจากการสานลวดลายแผ่นไม้ไผ่สานแบบลายสาน มีความแข็งแรงมากกว่าวิธีการสานลวดลายแผ่นไม้ไผ่สานแบบลายลูกแก้ว ซึ่งเหตุผลอาจเกิดมาจากการจัดเรียงตัวของแผ่นไม้ไผ่สานลายนี้มีการคละสลักกันในทุกทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้แผ่นไม้ไผ่สานลายนี้มีความแข็งแรง ทนทาน และแน่นหนากว่าลวดลายอื่น ๆ (Noivangklung, 1990; Sikka *et al.*, 2015) นอกจากนี้ พบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีความแข็งแรงดัดน้อยกว่าพลาสติก 100% ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซึ่งแต่ละชั้นไม่ได้ยึดเกาะด้วยพันธะโมเลกุล ส่งผลให้วัสดุทั้ง 2 ชนิดเมื่อผสมกันแล้วไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีความแตกต่างกับพลาสติก 100% (Pure plastics) ที่มีการยึดเกาะด้วยพันธะโมเลกุล และเป็นเนื้อเดียวกัน (Promjan *et al.*, 2022; Vitale *et al.*, 2017) ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน มีความแข็งแรงดัดที่น้อยกว่าพลาสติก 100%

3.4 การเสื่อมสภาพในความแข็งแรงดัด

ภาพที่ 5 แสดงความผันแปรในค่าความแข็งแรงดัดของ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานที่มีผลกระทบมาจากชนิดพลาสติก รูปแบบลวดลายแผ่นไม้ไผ่สาน และสภาพแวดล้อมธรรมชาติ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า มีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับค่าความแข็งแรงดัด โดยก่อนอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อม

ธรรมชาติ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแลกติกแอซิด มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุด (100.5 MPa และ 99.8 MPa ที่เสริมแรงด้วยแผ่นไม้ไผ่สานลายสานและลายลูกแก้ว ตามลำดับ) และวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิสไตรีน มีค่าความแข็งแรงดัดน้อยที่สุด (54.0 MPa และ 48.3 MPa) ทว่าหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีค่าความแข็งแรงดัดสูงที่สุด (12.6 MPa และ 7.22 MPa) และวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแลกติกแอซิด มีค่าความแข็งแรงดัดต่ำที่สุด (3.51 MPa และ 2.10 MPa) เนื่องจาก คุณสมบัติเฉพาะตัวของพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพ เมื่อมีการเสริมแรงด้วยแผ่นไม้ไผ่สานซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติทำให้มีการยึดเกาะของจุลินทรีย์ระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิด เกิดขึ้น ส่งผลให้ก่อนอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแลกติกแอซิด มีค่าความแข็งแรงดัดมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิสไตรีนและพอลิโพรพิลีน (Saengwong-ngam *et al.*, 2020; Spiridon *et al.*, 2016) ตัวอย่างเช่นวัสดุเชิงประกอบแซนวิชจากพลาสติก 3 ชนิด และแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว PSM, PPM และ PLM ก่อนอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ มีค่าความแข็งแรงดัดเท่ากับ 48.3, 69.6 และ 99.8 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ พบด้วยว่าวัสดุเชิงประกอบแซนวิชมีค่าความแข็งแรงดัดลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแลกติกแอซิด เมื่ออยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 2 เดือน หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ เมื่ออยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาตินานขึ้นเป็นระยะเวลา 4-6 เดือน เนื่องจากผลกระทบของสภาพแวดล้อมธรรมชาติต่อวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพและ

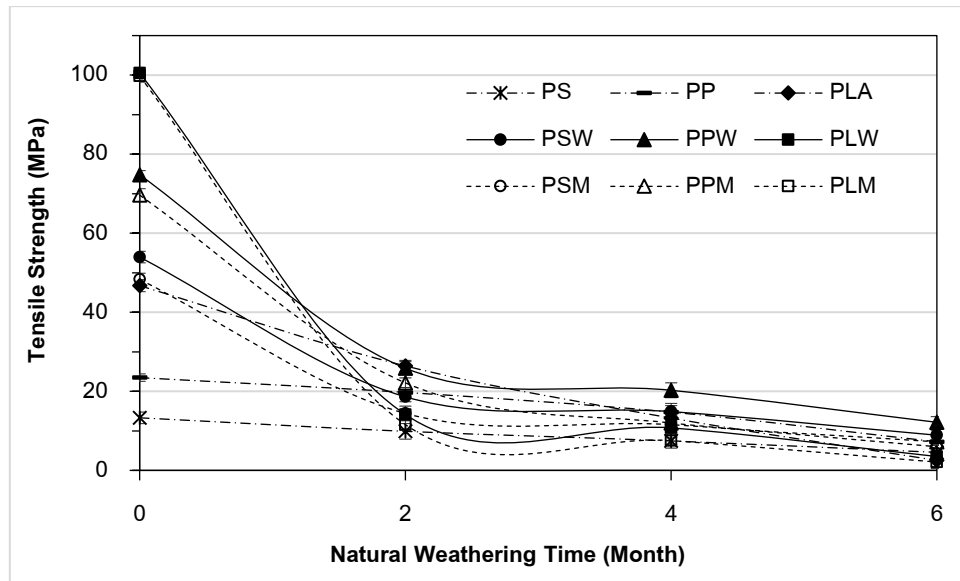


Figure 5 Deterioration in tensile strength of the sandwich composites between plastics and weaving bamboo plates under natural weathering.

แผ่นไม้ไผ่สาน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานให้มีการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลงอย่างรวดเร็ว (Vitale *et al.*, 2017; Sangnak *et al.*, 2021) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีนและพอลิไพรพิลีน

ผลกระทบของรูปแบบลวดลายแผ่นไม้ไผ่สานต่อค่าความแข็งแรงดิ่งของวัสดุเชิงประกอบแซนวิช แสดงอีกด้วยในภาพที่ 5 โดยแสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้วเพียงเล็กน้อย ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ เนื่องจากลวดลายของแผ่นไม้ไผ่สานนั้น มีลวดลายที่คล้าย ๆ กัน ลักษณะการสานมีการสลับกัน 2 ทิศทาง (แนวยาวและแนวขวาง) (Noivangklung, 1990; Sikka *et al.*, 2015) ดังนั้น ความแตกต่างของลวดลายแผ่นไม้ไผ่สานทั้ง 2 แบบ จึงให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยสอดคล้องกันค่าความแข็งแรงดิ่ง กล่าวคือ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว ในขณะที่เดียวกัน พบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิช ระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงกว่าพลาสติก 100% อย่างเห็นได้ชัด ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ เนื่องจากแผ่นไม้ไผ่สานเป็นตัวเสริมแรงให้แก่พลาสติก โดยลักษณะการสานมีการสลับกัน 2 ทิศทาง (Noivangklung, 1990) ด้วยเหตุนี้ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงกว่าพลาสติก 100%

3.5 การเสื่อมสภาพในความแข็งแรงดิ่ง

ผลกระทบของชนิดพลาสติก รูปแบบลวดลายแผ่นไม้ไผ่สาน และสภาพแวดล้อมธรรมชาติต่อค่าความแข็งแรงดิ่งของวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สาน แสดงดังภาพที่ 6 ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีพฤติกรรมเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงดิ่งและค่าความแข็งแรงดิ่ง โดยก่อนอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด (87.7 MPa และ 82.5 MPa ที่เสริมแรงด้วยแผ่นไม้ไผ่สานลายสานและลายลูกแก้ว ตามลำดับ) รองลงมาเป็นวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน (71.0 MPa และ 63.1 MPa) และวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิไพรพิลีน มีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำที่สุด (64.7 MPa และ 55.3 MPa) อย่างไรก็ตาม หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด (16.1 MPa และ 14.4 MPa) และวัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำที่สุด (7.0 MPa และ 5.7 MPa) โดยผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการเสื่อมสภาพในความแข็งแรงดิ่งและความแข็งแรงดิ่งก่อนหน้านี้ (Saengwong-ngam *et al.*, 2020; Spiridon *et al.*, 2016) โดยอาจเกิดขึ้นจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน มีการยืดเกาะด้วยพันธะโมเลกุลที่หนาแน่น ส่งผลให้พลาสติกชนิดนี้มีความแข็งแรงและเหนียว ด้านทานต่อการกัดกร่อนน้ำซึมผ่านได้ยาก และทนต่อสภาพอากาศและความชื้นได้ดี ด้วยเหตุนี้ วัสดุเชิงประกอบแซนวิชที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน จึงมีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด ในขณะที่เดียวกัน พบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแซนวิชมีค่าความแข็งแรงดิ่งลดลงอย่างเป็นเส้นตรง

เมื่ออยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นในช่วง 2-6 เดือน โดยค่าความแข็งแรงที่ลดลงอย่างรวดเร็วนั้น เหตุผลหนึ่งเกิดจาก ลวดลายของแผ่นไม้ไผ่สานที่มีลักษณะการสานเพียง 2 ทิศทาง เท่านั้น (แนวยาวและแนวขวาง) ซึ่งไม่ได้ตั้งฉากกับแนวแรงการ ทดสอบการเฉือน (Hao *et al.*, 2018; Hao *et al.*, 2019) จึงไม่ เหมาะสมในการรับแรงเฉือนของการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉือนลดลงอย่างรวดเร็วและเป็นเส้นตรง โดยผลงานวิจัยได้สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Gramlich *et al.* (2006) ซึ่งได้ศึกษาการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุเชิงประกอบ พลาสติกและไม้ พบว่า อัตราการลดลงของการต้านทานแรงเฉือน เท่ากับ 60-90% หลังการผ่านสภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็น ระยะเวลา 6 เดือน

ภาพที่ 6 แสดงให้เห็นด้วยว่า ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้ สภาพแวดล้อมธรรมชาติ วัสดุเชิงประกอบแซนวิช ระหว่าง พลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีค่าความแข็งแรงเฉือน

มากกว่าวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่ สานลายลูกแก้วอย่างชัดเจน จากผลการทดลองนี้ อาจเกิดขึ้นจาก ความแข็งแรงของลวดลายแบบสานที่มีความแน่น มีช่องว่างจาก การสานน้อย มีความสม่ำเสมอ และมีทิศทางการสานไปในทิศทาง เดียวกัน (Noivangklung, 1990; Sikka *et al.*, 2015) ดังนั้น วัสดุ เชิงประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีค่าความแข็งแรงเฉือนมากกว่าวัสดุเชิงประกอบแซนวิชระหว่าง พลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว นอกจากนี้พบว่า ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ วัสดุเชิง ประกอบแซนวิชระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีค่าความ แข็งแรงเฉือนสูงกว่าพลาสติก 100% อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการ เสริมแรงพลาสติกด้วยแผ่นไม้ไผ่สานหรือวัสดุธรรมชาติอื่น ๆ เหมาะสมกับการใช้งานพลาสติกที่ต้องการความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อาทิเช่น วัสดุโครงสร้าง เป็นต้น

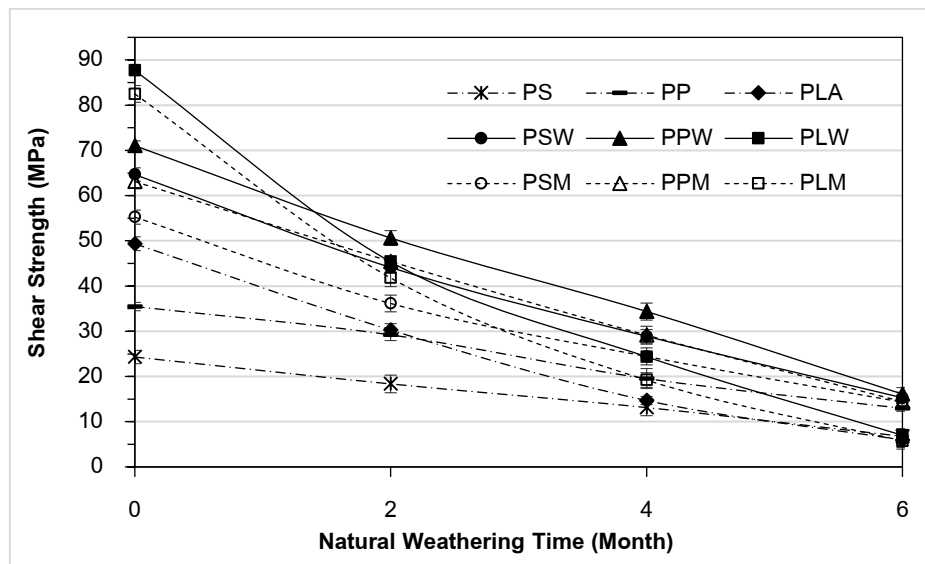


Figure 6 Deterioration in shear strength of the sandwich composites between plastics and weaving bamboo plates under natural weathering.

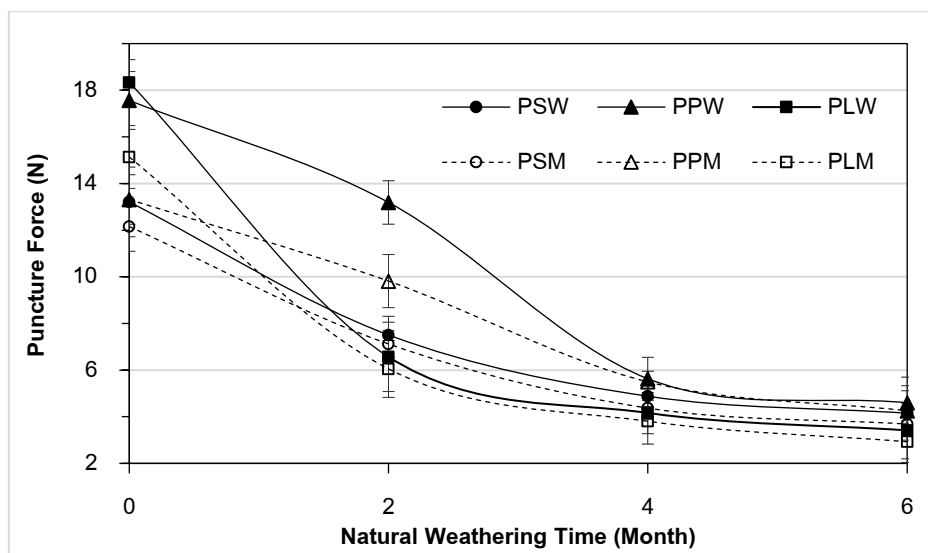


Figure 7 Deterioration in puncture force of the sandwich composites between plastics and weaving bamboo plates under natural weathering.

3.6 การเสื่อมสภาพในแรงต้านทานการทิ่มทะลุ

ภาพที่ 7 แสดงความผันแปรในค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุของวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานที่มีผลกระทบมาจากชนิดพลาสติก รูปแบบลวดลายแผ่นไม้ไผ่สาน และสภาพแวดล้อมธรรมชาติ โดยแสดงให้เห็นว่า ก่อนอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุต่ำที่สุด (13.2 N และ 12.2 N ที่เสริมแรงด้วยแผ่นไม้ไผ่สานลายสานและลายลูกแก้ว ตามลำดับ) และวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุสูงที่สุด (18.3 N และ 15.1 N) ซึ่งผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับการทดสอบแรงดึง (Saengwong-ngam *et al.*, 2020; Spiridon *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตาม หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน กลับพบว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุต่ำที่สุด (3.4 N และ 2.9 N) และวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน มีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุมากที่สุด (4.6 N และ 4.3 N) เนื่องจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index; MFI) เท่ากับ 5.0-6.0 กรัม/10 นาที ซึ่งมีค่าที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนและพอลิแล็กติกแอซิด ส่งผลให้มีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ มีความแข็งและเหนียว ทนทานต่อการกัดกร่อน และทนทานต่อการกระแทกได้ดี จึงเหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทบรรจุภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีการต้านทานต่อการทิ่มทะลุได้ดี โดยเฉพาะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีนมีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุมากที่สุด นอกจากนี้ พบด้วยว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหมีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 2-4 เดือน หลังจากนั้นมีความโน้มถ่วงลดลงอย่างช้า ๆ เมื่ออยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาตินานขึ้นเป็นระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srivabut *et al.* (2021) กล่าวว่า ในช่วงระยะเวลา 2-4 เดือน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหมีส่วนประกอบของน้ำ ออกซิเจน และธาตุอื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวอย่างรวดเร็วจากการอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ดังนั้น ในช่วงระยะเริ่มต้นจนถึง 4 เดือน ของการอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ อุณหภูมิ เวลา และสภาวะอื่น ๆ ส่งผลให้ค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุของวัสดุเชิงประกอบลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ในภาพที่ 7 ยังชี้ให้เห็นด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ เหตุผลอาจเกิดจากลวดลายของการสานแผ่นไม้ไผ่ซึ่งแผ่นไม้ไผ่สานลายสานนั้น มีการจัดเรียงของการสานในทิศทางเดียวกัน มีความแน่น และเกิดช่องว่างจากการสานน้อย ส่งผลให้

วัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสาน มีค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว (Noivangklung, 1990; Sikka *et al.*, 2015)

4. สรุป

ผลจากการศึกษาผลกระทบชนิดพลาสติก (พอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิแล็กติกแอซิด) และลวดลายสานไม้ไผ่สาน (ลายสาน และลายลูกแก้ว) ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่า ชนิดพลาสติกมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงเหนียว และค่าแรงต้านทานการทิ่มทะลุ และที่ชนิดพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายเดียวกัน วัสดุเชิงประกอบแกนวิหมีสมบัติทางกลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน เนื่องจาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความร้อน เวลา และความชื้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบแกนวิหมีการต้านทานสมบัติทางกลที่ลดลง โดยวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีนมีสมบัติทางกลสูงที่สุด รองลงมาเป็นวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิโพรพิลีน และวัสดุเชิงประกอบแกนวิหที่ผลิตด้วยพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด มีสมบัติทางกลน้อยที่สุด นอกจากนี้ ทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ วัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายสานมีสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้วอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก ลวดลายการสานนั้นส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยแผ่นไม้ไผ่สานลายสานมีการจัดเรียงไม้ไผ่ในทิศทางเดียวกัน มีความแน่นมากกว่า และเกิดช่องว่างจากการสานน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นไม้ไผ่สานลายลูกแก้ว และพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงเหนียวสูงกว่าพลาสติก 100% อย่างเห็นได้ชัดทั้งก่อนและหลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานมีความขรุขระและรอยแตกร้าวน้อยกว่าพลาสติก 100% หลังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติ ดังนั้น วัสดุเชิงประกอบแกนวิหระหว่างพลาสติกและแผ่นไม้ไผ่สานจึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างวัสดุโครงสร้างอาคาร และวัสดุตกแต่งนอกอาคาร

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.) และมหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชภัฏนครศรีธรรมราช ประจำปีงบประมาณ 2565 ภายใต้ชุดโครงการ “การพัฒนานวัตกรรมจากไม้ไผ่เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ไผ่ จังหวัดสตูล”

6. เอกสารอ้างอิง

- Cheewawuttipong, W., Homkhiew, C. and Rawangwong, S. 2022. A comparative study on the effect of oil palm fiber contents and types on properties of rubberwood sawdust-polypropylene composites. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 14(1): 31-46. (in Thai)
- Gramlich, W.M., Gardner, D.J. and Neivandt, D.J. 2006. Surface treatments of wood-plastic composites (WPCs) to improve adhesion. **Journal of Adhesion Science and Technology** 20(16): 1873-1887.
- Guo, G., Finkenstadt, V.L. and Nimmagadda, Y. 2019. Mechanical properties and water absorption behavior of injection-molded wood fiber/carbon fiber high-density polyethylene hybrid composites. **Advanced Composites and Hybrid Materials** 2: 690-700.
- Hao, X., Yi, X., Sun, L., Tu, D., Wang, Q. and Ou, R. 2019. Mechanical properties, creep resistance, and dimensional stability of core/shell structured wood flour/polyethylene composites with highly filled core layer. **Construction and Building Materials** 226: 879-887.
- Hao, X., Zhou, H., Xie, Y., Mu, H. and Wang, Q. 2018. Sandwich-structured wood flour/HDPE composite panels: Reinforcement using a linear low-density polyethylene core layer. **Construction and Building Materials** 164: 489-496.
- Homkhiew, C., Ratanawilai, T. and Thongruang, W. 2014. The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design. **Composites Part B: Engineering** 56: 350-357.
- Homkhiew, C., Rawangwong, S. and Boonchouytan, W. 2021. Effects of ground rubber tire and natural rubber contents on mechanical properties of thermoplastic elastomer. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 13(3): 553-567. (in Thai)
- Homkhiew, C., Srivabut, C., Rawangwong, S. and Boonchouytan, W. 2022. Performance of wood-plastic composites manufactured from post-consumer plastics and wood waste under coastal weathering in Thailand. **Fibers and Polymers** 23(9): 2679-2693.
- Huang, Y., Ji, Y. and Yu, W. 2019. Development of bamboo scrimber: a literature review. **Journal of Wood Science** 65(25): 1-10.
- Jaturonlux, N. and Ratanawilai, T. 2023. The study of thickness ratio and bamboo fiber and recycled-polypropylene core layer on acoustic and mechanical properties of sandwich composites. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 15(2): 477-493. (in Thai)
- Muhammad, A., Rahman, Md.R., Hamdan, S. and Sanaullah, K. 2019. Recent developments in bamboo fiber-based composites: a review. **Polymer Bulletin** 76: 2655-2682.
- Nasirzadeh, R. and Sabet, A.R. 2014. Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading. **International Journal of Impact Engineering** 63: 129-139.
- Nkeuwa, W.N., Zhang, J., Semple, K.E., Chen, M., Xia, Y. and Dai, C. 2022. Bamboo-based composites: a review on fundamentals and processes of bamboo bonding. **Composites Part B: Engineering** 235: 1-20.
- Noivangklung, P. 1990. Bamboo weaving patterns. **Journal of the National Research Council of Thailand** 22(2): 1-51. (in Thai)
- Oliveira, L.Á., Vieira, M.M., Santos, J.C., Freire, R.T.S., Tonatto, M.L.P., Panzera, T.H., Zamani, P. and Scarpa, F. 2022. An investigation on the mechanical behaviour of sandwich composite structures with circular honeycomb bamboo core. **Discover Mechanical Engineering** 1(7): 1-19.
- Phuangchik, T. 2013. Is bamboo amazing plant. **Thai Science and Technology Journal** 21(2): 179-185. (in Thai)
- Phungchik, T., Promklai, P. and Jirakiattikul, Y. 2013. Study on growth of some bamboo varieties. **Thai Science and Technology Journal** 21(6): 533-542. (in Thai)
- Promjan, J., Ratanawilai, T. and Homkhiew, C. 2022. The property of sandwich-structure rubberwood-plastic composites with different plastic core layer. **The Journal of KMUTNB** 32(3): 700-711. (in Thai)
- Ratanawilai, T. and Taneerat, K. 2018. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural

weathering. **Construction and Building Materials** 172: 349-357.

- Saengwong-ngam, R., Matan, N. and Matan, N. 2020. Physical properties, mechanical properties and antifungal activity of PLA bioplastic film containing *Michelia Alba oil* on brown rice. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University** 22(1): 14-21. (in Thai)
- Sangnak, P. Phetphaisit, C.W. and Seananud, P. 2021. Influence of natural rubber/modified chitosan on barrier, thermal and mechanical properties of PLA film packaging. **Thai Science and Technology Journal** 29(1): 46-61. (in Thai)
- Sikka, S., Sikka, P. and Chiarakul, T. 2015. Development of bamboo handicraft in Isaan. **Art and Architecture Journal Naresuan University** 6(1): 110-120. (in Thai)
- Spiridon, I., Darie, R.N. and Kangas, H. 2016. Influence of fiber modifications on PLA/fiber composites; Behavior to accelerated weathering. **Composites Part B: Engineering** 92: 19-27.
- Srivabut, C., Ratanawilai, T. and Hiziroglu, S. 2021. Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood-plastic composites with calcium carbonate filler. **Journal of Material Cycles and Waste Management** 23: 1503-1517.
- Sun, H., Li, H., Dauletbek, A., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O. and Ashraf, M. 2022. Review on materials and structures inspired by bamboo. **Construction and Building Materials** 325: 1-24.
- Vitale, J.P., Francucci, G., Xiong, J. and Stocchi A. 2017. Failure mode maps of natural and synthetic fiber reinforced composite sandwich panels. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 94: 217-225.
- Wang, B.J. and Young, W.B. 2022. The natural fiber reinforced thermoplastic composite made of woven bamboo fiber and polypropylene. **Fibers and Polymers** 23: 155-163.
- Xu, K., Tu, D., Chen, T., Zhong, T. and Lu, J. 2016. Effects of environmental-friendly modified rubber seed shell on the comprehensive properties of high density polyethylene/rubber seed shell composites. **Industrial Crops and Products** 91: 132-141.



Research Article

การพัฒนากระถางต้นไม้ชีวภาพจากพอลิเมอร์คอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/
ผักตบชวา/เปลือกถั่วลิสง

Development of Biodegradable Plant Pots from Thermoplastic Starch/
Water Hyacinth/Peanut Hulls Polymer Composites

พิมภนิฏา กันทาตง^{*}, รัตฐภัท บุนเฑร์, จัทรชัชชญาณ์ โชติชญาณ์พงศ์ และ พนิดา สวัสดิ์

Pimpanitpa Kunthadong^{*}, Rattaphat Bunkerd, Chatrachatchaya Chotichayapong and Panida Sawadee

สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
Program of Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima Campus, Mueang,
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-04-16

Revised: 2024-06-16

Accepted: 2024-06-25

Keywords:

biodegradable pots;

bio-composites;

thermoplastic starch;

peanut hulls;

water hyacinth

This study prepared a biodegradable polymer composite for a prototype plant bio-pot from thermoplastic starch (TPS), poly (L-lactide) (PLL), reinforced with water hyacinth (WH) and peanut hulls (P) through a melt forming process. The TPS compounds were prepared from native tapioca starch using a plasticizer mixture consisting of glycerol and other plasticizers in a 2:1 weight ratio. The mixture included glycerol/sorbitol (GS), glycerol/urea (GU) and glycerol/distilled water (GW), and were compared with glycerol (Gly) alone. The results showed that plastic sheet from TPS_{GS} has tensile mechanical properties, thermal stability, and water resistance better than other TPS compounds. When TPS_{GS} was reinforced with water hyacinth fiber and peanut shell (WHP) at 10 % by weight and 5 phr PLL was added as an additive (90TPS_{GS}/10WHP+5PLL), the tensile and water absorption properties of the composite sheets were studied. It appeared that the reinforcement with 10% WHP by weight increased the elongation at break to 20.39%, while also reducing water absorption and improving the stability of the plastic sheet during testing. Additionally, the polymer composites can be formed into conical plant pots using a vertical ram extruder. The resulting plant pots exhibited a dark brown color with creamy streaks evenly distributed throughout, a smooth surface texture and morphology stability. They are suitable for use as small plant pots.

© 2025 Kunthadong, P., Bunkerd, R., Chotichayapong, C. and Sawadee, P. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

^{*} Corresponding author.

E-mail address: pimpanitpa.ku@rmuti.ac.th

Cite this article as:

Kunthadong, P., Bunkerd, R., Chotichayapong, C. and Sawadee, P. 2025. Development of Biodegradable Plant Pots from Thermoplastic Starch/Water Hyacinth/Peanut Hulls Polymer Composites. *Recent Science and Technology* 17(3): 262954.

บทคัดย่อ

ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพสำหรับเป็นกระถางต้นไม้ชีวภาพต้นแบบ จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch; TPS) พอลิ(แอล-แลคไทด์) (poly (L-lactide); PLL) เสริมแรงด้วยผักตบชวา (water hyacinth; WH) และเปลือกถั่วลิสง (peanut hulls; P) โดยกระบวนการหลอมขึ้นรูป TPS คอมพาวด์เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างกลีเซอรอลกับพลาสติกไซเซอร์อื่น ๆ ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ดังนี้ กลีเซอรอล/ซอร์บิทอล (glycerol/sorbitol; GS) กลีเซอรอล/ยูเรีย (glycerol/urea; GU) และ กลีเซอรอล/น้ำกลั่น (glycerol/distilled water; GW) เทียบกับกลีเซอรอล (glycerol; Gly) เพียงอย่างเดียว ผลการศึกษาพบว่าแผ่นพลาสติก TPS_{GS} ที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลแรงดึง เสถียรภาพทางความร้อน และการต้านทานน้ำได้ดีกว่า TPS สูตรคอมพาวด์อื่น และเมื่อนำ TPS_{GS} มาเสริมแรงด้วยเส้นใยผสมผักตบชวาและเปลือกถั่วลิสง (WHP) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใช้ 5 phr PLL เป็นสารเติมแต่ง (90TPS_{GS}/10WHP+5PLL) โดยศึกษาสมบัติเชิงกลแรงดึงและการดูดซับน้ำของแผ่นพลาสติกคอมโพสิต แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วย WHP ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการยืดยืดเพิ่มขึ้นเป็น 20.39 เป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก่แผ่นพลาสติก อีกทั้งยังลดค่าการดูดซับน้ำและเพิ่มความเสถียรของแผ่นพลาสติกในระหว่างการทดสอบอีกด้วย ลำดับสุดท้ายพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพนี้สามารถนำไปขึ้นรูปกระถางแบบทรงกรวยด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้งได้กระถางเพาะชำชีวภาพต้นแบบมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มปนครีมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ผิวสัมผัสเรียบและมีความคงรูป สามารถนำไปใช้เป็นกระถางปลูกต้นไม้ขนาดเล็กได้

คำสำคัญ: กระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, คอมโพสิตชีวภาพ, เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช, เปลือกถั่วลิสง, ผักตบชวา

1. บทนำ

กระถางหรือถาดเพาะชำพลาสติกมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับการหว่านเมล็ดและการเพาะปลูกดอกไม้ ผัก และต้นกล้าต่าง ๆ ในฟาร์มดอกไม้ พืชไร่ พืชสวน เป็นต้น พลาสติกเหล่านี้ผลิตมาจากพอลิเมอร์ฐานปิโตรเลียมประเภทไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ (non-degradable polymer) หลังการใช้งานกลายเป็นขยะพลาสติกที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Grazuleviciene *et al.*, 2012; Gupta and Urahn, 2023) รวมถึงในประเทศไทยซึ่งเป็นแหล่งเกษตรกรรมมีการเพาะปลูกพืชจำนวนมากทำให้มีผลกระทบจากขยะพลาสติกทางการเกษตร ทั้งด้านการตกค้างของไมโครพลาสติก (microplastics) ในดิน และจากกระบวนการจัดการขยะ เช่น ต้นทุนการจัดการขยะ การเสื่อมสภาพของดิน (การฝังกลบ) ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (การเผาไหม้) เป็นต้น (Soontornchai *et al.*, 2016; FAO, 2021) ดังนั้นการนำพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) หรือพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระถางต้นไม้ทดแทนพอลิเมอร์จากฐานปิโตรเลียมหรือพลาสติกโภคภัณฑ์ (commodity plastic) ถือเป็นหนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหา/ลดปริมาณขยะ และลดต้นทุนการจัดการขยะพลาสติก ทนทานหลังใช้งานทางการเกษตรได้ เนื่องด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะการหมัก (compostable) หรือการฝังดิน (soil burial)

ปัจจุบันการเตรียมพลาสติกชีวภาพกลุ่มที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (starch based) ได้รับความสนใจ (Jiang *et al.*, 2020) เนื่องด้วยแป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายและสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่น/ฟิล์มได้ จึงเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ (Theamdee and Rueangrun, 2019) โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง

ปัจจุบันประเทศไทยมีนโยบายขับเคลื่อนอุตสาหกรรมมันสำปะหลังไทยด้วยเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (Bio Circular Green Economy; BCG Model) ของกระทรวงอุตสาหกรรม งานวิจัยจำนวนมากได้มีการพัฒนาเปลี่ยนโครงสร้างแป้งให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch; TPS) โดยผ่านกระบวนการพลาสติกไซซ์ (plasticization) เม็ดแป้งด้วยสารเพิ่มสภาพความยืดหยุ่นหรือพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) ที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือน (Sriroth and Piyachomkwan, 2003) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียม TPS พบว่าการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างกลีเซอรอล (glycerol) กับกลุ่มพอลิออล (polyol) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น ซอร์บิทอล (sorbitol) ซิลิทอล (xylitol) และมอลทิทอล (maltitol) หรือกลุ่มหมู่เอไมด์ (amide groups) เช่น ยูเรีย (urea) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถพัฒนาสมบัติความแข็งแรงเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อนและสัณฐานวิทยาในการเก็บรักษาให้แก่ TPS ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว (Qiao *et al.*, 2011; Paluch *et al.*, 2022) ซึ่ง TPS นั้นถือเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพทางเลือกสำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการความทนทานและการเสื่อมสภาพของสมบัติเชิงกลในระยะยาว (Gironès *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตามเนื่องด้วย TPS มีสมบัติชอบน้ำสูง (hydrophilic) และมีความเปราะ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานเป็นกระถางต้นไม้ การปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของ TPS เป็นวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composite) ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ (natural fiber reinforcement) (Obasi, 2015; Islam *et al.*, 2021; Paczkowski *et al.*, 2021) ซึ่งมีข้อได้เปรียบในด้านน้ำหนักเบาและการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับ TPS เมทริกซ์ ส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของ TPS โดยยังคงสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Gironès *et al.*, 2012; Fekete *et al.*, 2018) นอกจากนี้ยัง

ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน การลดอัตราหดตัวขณะขึ้นรูปของ TPS (Sriroth and Piyachomkwan, 2003) และเมื่อมีการย่อยสลายทางชีวภาพแล้วเส้นใยธรรมชาติยังสามารถเป็นปุ๋ยหรือสารอาหารของจุลินทรีย์ในดินได้อีกด้วย (Buachum and Towatana, 2015)

ผักตบชวา (water hyacinth; WH) และเปลือกถั่วลิสง (peanut shell; P) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่สามารถนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในพลาสติกชีวภาพเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง (Obasi, 2015; Islam *et al.*, 2021) และจากการศึกษาการปลดปล่อยธาตุปุ๋ยที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของวัสดุปลูกอินทรีย์พบว่าเปลือกถั่วลิสงมีปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์สูงที่สุดในแต่ละสัปดาห์การหมักเมื่อเทียบกับถ่านแกลบและมูลวัว (Buachum and Towatana, 2015)

ในงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการผลิตกระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น นิยมใช้วัสดุเส้นใยเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบหลักและมีการขึ้นรูปกระถางแบบขั้นตอนเดียว โดยทำการผสมวัสดุและใช้แบ่งเปียงเป็นตัวประสานนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปกระถางแบบอัดไฮโดรลิก (Piyang *et al.*, 2018; Tanpaiboonkul *et al.*, 2022) หรือผลิตจากเยื่อกระดาษที่มีแบ่งเป็นตัวประสานขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (Juanga-Labayen and Yuan, 2021) ซึ่งกระบวนการเตรียมกระถางชีวภาพแบบขั้นตอนเดียวนั้นมีข้อจำกัดในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้เป็นมาตรฐานเดียวกันและขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเชิงพาณิชย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเตรียมเม็ดพอลิเมอร์คอมพาวด์ชีวภาพชนิดคอมโพสิต จากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเสริมแรงด้วยผักตบชวาและเปลือกถั่วลิสง ที่ใช้พอลิ(แอล-แลคไทด์) ((poly(L-lactide); PLL)) เป็นสารตัวเติม (additive) และประเมินศักยภาพในการขึ้นรูปเป็นกระถางพลาสติกชีวภาพต้นแบบด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้ง ด้วยการศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติต่าง ๆ เบื้องต้น ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ มุมสัมผัสหยดน้ำ และดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยเม็ดคอมพาวด์พลาสติกชีวภาพที่มีส่วนประกอบของสารเสริมแรงผักตบชวาผสมเปลือกถั่วลิสง และความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเป็นกระถางพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อทดแทนการใช้เม็ดพลาสติกทนทานและลดปริมาณขยะพลาสติกทนทานจากการใช้งานทางการเกษตร ลดต้นทุนในการจัดการขยะและเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร/วัชพืช อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหลังการใช้งานไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือมีสารตกค้างในดินทางการเกษตร

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

ผงแป้งมันสำปะหลัง (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แป้งมันเอี่ยมเฮง อุตสาหกรรม จำกัด) ลำต้นผักตบชวา (อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา) นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา ฉีกลำต้นผักตบชวาเป็นเส้นขนาดความกว้างประมาณ 30-50 มิลลิเมตรและตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ พึ่งแดดให้แห้งเป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (ULM600/I, Memmert) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และบดเป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบด (SK 100, Retsch) และเปลือกถั่วลิสง (อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา) นำมาล้างทำความสะอาด พึ่งแดดเป็นเวลา 3-5 วัน จากนั้นนอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และบดเป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบด โดยผงวัตถุดิบทั้งสามชนิดร่อนผ่านตะแกรงที่ความละเอียด 80 Mesh (180 ไมโครเมตร) และบรรจุใส่ถุงซิปลพลาสติกเก็บรักษาในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน สำหรับสารเติมแต่ง คือ พอลิ(แอล-แลคไทด์) (3051D grade, NatureWorks LLC, USA) และสารพลาสติกไซเซอร์ ได้แก่ กลีเซอรอล (เกรต วิเคราะห์; Leonid chemicals Ltd., India) ยูเรีย (เกรต ห้างปฏิบัติการ; Ajax Finechem Ltd., New Zealand) ซอร์บิทอล (เกรต ห้างปฏิบัติการ; KemAus™, Australia) และน้ำกลั่น (D82100, Schott)

2.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

การเตรียม TPS ในสภาวะการหลอมผสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (Volpe *et al.*, 2018) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อ พลาสติกไซเซอร์ ร้อยละ 70:30 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่าง กลีเซอรอลต่อพลาสติกไซเซอร์ ชนิดอื่นในอัตราส่วน 2:1 ได้แก่ กลีเซอรอล/ซอร์บิทอล (GS) กลีเซอรอล/ยูเรีย (GU) และ กลีเซอรอล/น้ำกลั่น (GW) เทียบกับการใช้กลีเซอรอล (Gly) เพียงอย่างเดียว โดยนำแป้งมันสำปะหลัง (ผ่านการอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง) และพลาสติกไซเซอร์แต่ละสูตร (Table 1) มาผสมกันอย่างหยาบ (pre-mixed) ในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน ทำการเขย่าเพื่อให้พลาสติกไซเซอร์กระจายตัวและดูดซึมเข้าสู่เม็ดแป้งจัดเก็บรักษาในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมผสมระบบปิด (internal mixer; CHAREON TUT, co., Ltd.) ที่อุณหภูมิการหลอมผสม 140 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของสกรูเท่ากับ 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที คอมพาวด์ที่ได้ตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก และนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้วยกระบวนการกดอัดเข้าแม่พิมพ์ (หัวข้อที่ 4)

Table 1 Composition of the mixtures used for the preparation of the thermoplastic starch compounds

TPS compounds	Tapioca starch (%wt)	Glycerol (%wt)	Sorbitol (%wt)	Urea (%wt)	Water distillation (%wt)
TPS _{Gly}	70	30	-	-	-
TPS _{GS}	70	20	10	-	-
TPS _{GU}	70	20	-	10	-
TPS _{GW}	70	20	-	-	10

Table 2 The composition ratio of polymer composite compounds

Polymer compounds	TPS _{GS} (%wt)	Water Hyacinth (%wt)	Peanut Hulls (%wt)	PLL (phr)
TPS _{GS} +5PLL	100	-	-	5
TPS _{GS} +10PLL	100	-	-	10
TPS _{GS} +15PLL	100	-	-	15
90TPS _{GS} /10WH+5PLL	90	10	-	5
90TPS _{GS} /10WHP+5PLL	90	5	5	5
80TPS _{GS} /20WHP+5PLL	80	10	10	5
90TPS _{GS} /10P+5PLL	90	-	10	5

2.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิตเตรียมระหว่าง TPS_{GS} และเส้นใยเสริมแรง (ผักตบชวาและ/หรือเปลือกถั่วลิสง) ที่ใช้ PLL เป็นสารเติมแต่ง (วัตถุดิบตั้งต้นก่อนผสมผ่านการอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง) ดังอัตราส่วนใน Table 2 โดยนำพอลิเมอร์มาผสมอย่างหยาบในถุงพอลิเอทิลีน ทำการหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของสกรูเท่ากับ 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก และนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์ (หัวข้อที่ 4)

2.4 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติก

กระบวนการหลอมขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกของเม็ดคอมปาวด์ตัวอย่าง ขนาดแม่พิมพ์ 150×150×1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding; CHAREON TUT, co., ltd.)

ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการใช้เวลาและความดันในการอัดเข้าแม่พิมพ์มีดังนี้ ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนโดยไม่ใช้แรงอัด (pre-heating) เป็นเวลา 4 นาที ขั้นที่ 2 ใช้แรงอัด 15000 ปอนด์ เป็นเวลา 5 นาที ขั้นที่ 3 ใช้แรงอัด 25000 ปอนด์ เป็นเวลา 5 นาที และขั้นที่ 4 ทำการหล่อเย็นเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นลอกแผ่นพลาสติกใส่งูชิปและเก็บรักษาในโถดูดความชื้นก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

2.5 การขึ้นรูปกระถางชีวภาพต้นแบบ

การขึ้นรูปกระถางของพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพ เม็ดคอมปาวด์สูตร 90TPS_{GS}/10WHP/5PLL ด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้ง (ram extruder) (Figure 1 (A)) ให้อุณหภูมิการหลอมที่ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เม็ดคอมปาวด์เกิดการหลอม แล้วใช้แรงดันให้พอลิเมอร์ไหลจากหัวตายเข้าสู่แม่พิมพ์และแข็งตัวในแม่พิมพ์กระถางแบบทรงกรวยเย็น ขนาดแม่พิมพ์ความสูงและความกว้างปากกระถาง 2.5 นิ้ว ขนาดก้นกระถาง 2.0 นิ้ว (Figure 1(B))



Figure 1 The vertical ram extruder machine for the conical plant pots.

(A) vertical ram extruder and (B) conical plant pots mold

2.6 การหาลักษณะเฉพาะของเม็ดพอลิเมอร์คอมพาวด์

2.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของแผ่นพลาสติกตัวอย่าง ขนาด 1×1 ซม.² ด้วยเทคนิคแอมเพนนูโทโทโลฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (ATR-FTIR) ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น spectrum 100

2.6.2 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเม็ดคอมพาวด์ ตัวอย่าง ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก แอแนไลซิส (TGA) ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น STA6000 ช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศ แก๊สไนโตรเจน วัดการเปลี่ยนแปลงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของ ตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัว เริ่มต้น (onset of thermal decomposition, $T_{d,onset}$) และอุณหภูมิ การสลายตัวที่สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (decomposition temperature at 5% weight loss; $T_{d,5\%}$)

2.7 ศึกษาสมบัติแผ่นพลาสติกคอมโพสิต

2.7.1 สมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 เตรียมชิ้นงานขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร ความยาว 57 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เอนกประสงค์ (LLOYD Instrument, รุ่น LR10K plus) ใช้แรงดึง (load cell) 10 กิโลนิวตัน ความเร็วในการทดสอบ (crosshead speed) 50 มิลลิเมตร/นาที โดยวิเคราะห์ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด (tensile strength; TS) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (elongation at

break; EB) และมอดูลัสของยัง (Young's modulus) ทำการทดสอบ ชิ้นงานตัวอย่างละ 5 ชิ้น

2.7.2 การวัดมุมสัมผัสผิวน้ำ

การวัดมุมสัมผัสน้ำของแผ่นพลาสติก ด้วยเครื่องวัดมุม สัมผัส (contact angle measurement, OCA20) เตรียมตัวอย่าง แผ่นพลาสติก ขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร และทำความสะอาดพื้นผิวตัวอย่างด้วย 95% เอทานอล และนำมาอบให้แห้ง เนื่องจากมุมสัมผัสมีความไวสูงต่อการ ปนเปื้อน จากนั้นนำไมโครปิเปตดูดน้ำกลั่นปริมาตร 1 ไมโครลิตร และหยดน้ำกลั่นลงบนแผ่นพลาสติก วัดมุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดมุม สัมผัส มีหน่วยเป็นองศา (°) วัดมุมสัมผัสบนแผ่นพลาสติกจำนวน 3 ตำแหน่ง ตัวอย่างละ 5 ชิ้น ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (Bunkerd *et al.*, 2018) และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำมาหาค่าเฉลี่ยของค่ามุม สัมผัส

2.7.3 การดูดซับน้ำ

ทดสอบการดูดซับน้ำ (water absorption; W_A) ของแผ่น พลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D570-98 เพื่อประเมิน ประสิทธิภาพของตัวอย่างในน้ำหรือสภาวะที่มีความชื้นระหว่างการ ใช้งาน โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 20×20 มิลลิเมตร นำแผ่นพลาสติก อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแผ่น พลาสติกตัวอย่างด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่งแล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าเข้าสู่ สมดุล จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างออกจากน้ำแล้วซับด้วยผ้าสะอาด เพื่อดูดซับเอาน้ำที่ผิวชิ้นงานส่วนเกินออกแล้วชั่งน้ำหนักตาม ระยะเวลาที่กำหนด คือ 6 9 12 และ 24 ชั่วโมงตามวิธีมาตรฐาน และทำการแช่ในน้ำกลั่นจนครบ 72 ชั่วโมงเพื่อติดตามลักษณะทาง

กายภาพของแผ่นพลาสติก โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และคำนวณหาร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นพลาสติกคอมโพสิตชีวภาพ (Tarique *et al.*, 2022) แสดงดังสมการ (1)

$$W_A (\%) = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_0 และ W_i คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำกลั่นและน้ำหนักหลังแช่น้ำกลั่น ตามลำดับ

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) เวอร์ชัน 29 โดยนำข้อมูลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย ($\pm$ SD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตามวิธี Paired-Sample T-Test และ Independent Sample T-Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จากชุดข้อมูลดิบอย่างน้อย 3 ซ้ำ

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

TPS ที่เตรียมด้วยกระบวนการหลอมผสมทุกสูตรมีความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเม็ดแป้งมันสำปะหลังและพลาสติกไซเซอร โดยเม็ด TPS ที่พลาสติกไซต์ด้วย Gly GU และ GS ผิวสัมผัสมีลักษณะลื่นไม่เหนอะและไม่เกิดการรวมตัวเป็นก้อน ในขณะที่ TPS พลาสติกไซต์ด้วย GW เกิดการรวมตัวเป็นก้อนและมีผิวสัมผัสค่อนข้างเหนียวเหนอะหนะ เมื่อนำเม็ดคอมพาวด์ TPS ทุกสูตรมาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกลักษณะทางกายภาพแสดงดัง Figure 2 พบว่าแผ่น TPS_{Gly} และ TPS_{GS} มีลักษณะผิวเรียบ โปร่งแสงเป็นเนื้อเดียวกันและมีความคงรูป สำหรับแผ่น TPS_{GU} นั้นเกิดการหลอมที่ไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวขรุขระ มีลักษณะเป็นสีเหลือง-น้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับ TPS สูตรอื่น เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ของโมเลกุลแป้งที่มียูเรียในขั้นตอนการหลอมขึ้นรูป (Galdeano *et al.*, 2009) ในขณะที่แผ่น TPS_{GW} มีลักษณะผิวเรียบ แต่มีรอยแตกร้าว ส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกลลดลงภายหลังสภาวะการขึ้นรูป เป็นผลเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำที่เป็นสารโมเลกุลเล็กและมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลแป้งอย่างอ่อน ๆ ทำให้เกิดการสูญเสีย (เกิดระเหยกลายเป็นไอน้ำ) ระหว่างกระบวนการหลอมขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิสูง (Lourdin *et al.*, 1997)

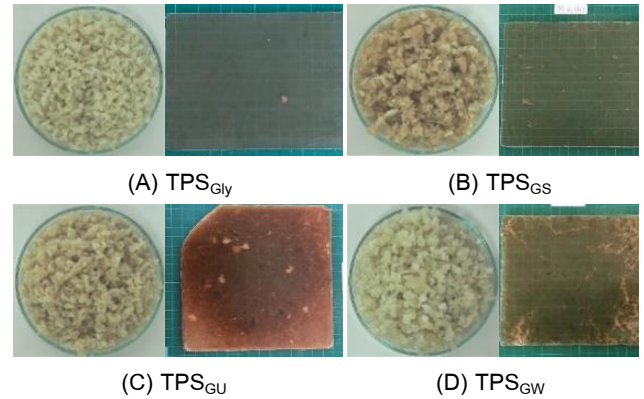


Figure 2 TPS compounds pellet and sheet prepared with different types of plasticizers.

(A) glycerol (Gly), (B) glycerol/sorbitol (GS), (C) glycerol/urea (GU) and (D) glycerol/water distillation (GW)

ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสูญเสียน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค TGA ของแป้งมันสำปะหลังและเม็ด TPS ทุกสูตร ผล TGA เทอร์โมแกรมแสดงดัง Figure 3 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อนของแป้งมันสำปะหลังเกิดขึ้นสองขั้นตอน โดยขั้นแรกเกิดการสูญเสียโมเลกุลน้ำ (weakly bound water) ที่อยู่ภายในโครงสร้างของแป้ง (Bogacheva *et al.*, 2002) ประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-120 องศาเซลเซียส และขั้นที่สองเป็นการสลายตัวของโครงสร้างหลักของแป้งช่วงอุณหภูมิ 275-400 องศาเซลเซียส ประมาณ ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก (Triwises *et al.*, 2016) ในขณะที่ TPS ซึ่งมีองค์ประกอบของพลาสติกไซเซอรผสม (GU GS หรือ GW) นั้น มีค่าอุณหภูมิ $T_{d,5\%}$ สูงกว่า TPS_{Gly} แสดงได้ว่าสารพลาสติกไซเซอรผสมนั้นสามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่เม็ดคอมพาวด์ TPS (Zhong and Li, 2014; Zahiruddin *et al.*, 2019) เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแป้งกับพลาสติกไซเซอรผสมนั้นสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว และยังส่งผลต่อเสถียรภาพทางร้อนของพลาสติกไซเซอรผสมใน TPS เมื่อนำไปหลอมขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง มากไปกว่านั้น จากงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2008) และ Paluch *et al.* (2022) พบว่าการใช้สารพลาสติกไซเซอรผสม GU และ GS ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางสัณฐานวิทยาให้แก่ TPS โดยไม่เกิดการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (migration) ของพลาสติกไซเซอรสู่พื้นผิวของแผ่นพลาสติกอีกด้วย

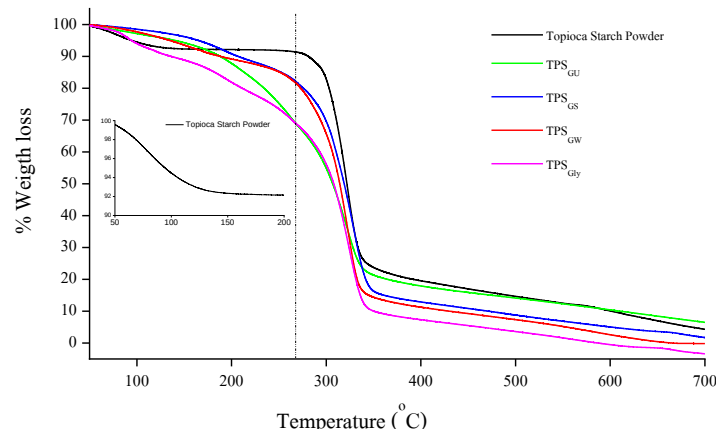


Figure 3 TGA thermograms of tapioca starch powder and the TPS compounds.

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นพลาสติก TPS เมื่อพิจารณาค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด (TS) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (EB) และค่ามอดูลัสของยัง พบว่าแผ่น TPS_{GS} มีค่าเท่ากับ 2.64 ± 0.48 MPa $60.21 \pm 9.71\%$ และ 62.99 ± 4.85 MPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ TPS_{Gly} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.74 ± 0.07 MPa $123.83 \pm 3.76\%$ และ 15.20 ± 3.52 MPa ตามลำดับ แสดงได้ว่าการพลาสติไซต์แบ่งด้วย GS ให้สมบัติเชิงกลแรงดึงที่มีความแข็งแรงและเหนียวกว่า TPS_{Gly} เนื่องจาก GS สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลแป้งที่แข็งแรงกว่าใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว และซอร์บิทอลมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ากลีเซอรอลจึงช่วยไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงทำให้ค่า TS และมอดูลัสของยังสูงกว่า TPS_{Gly} (Ma *et al.*, 2006) ในขณะที่แผ่น TPS_{GU} เกิดการหลอมไม่สม่ำเสมอและแผ่นพลาสติก TPS_{GW} นั้นมีลักษณะที่แข็งและมีรอยร้าวเกิดการแตกหัก ทำให้ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดที่ใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง (160°C) ทำให้โมเลกุลของน้ำใน TPS_{GW} นั้นเกิดการระเหยเป็นแก๊สในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป แล้วทำให้แผ่นพลาสติกที่ได้มีความแข็งแรงและเปราะมากขึ้นนั้นอาจเรียกว่า เกิดปรากฏการณ์แอนติ-พลาสติไซเซชัน (anti-plasticization) ได้ (Muller *et al.*, 2016) นอกจากนี้ผลการศึกษามุมสัมผัสผิวน้ำบนพื้นผิวแผ่นพลาสติก TPS ที่เตรียมจากพลาสติไซเซอร์ผสม GS (75°) ให้ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำสูงกว่าพลาสติไซต์ด้วยกลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว (65°) บ่งบอกได้ว่าแผ่น TPS_{GS} มีความชอบน้ำน้อยกว่า TPS_{Gly} หรือกล่าวได้ว่าการพลาสติไซต์แบ่งด้วย GS สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำให้แก่ TPS ได้ดีกว่าการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว

จากผลการศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ผสม GS GU และ GW ต่อสมบัติต่าง ๆ ของ TPS ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ พลาสติไซเซอร์ผสม GS ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS_{GS} ร่วมกับ PLL ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถการต้านทานน้ำและช่วยยืดเวลาการย่อยสลายทางชีวภาพให้กับพลาสติกจาก TPS ในลำดับถัดไป

3.2 ผลการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ $TPS_{GS}+PLL$

จากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ $TPS_{GS}+PLL$ ที่เติม PLL ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr ในสภาวะหลอมผสมที่อุณหภูมิ 160°C องศาเซลเซียส พบว่าทั้งสามสูตร $TPS_{GS}+5PLL$ $TPS_{GS}+10PLL$ และ $TPS_{GS}+15PLL$ (Figure 4 (A)-(C)) สามารถหลอมผสมได้ทั้ง TPS_{GS} และ PLL เนื่องมาจากกลีเซอรอลและซอร์บิทอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของ PLL (Muller *et al.*, 2016) เหนียวน่าให้แรงยึดเหนี่ยวพันธะภายในโมเลกุลของ PLL ลดลงส่งผลให้เกิดการหลอมผสมในสภาวะที่ศึกษา ในขณะที่สูตร $TPS_{GU}+5PLL$ นั้น PLL ไม่สามารถเกิดการหลอมผสมเข้ากับ TPS_{GU} ได้ในสภาวะการศึกษาดังกล่าวกับ TPS_{GS} (Figure 4 (D)) และเมื่อนำเม็ดคอมพาวด์ $TPS_{GS}+PLL$ ทั้งสามสูตรไปขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติก (Figure 4) พบว่าที่เติม PLL ปริมาณ 5 และ 10 phr มีการกระจายตัวของ PLL ในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ (Li and Huneault, 2010) แผ่นพลาสติกมีลักษณะที่บวมใส น้ำตาลอ่อน ผิวสัมผัสเรียบและคงรูป อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของ PLL เพิ่มขึ้นเป็น 15 phr พบว่าแผ่นพลาสติกบางบริเวณเป็นสีน้ำตาลใส คือ PLL ส่วนเกิดการรวมตัวอยู่ด้วยตัวเอง เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคระหว่าง TPS_{GS} กับ PLL เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำที่แตกต่างกันของโมเลกุลแป้ง (hydrophilic; ชอบน้ำ) และ PLL (hydrophobic; ไม่ชอบน้ำ) จากลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงดึงของแผ่นพลาสติก อีกทั้งยังทำให้อัตราการดูดซับความชื้น (น้ำ) ของแผ่นพลาสติกของ TPS เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ $TPS_{GS}+5PLL$ และ $TPS_{GS}+10PLL$ เมื่อนำ $TPS_{GS}+PLL$ ทั้งสามสูตรไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR เทียบกับ TPS_{GS} แสดงดัง Figure 5 พบว่า $TPS_{GS}+PLL$ ทั้งสามสูตรแสดง FT-IR สเปกตรัมที่ใกล้เคียงกับ TPS_{GS} และยังปรากฏการผันผวนการสั่นแบบยืดของหมู่คาร์บอนิล ($-C=O$) ในโครงสร้างของ PLL ในช่วงเลขคลื่น 1746 cm^{-1} (Chiang *et al.*, 2014) โดยความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PLL ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสูตรคอมพาวด์ แสดงได้ว่ามี PLL เป็นส่วนประกอบที่กระจายตัวในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์

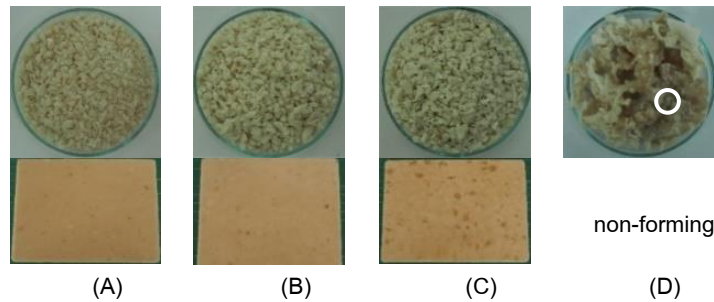


Figure 4 The TPS blend granulates, and sheets prepared with the addition of PLL content.

(A) TPS_{GS}+5PLL, (B) TPS_{GS}+10PLL, (C) TPS_{GS}+15PLL and (D) TPS_{GU}+5PLL

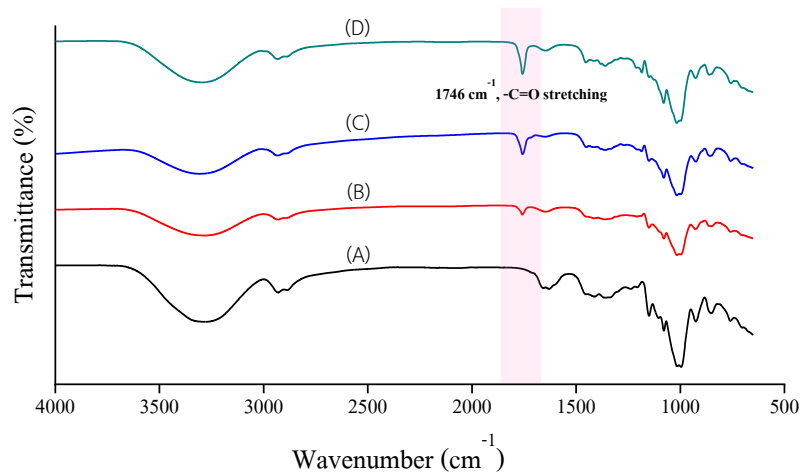


Figure 5 FT-IR spectra of TPS_{GS} and TPS_{GS} blends.

(A) TPS_{GS}, (B) TPS_{GS}+5PLL, (C) TPS_{GS}+10PLL and (D) TPS_{GS}+15PLL

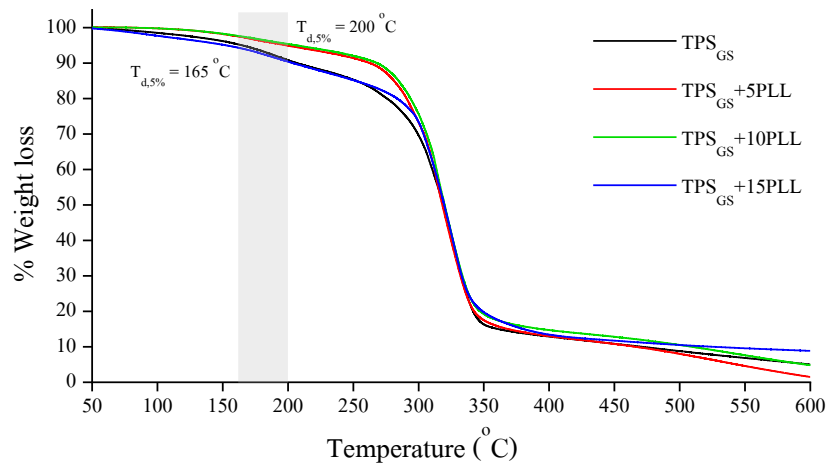
ผลทดสอบสมบัติเชิงกลแรงดึงของแผ่นพลาสติกพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+PLL ทั้งสามสูตรเทียบกับ TPS_{GS} ใน Table 3 พบว่าการเติม PLL 5 phr ลงใน TPS_{GS} ส่งผลให้ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และมอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ TPS_{GS} จากผลการศึกษาแสดงได้ว่าการมี PLL 5 phr เป็นองค์ประกอบใน TPS_{GS} นั้นสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลแรงดึงให้แก่แผ่นพลาสติก TPS ได้ โดยพิจารณาทั้งด้านความแข็งแรงเชิงกลและลักษณะทางกายภาพของแผ่นพลาสติกที่มีการกระจายตัวของ PLL ในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ PLL (10 และ 15 phr) ในพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้ PLL บางส่วนเกิดการรวมตัวกันเองและมีแนวโน้มเกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองจึงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลแรงดึง อีกทั้งเมื่อพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงดัง Figure 6 พบว่า TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+5PLL และ TPS_{GS}+10PLL มีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 5 ($T_{d,5\%}$) สูงกว่าถึง 35 °C เมื่อเทียบกับ

TPS_{GS} และ TPS_{GS}+15PLL จากผลดังกล่าวสามารถบอกโดยอ้อมได้ว่าการเติม PLL ปริมาณ 5 และ 10 phr นั้น มีแรงระหว่างยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล PLL กับ TPS_{GS} (interfacial interaction) ได้ดีทำให้เกิดการกระจายตัวของ PLL ใน TPS เมทริกซ์ได้อย่างสม่ำเสมอ (Li and Huneault, 2010) และยังเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่พอลิเมอร์พื้นฐาน (TPS_{GS}) อีกทั้งแผ่นพลาสติก TPS_{GS}+5PLL ยังมีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ TPS_{GS} 75° เป็น 77° แสดงได้ว่า PLL 5 phr สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำเล็กน้อย อันเนื่องมาจากโครงสร้างของ PLL มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Khumyat, 2015) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ปริมาณของ PLL 15 phr ในพอลิเมอร์ผสม TPS_{GS}+15PLL นั้นให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (71°) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ TPS_{GS} และ TPS_{GS}+5PLL เป็นผลมาจากการรวมตัวกันเองของอนุภาค PLL ที่มีปริมาณมากเกินไปใน TPS เมทริกซ์ ทำให้แผ่น TPS_{GS}+15PLL เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคจึงทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+15PLL ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมก่อนนำไปผสม

Table 3 Tensile properties of TPS_{GS} and TPS_{GS}+PLL blend sheets

Plastic sheets	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young' modulus (MPa)
TPS _{GS}	2.46±0.21 ^a	60.21±8.41 ^{a1}	62.95±3.14 ^{a2}
TPS _{GS} +5PLL	3.17±0.25 ^b	86.00±6.92 ^{b1}	107.76±7.69 ^{b2}
TPS _{GS} +10PLL	2.74±0.38 ^a	66.26±9.34 ^{c1}	90.50±14.84 ^{c2}
TPS _{GS} +15PLL	5.61±0.68 ^c	22.37±2.82 ^{d1}	268.63±11.90 ^{d2}

Note: Letters show statistically significant differences ($p < 0.05$) of each sample group using the Paired-Sample T-Test method

**Figure 6** TGA thermograms of TPS_{GS} and TPS_{GS}+PLL compounds.

จากผลการศึกษาปริมาณของ PLL มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+PLL เพื่อให้มีศักยภาพในการขึ้นรูปเป็นกระถางเพาะชำ โดยพิจารณาทางด้านความเข้ากันได้บางส่วน/การกระจายตัวของ PLL ในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์ ที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลแรงดึง เสถียรทางความร้อน รวมถึงสมบัติการต้านทานน้ำ พบว่าปริมาณของ PLL 5 phr มีความเหมาะสม สำหรับศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง TPS_{GS}+5PLL กับเส้นใยธรรมชาติ คือ ผักตบชวา (WH) และเปลือกถั่วลิสง (P) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้แก่ TPS_{GS}

3.3 ผลการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต TPS_{GS}/WHP/5PLL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องหลอมผสมภายในสภาวะการหลอมผสมที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยกระบวนการหลอมผสมพบว่าในกระบวนการหลอมผสมมีค่าแรงบิดหรือทอร์ก (torque)

ต่ำสุดของแกนหมุนในการบดผสมอยู่ในช่วง 13-17 Nm อีกทั้งยังพบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยผสม (WHP) เพิ่มขึ้น ค่าทอร์กต่ำสุดในการหลอมผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดขณะหลอม (melt viscosity) ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น ผลของค่าทอร์กที่สูงขึ้นส่งผลต่อการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย (WHP) ในเนื้อเมทริกซ์ (TPS_{GS}) ไม่สม่ำเสมอ (Suppakarn and Meekum, 2003) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ปริมาณ WHP ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

ผลการหลอมผสมของ TPS_{GS}+5PLL และเส้นใยเสริมแรง (WH และ/หรือ P) สูตรต่าง ๆ (Table 2) พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสามองค์ประกอบสามารถหลอมผสมเข้ากันและสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกได้ มีลักษณะสีน้ำตาลถึงสีน้ำตาลเข้มในทุกสูตร โดยอนุภาคเส้นใยกระจายตัวในเนื้อ TPS เมทริกซ์โดยไม่เกิดการแยกวัฏภาคเมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่าและภาพถ่ายดิจิทัล แสดงดัง Figure 7

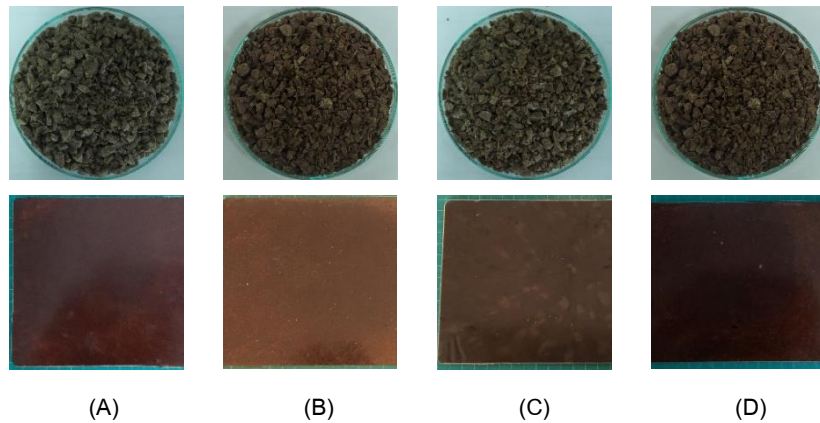


Figure 7 Physical appearance of polymer composites. (A) 90TPS_{GS}/10WH+5PLL, (B) 90TPS_{GS}/10P+5PLL, (C) 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL and (D) 80TPS_{GS}/20WHP+5PLL

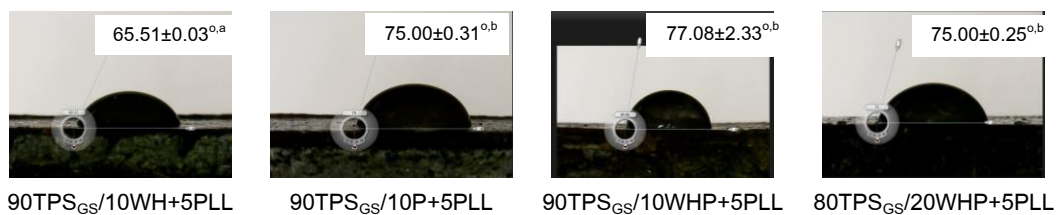


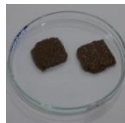
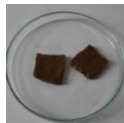
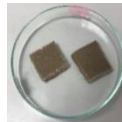
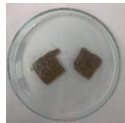
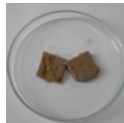
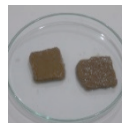
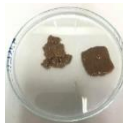
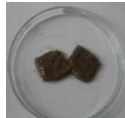
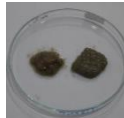
Figure 8 Contact angles of water droplet on natural fiber reinforced TPS_{GS}+5PLL sheets.

Note: Letter show the statistically significant difference ($p < 0.05$) of each sample using the Paired-Sample T-Test method

ผลการทดสอบมุมสัมผัสหยดน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิต ดัง Figure 8 พบว่าแผ่น 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL มีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำสูงที่สุด คือ 77° ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับ 90TPS_{GS}/10P+5PLL และ 80TPS_{GS}/20WHP+5PLL (75-77°) อย่างไรก็ตามพบว่าสูตรที่เสริมแรงด้วยผักตบชวาเพียงอย่างเดียว (90TPS_{GS}/10WH+5PLL) นั้นให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสูตรคอมพาวด์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยผสม (WHP) หรือเปลือกถั่วลิสง (P) เพียงอย่างเดียว จาก 75-77° เป็น 65.5° อันเป็นผลมาจากโครงสร้างภายในของผงลำต้นผักตบชวามีรูพรุนจำนวนมากทำให้สามารถดูดซับน้ำเข้าสู่ภายในได้มากกว่า (Ji *et al.*, 2021) เมื่อเทียบกับใช้เปลือกถั่วลิสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับผลการดูดซับน้ำ แสดงภาพถ่ายและร้อยละการดูดซับน้ำใน Table 4 ตามลำดับ พบว่าแผ่นพลาสติกคอมโพสิตมีแนวโน้มการดูดซับน้ำในลักษณะเดียวกันคือในช่วงแรก (0-12 ชั่วโมง) แผ่นพลาสติกมีอัตราการดูดซับน้ำอย่างรวดเร็วและเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง และมีการเปื่อยยุ่ยหรือ

แบ่งบางส่วนเกิดการละลายในน้ำกลั่น (72 ชั่วโมง) เมื่อพิจารณาผลการดูดซับแผ่นพลาสติก 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL และ 90TPS_{GS}/10P+5PLL นั้นมีลักษณะการดูดซับน้ำใกล้เคียงกันและยังมีร้อยละการดูดซับน้ำต่ำกว่า 90TPS_{GS}/10WH+5PLL อย่างเห็นได้ชัด และสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพด้วยภาพถ่ายพบว่าแผ่นพลาสติก 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL ยังคงมีความคงรูปเป็นแผ่นแต่มีลักษณะอ่อนนุ่มไม่เกิดการฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใย WHP ช่วยเพิ่มความสามารถการต้านทานน้ำให้แก่แผ่นพลาสติกคอมโพสิตได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นพลาสติกที่เสริมแรงด้วย WH เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามแผ่นพลาสติก 80TPS_{GS}/20WHP+5PLL พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปแทรกบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยผสมและ TPS เมทริกซ์ ส่งผลให้แผ่นพลาสติกเกิดการแตก/ฉีกขาดออกจากกันและในส่วนของ TPS เมทริกซ์เกิดการละลายน้ำได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับสูตรอื่นจนไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบได้

Table 4 Water absorption of natural fiber reinforced TPS_{GS}+5PLL sheets

Plastic sheets	Water absorption (%)					
	Time (hr)	3	6	12	24	72
90TPS _{GS} /10WH+5PLL		63.15±4.50	91.87±5.96	105.03±2.33	103.27±5.89	44.82±6.77
						
90TPS _{GS} /10WHP+5PLL		49.92±4.68	55.44±5.21	68.33±5.34	70.40±2.08	71.98±4.55
						
90TPS _{GS} /10P+5PLL		43.59±4.49	65.52±0.62	69.34±3.39	70.46±2.02	65.66±3.63
						
80TPS _{GS} /20WHP+5PLL		44.45±6.12	40.22±5.77	25.65±4.31	n/d	n/d
						

Note: Average and standard deviation values of three determinations by T-Test method ($p < 0.05$)

Table 5 Mechanical properties of TPS_{GS} polymer composites

Plastic sheet	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
90TPS _{GS} /10WH+5PLL	9.85±0.81 ^a	3.33±0.41 ^{a1}
90TPS _{GS} /10WHP+5PLL	7.94±0.33 ^b	20.39±2.67 ^{b1}
90TPS _{GS} /10P+5PLL	8.14±1.98 ^b	3.41±0.71 ^{a1}
80TPS _{GS} /20WHP+5PLL	7.42±0.41 ^c	12.91±1.87 ^{c1}

เมื่อพิจารณาผลสมบัติเชิงกลค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด (TS) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (EB) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สูตรต่าง ๆ แสดงใน Table 5 พบว่าแผ่น 90TPS_{GS}/10WHP/5PLL มีสมบัติเชิงกลแรงดึงโดยรวมดีกว่าสูตรอื่น ๆ คือ มีค่า TS แตกต่างกันเล็กน้อย (ช่วง 7.7-10 MPa) แต่มีร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด แสดงได้ว่าแผ่นพลาสติกสูตรคอมพาวด์นี้มีสมบัติเชิงกลแรงดึงดีกว่าสูตรอื่นที่ศึกษา

จากผลการศึกษาที่สามารถสรุปได้ว่าการเตรียมแผ่นพลาสติกคอมโพสิตนั้น พิจารณาทั้งการต้านทานน้ำ ความเสถียรภาพเมื่อสัมผัสน้ำที่มากเกินไปและสมบัติเชิงกลแรงดึงสูตรคอมพาวด์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปกระถางต้นไม้ คือ 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL เมื่อเทียบกับสูตรคอมพาวด์อื่นที่ศึกษา อย่างไรก็ตามสูตรคอมพาวด์นี้ยังมีข้อจำกัดทางสมบัติการต้านทานน้ำและสมบัติอื่น ๆ ในระยะเวลา

การใช้งานเป็นกระถางต้นไม้ที่ต้องทำการศึกษาและพัฒนาสมบัติในงานวิจัยต่อไป

3.4 ผลการขึ้นรูปกระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพต้นแบบ

จากการพิจารณาสมบัติเชิงกล ความต้านทานน้ำ รวมถึงศักยภาพในกระบวนการหลอมผสมและการขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพสูตร 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL เหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นกระถางเพาะชำต้นแบบด้วยเครื่อง ram extruder พบว่าลักษณะทางกายภาพของกระถางเพาะชำมีผิวมัน สีน้ำตาลเข้มซึ่งเป็นผลดีต่อรากที่ไม่ต้องการแสงแดดจึงไม่ต้องทำคอมพาวด์สีเพิ่มเติม (Figure 9) (The Petroleum and Petrochemical College, 2010)



Figure 9 Conical plant pots.

4. สรุป

การเตรียม TPS จากแป้งมันสำปะหลังและพลาสติกไซเซอรอลผสมระหว่างกลีเซอรอลกับซอร์บิทอล (อัตราส่วน 2:1) เมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกมีลักษณะพื้นผิวเรียบไม่เกิดรอยย่นและคงรูปเมื่อเทียบกับ TPS สูตรคอมพาวด์อื่น ๆ ผลการศึกษาสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ให้ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสสูง ให้สมบัติเชิงกลที่แข็งแรงและเหนียวกว่า TPS สูตรคอมพาวด์อื่น รวมถึงยังให้สมบัติต้านทานน้ำและเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าคอมพาวด์อื่น เนื่องจากโครงสร้างของกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีหมู่ไฮดรอกซิล จึงสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลแล้วไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลแป้งที่แข็งแรงกว่าพลาสติกไซเซอรอลสูตรอื่น และเมื่อนำ TPS_{GS} มาหลอมผสมร่วมกับ PLL ปริมาณ 5 phr สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลแรงดึงและเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่ TPS_{GS} อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถต้านทานน้ำให้ได้เล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ PLL เป็น 10 และ 15 phr พบว่าแนวโน้มความเข้ากันได้ระหว่าง TPS_{GS} และ PLL สังเกตได้จากวัฏภาคของ PLL อยู่รวมกันเป็นกลุ่มแยกจากวัฏภาคของ TPS_{GS} อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำ $TPS_{GS}+5PLL$ มาผสมแบบคอมโพสิตกับ WHP (อัตราส่วน WH:P คือ 1:1) ที่ปริมาณร้อยละ 10 พบว่าการใช้เส้นใยผสม นั้นให้สมบัติเชิงกลแรงดึงและความสามารถต้านทานน้ำได้ดีกว่าที่เสริมแรงด้วยผักตบชวาหรือเปลือกถั่วลิสงเพียงอย่างเดียวในปริมาณเดียวกัน (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) และลำดับสุดท้ายนำพอลิเมอร์คอมโพสิต $90TPS_{GS}/10WHP+5PLL$ สูตรคอมพาวด์นี้ ไปขึ้นรูปเป็นกระถางชีวภาพ มีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม ผิวเรียบและมีความมัน โดยการศึกษานี้ได้เม็ดคอมพาวด์ชีวภาพชนิดคอมโพสิตสูตร $90TPS_{GS}/10WHP+5PLL$ ที่สามารถขึ้นรูปเป็นกระถางชีวภาพต้นแบบด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้ง ซึ่งเม็ดคอมพาวด์ชีวภาพนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพทางการค้า ที่สะดวกต่อการนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการขึ้นรูปกระถางรูปทรงต่าง ๆ ตามความต้องการของลูกค้า อย่างไรก็ตามในงานวิจัยลำดับต่อไปพัฒนากระบวนการขึ้นรูปและศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของกระถางเพาะชำ เพื่อให้ได้กระถางเพาะชำต้นแบบที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน งบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ 2562 โดยได้รับการประเมินข้อเสนอจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งสาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และรองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนากร อาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ในการให้คำแนะนำและเครื่องมือการขึ้นรูปพลาสติก และสาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Bogracheva, T.Y., Wang, Y.L., Wang, T.L. and Hedley, C.L. 2002. Structural studies of starches with different water contents. **Biopolymers** 64: 268-281.
- Buachum, S. and Towatana, P. 2015. The utilization of aquatic weeds and agricultural residues for composting and planting material in Pak Phanang River basin, pp. 546-556. *In The 6th National and International Conference*. Suan Sunandha Rajabhat University, Thailand. (in Thai)
- Bunkerd, R., Molloy, R., Somsunan, R., Punyodom, W., Topham, P.D. and Tighe, B.J. 2018. Synthesis and characterization of chemically-modified cassava starch grafted with poly (2-ethylhexyl acrylate) for blending with poly(lactic acid). **Starch** 70: 1-10.
- Chiang, B.W., Ibrahim, N.A., Yunns, W.M.Z.W. and Hussein, M.Z. 2014. Poly(Lactic Acid)/Poly(Ethylene Glycol) Polymer Nanocomposites: Effects of Graphene Nanoplatelets. **Polymers** 6: 93-104.
- Fekete, E., Kun, D. and Móczó, J. 2018. Thermoplastic starch/wood composites: effect of processing technology, interfacial interactions, and particle characteristics. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering** 62(2): 129-136.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2021. **Assessment of Agricultural Plastics and Their Sustainability-A Call for Action**. FAO, Rome, Italy.
- Galdeano, M.C., Grossmann, M.V.E., Mali, S., Bello-Perez, L.A., Garcia, M.A. and Zamudio-Flores, P.B. 2009.

- Effects of production process and plasticizers on stability of films and sheets of oat starch. **Materials Science Engineering C** 29: 492-498.
- Gironès, J., López, J.P., Mutjè, P., Carvalho, A.J.F., Curvelo, A.A.S. and Vilaseca, F. 2012. Natural fiber-reinforced thermoplastic starch composites obtained by melt processing. **Composites Science and Technology** 72: 858-863.
- Grazuleviciene, T., Treinyte, J. and Zaleckas, E. 2012. Film-forming starch composites for agriculture applications. **Journal of Polymers and the Environment** 20: 485-491.
- Gupta, A. and Urahn, N. 2023. Sustainable bio-based planting pots as an approach to reduce plastic waste in the agriculture industry. **International Journal of Agriculture Innovation, Technology and Globalisation** 3(3): 215-244.
- Islam, M.N., Rahman, F., Papri, S.A., Faruk, M.O., Das, A.K., Adhikary, N., Debrot, A.O. and Ahsan, M.N. 2021. Water Hyacinth (*Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms.) as an alternative raw material for the production of bio-compost and handmade paper. **Journal of Environmental Management** 294: 1-9.
- Ji, M., Li, F., Li, J., Li, J., Zhang, C., Sun, K. and Guo, Z. 2021. Enhanced mechanical properties, water resistance, thermal stability, and biodegradation of the starch-sisal fibre composites with various fillers. **Materials and Design** 198: 1-10.
- Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H. and Yu, L. 2020. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research** 3(1): 8-18.
- Juanga-Labayen, J.P. and Yuan, Q. 2021. Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste Part B: Development and Evaluation of Seedling Pots. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 18: 1-14.
- Khumyat, N. 2015. Increasing Hydrophilicity of poly(lactic acid) by mixing with short chain PLA containing positive charges. Bachelor of Science (Chemistry), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Li, H. and Huneault, M.A. 2010. Comparison of sorbitol and glycerol as plasticizers for thermoplastic starch in TPS/PLA blends. **Journal of Applied Polymer Science** 19: 2439-2448.
- Lourdin, D., Bizot, H. and Colonna, P. 1997. Antiplasticization in starch-glycerol films. **Journal of Applied Polymer Science** 63(8):1047-1053.
- Ma, X.F., Yu, J.G. and Wan, J.J. 2006. Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer from thermoplastic starch. **Carbohydrate Polymers** 64: 267-273.
- Muller, P., Bere, J., Fekete, E., Moczo, J., Nagy, B., Kallay, M., Gyarmati, B. and Pukanszky, B. 2016. Interactions, Structure and Properties in PLA/Plasticized Starch Blends. **Polymer** 103: 9-18.
- Obasi, H.C. 2015. Peanut husk filled polyethylene composites: effects of filler content and compatibilizer on properties. **Journal of Polymers** 2015: 1-9.
- Paczkowski, P., Puszla, A. and Gawdzik, B. 2021. Effect of eco-friendly peanut shell powder on the chemical resistance, physical, thermal, and thermomechanical properties of unsaturated polyester resin composites. **Polymers** 13: 1-20.
- Paluch, M., Ostrowska, J., Tyński, P., Sadurski, W. and Konkol, M. 2022. Structural and thermal properties of starch plasticized with glycerol/urea mixture. **Journal of Polymers and the Environment** 30: 728-740.
- Piyang, T., Chaichan, W. and Sagulsawasdipan, K. 2018. Environment-friendly Plant Pot Production from Palm Oil Sludge and Mushroom Cultured Waste. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 10(3): 497-511.
- Qiao, X., Tang, Z. and Sun, K. 2011. Plasticization of Corn Starch by Polyol Mixtures. **Carbohydrate Polymers** 83: 659-664.
- Soontornchai, S., Lertwittuttipaiboon, S. and Tosing, P. 2016. Bioplastics from agricultural crops to health and environment. **Journal of Health Management** 3(1): 24-36. (in Thai)
- Sriroth, K. and Piyachomkwan, K. 2003. **Starch Technology** (3rd ed). Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Suppakarn, N. and Meekum, U. 2003. **Preliminary study for using starch as filler for biodegradable polymer**. Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Tanpaiboonkul, N., Budnumpetch, T., Sukaranadara, K. and Photilangka, P. 2022. Biodegradable pots from water hyacinth using cassava starch and cassava

- pulp as binder. **Huachiew Chalermprakit Science and Technology Journal** 8(1): 56-69.
- Tarique, J., Zainudin, E.S., Sapuan, S.M., Ilyas, R.A. and Khalina, A. 2022. Physical, Mechanical, and Morphological Performances of Arrowroot (*Maranta arundinacea*) Fiber Reinforced Arrowroot Starch Biopolymer Composites. **Polymers** 14(388): 1-21.
- Theamdee, P. and Rueangrung, J. 2019. The effect of glycerol content on physical and mechanical properties of the biodegradable film from sweet potato flour for plastic plant bag application. **Journal Science and Technology Ubon Ratchathani University** 21: 14-24. (in Thai)
- The Petroleum and Petrochemical College. 2010. **Development of plastic resins and compounds projects; plant bio-pot**. Master Plan. Intellectual Infrastructure. (in Thai)
- Triwises, P., Ruksakulpiwat, Y. and Ruksakulpiwat, C. 2016. The modification of tapioca starch by esterification technique. **Suranaree Journal of Science and Technology** 23(2): 157-165.
- Volpe, V., De, F.G., De, M.I. and Pantani, R. 2018. Use of sunflower seed fried oil as an ecofriendly plasticizer for starch and application of this thermoplastic starch as a filler for PLA. **Industrial Crops & Product** 122: 545-552.
- Zahiruddin, S.M.M., Othman, S.H., Tawakkal, I.S.M.A. and Talib, R.A. 2019. Mechanism and thermal properties of tapioca starch films plasticized with glycerol and sorbitol. **Food Research** 3(2): 157-163.
- Zhang, J.S., Yu, J.G., Wu, Y. and Ma, X.F. 2008. Synthesis of aliphatic amidediol and used as a novel mixed plasticizer for thermoplastic starch. **Chinese Chemical Letters** 19: 395-398.
- Zhong, Y. and Li, Y. 2014. Effects of glycerol and storage relative humidity on the properties of kudzu starch-based edible films. **Starch/Starke** 66: 524-532.

Research Article

การศึกษาแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและพื้นสแลทคอนกรีต

Study of Adhesion Force Between Rubber Pins and Concrete Slats

ศรัทธา ศรีวรรเดชไพศาล ^{a, d, e} นวลนพมล ศรีอุทัย ^bธีระวัฒน์ เพชรดี ^c และ อาทิตย์ สวัสดิ์รักษา ^{f*}Satta Srewaradachpisal ^{a, d, e}, Nuannoppamon Sri-Uthai ^b, Theerawat Petdee ^c and Arthit Sawatdiraksa ^{f*}^a สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110^a Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.^b สาขาวิทยาศาสตร์เกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110^b Department of Agriculture Science, Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya Nakhon Si Thammarat Campus, Thungsong, Nakhon Si Thammarat 80110, Thailand.^c สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000^c Department of Mechanical, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.^d ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110^d Center of Excellence in Metal and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.^e ศูนย์วิจัยอุตสาหกรรมอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110^e Smart Industry Research Center, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.^f สาขาเกษตรประยุกต์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110^f Department of Applied Agriculture, Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya Nakhon Si Thammarat Campus, Thungsong, Nakhon Si Thammarat 80110, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-23

Revised: 2024-09-30

Accepted: 2024-10-03

Keywords:

rubber pins;
concrete slats;
adhesive force;
friction

This investigation focused on the adhesion between rubber pins and concrete slats by creating a rubber material and testing the adhesion between natural rubber pins and concrete slats. The pin features 15 distinct contact areas and densities. The adhesion of the rubber pin to the slat was then evaluated using both pulling and pressing force. The size of the contact area and the thickness of the rubber pins were found to result in a strong bond between the rubber pins and the slat concrete. The finite element method was used to calculate the reaction force between different types of rubber pins and concrete slats. When calculating the theoretical holding force, it was found that the theoretical holding force tended to correspond with the experimental results. Consequently, the cohesive force between the rubber pin and the concrete slat is a result of the reaction force. The force increases when the contact area, thickness, and mechanical properties of the rubber pin material are enhanced. This study determines the reaction force between the rubber pin and the concrete slat using the finite element method, which can be utilized to predict the adhesion between rubber fasteners and concrete slats in order to design animal pen slabs.

* Corresponding author.

E-mail address: arthit.sa@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Srewaradachpisal, S., Sri-Uthai, N., Petdee, T. and Sawatdiraksa, A. 2025. Study of Adhesion Force Between Rubber Pins and Concrete Slats. **Recent Science and Technology** 17(3): 261936.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและพื้นสแลทคอนกรีต ด้วยการขึ้นรูปวัสดุยางและนำไปทดสอบค่าแรงยึดเกาะระหว่างสลักจากยางธรรมชาติและพื้นสแลทคอนกรีต โดยออกแบบสลักให้มีพื้นที่สัมผัสและความหนาที่แตกต่างกันจำนวน 15 รูปแบบ จากนั้นทดสอบแรงยึดเกาะของสลักยางกับสแลททั้งแบบแรงดึงและแรงกด พบว่าขนาดพื้นที่สัมผัสและความหนาของสลักยางจะส่งผลให้เกิดแรงยึดเกาะสูงระหว่างสลักยางกับสแลทคอนกรีต เมื่อใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสลักยางในรูปแบบต่าง ๆ กับสแลทคอนกรีต จากนั้นคำนวณแรงยึดตามหลักการทางพลศาสตร์พบว่าแรงยึดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีตเป็นผลมาจากแรงปฏิกิริยา ซึ่งแรงปฏิกิริยามีค่ามากขึ้นเมื่อพื้นที่สัมผัส ความหนาและสมบัติเชิงกลของวัสดุของสลักยางมีค่ามากขึ้น งานนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต ซึ่งสามารถนำไปคาดการณ์ให้หาค่าแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีตเพื่อใช้ในการออกแบบแผ่นปูคอกสัตว์ต่อไป

คำสำคัญ: สลักยาง, สแลทคอนกรีต, แรงยึดเกาะ, แรงเสียดทาน

1. บทนำ

การเลี้ยงสัตว์ในคอกบนสแลทคอนกรีตส่งผลให้เกิดปัญหาการบาดเจ็บและแผลที่เกิดขึ้นในสัตว์ (Kilbride *et al.*, 2009; Mack *et al.*, 2014; Carroll *et al.*, 2016) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความแข็งของสแลทคอนกรีต แผลที่เกิดขึ้นในสัตว์ส่งผลในการปัญหาต่อการเลี้ยงสัตว์ทั้งสุขภาพ โรคระบาดและค่าใช้จ่ายในการรักษา (Panivivat *et al.*, 2004; Linden, 2013; Jaborek *et al.*, 2016) ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาแผ่นปูสแลทจากวัสดุยางธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นสำหรับใช้ปูบนสแลทคอนกรีตเพื่อป้องกันดังกล่าวที่เกิดขึ้นในสัตว์ (Mekbungwan *et al.*, 1994; Samcklong *et al.*, 2004; Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 2013) แผ่นปูสแลทนั้นต้องสามารถยึดเกาะกับสแลทคอนกรีตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเลื่อนตำแหน่ง ถ้าเกิดความไม่เสถียรของการยึดติดระหว่างแผ่นปูสแลทกับคอนกรีต ความชื้นและสิ่งสกปรกที่สะสมใต้แผ่นปู การเสื่อมสภาพของวัสดุยึดเกาะ และการออกแบบที่ไม่เหมาะสมในการติดตั้ง เมื่อสัตว์เคลื่อนไหวสามารถทำให้แผ่นปูเลื่อนและหลุดได้ง่ายขึ้น

การยึดแผ่นปูสแลทกับสแลทคอนกรีต สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กาว การเจาะยึดด้วยสกรูแบบต่าง ๆ ซึ่งมีขั้นตอนการติดตั้งยากและค่าใช้จ่ายสูง การใช้สกรูยังมีโอกาสทำให้เกิดบาดแผลเพิ่มเติมได้จากความแข็งและความคมของสกรู เมื่อศึกษาข้อมูลผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ (EASYFIX Equine Persse Business Park Perssepark Ballinasloe Co, 2021) พบว่ามักมีการใช้สลักยางในการยึดติดกับสแลทคอนกรีต ซึ่งมีข้อดีเนื่องจากเป็นวัสดุเดียวกันกับผลิตภัณฑ์แผ่นปูสแลทสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นเดียวกันได้ และยังมีความอ่อนตัวไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายของสัตว์ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า (EASYFIX Equine Persse Business Park Perssepark Ballinasloe Co, 2021; Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 2013) สกรูหรือสัตว์เลี้ยงที่อาศัยบนพื้นที่ที่มีความอ่อนนุ่ม มีโอกาสเกิดแผลน้อยกว่า มีค่าใช้จ่ายในการดูแลน้อยกว่า ส่งผลทั้งสัตว์เลี้ยงและผู้เลี้ยงสัตว์ นอกจากนี้การศึกษารายการยึดเกาะระหว่างแผ่นยางกับ

สแลทคอนกรีต มีตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ แรงยึดเกาะและความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่ส่งผลต่อความคงทนของสแลท พบว่าแรงเสียดทานที่มีค่าสูงจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของแผ่นสแลทนานขึ้น (Penev, 2013) อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์หาค่าแรงเสียดทานระหว่างแผ่นยางกับสแลทคอนกรีต ที่ส่งผลต่อแรงดันภายในบริเวณกึ่งเท้าของสัตว์ โดยได้นำระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์โมเดลพื้นยางที่เป็นวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับการออกแบบร่วมด้วย (Telezhenko *et al.*, 2008) เพื่อลดต้นทุนและประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ออกแบบ

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนใหญ่ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานระหว่างแผ่นยางกับพื้นคอนกรีต ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของแผ่นพื้นปูคอกสัตว์เท่านั้น แต่ยังไม่พบการศึกษาพื้นที่ผิว รูปแบบของสลักยางต่อการยึดเกาะระหว่างแผ่นยางกับสแลทคอนกรีต ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการพัฒนาแผ่นยางกับสแลทคอนกรีตเพื่อลดการบาดเจ็บซึ่งส่งผลต่อสุขภาพที่ดีของสัตว์

ดังนั้นในงานนี้จึงได้ทำการศึกษาแบบสลักยางสำหรับป้องกันไม่ให้แผ่นปูสแลทเกิดการเลื่อนตำแหน่งจากสแลทคอนกรีต การยึดเกาะของสแลทยางกับสแลทคอนกรีตจะเป็นในลักษณะของแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงปฏิกิริยาระหว่างผิวทั้ง 2 ของวัสดุ ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงปฏิกิริยาประกอบด้วยรูปร่างของสลักยาง (ความหนา ความยาวและความสูง) และสูตรยาง (สมบัติเชิงกลของวัสดุ) โดยจากงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุยาง (Suso, 2011; Kaewsakul *et al.*, 2016; Chookate, 2019; Kaewpa *et al.*, 2019) ซึ่งเป็นวัสดุยางมีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการหาค่าแรงปฏิกิริยาต้องใช้วิธีการทางกลศาสตร์วัสดุร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากช่วยลดต้นทุนในการออกแบบ

โดยในงานนี้เริ่มจากการออกแบบสลักยาง 15 รูปแบบ แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงยึดเกาะของสลักยางเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างแผ่นปูสแลทกับสแลทคอนกรีตและใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาขนาดแรงปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าแรงยึดเกาะ

หรือแรงเสียดทานตามทฤษฎีทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ เพื่อเป็นวิธีการที่ใช้ในการออกแบบสลักยางสำหรับยึดเกาะแผ่นปูสแลทคอนกรีตต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบสลักยาง

การออกแบบสลักยางสำหรับศึกษาแรงยึดเกาะป้องกันการลื่นไถลของแผ่นปูสแลท เริ่มจากการศึกษาขนาดของร่องระหว่างสแลทคอนกรีตซึ่งมีลักษณะร่องเอียงแบบเทเปอร์โดยมีขนาดด้านแคบและด้านกว้างเท่า 10 มม. และ 15 มม. ตามลำดับ แล้วจึงทำการออกแบบสลักยางทั้งหมด 3 รูปแบบ ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2021 ดังแสดงในภาพที่ 1a) โดยมีแนวคิดที่ว่าสลักจะมี

แรงยึดมากขึ้นเมื่อมีแรงเสียดทานระหว่างสลักและผิวคอนกรีตมากขึ้น ซึ่ง Model A และ Model B จะใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของพื้นที่ผิวสัมผัสของสลักยางกับสแลทคอนกรีต ในส่วนของ Model C ออกแบบมาเพื่อให้สามารถติดตั้งในสแลทคอนกรีตได้ง่ายขึ้นโดยการเจาะรูขนาด 5 มม. ที่บริเวณปลายสลักยางเพื่อให้สามารถใส่ลงในร่องสแลทคอนกรีตได้ง่ายขึ้น โดยรูปแบบที่แตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบส่งผลต่อความแตกต่างของแรงเสียดทาน เมื่อติดตั้งสลักยางกับสแลทคอนกรีตจะแสดงดังภาพที่ 1b) โดยแต่ละรูปแบบจะมีการศึกษาขนาดที่แตกต่างกัน 5 ขนาด โดยขนาดของรูปแบบที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 1 โดยที่สัญลักษณ์ a, b และ c หมายถึงความยาวของชิ้นตัวอย่าง (ขนาดของ Z ในรูปที่ 1) ที่ขนาด 10, 20 และ 30 มม. ตามลำดับ

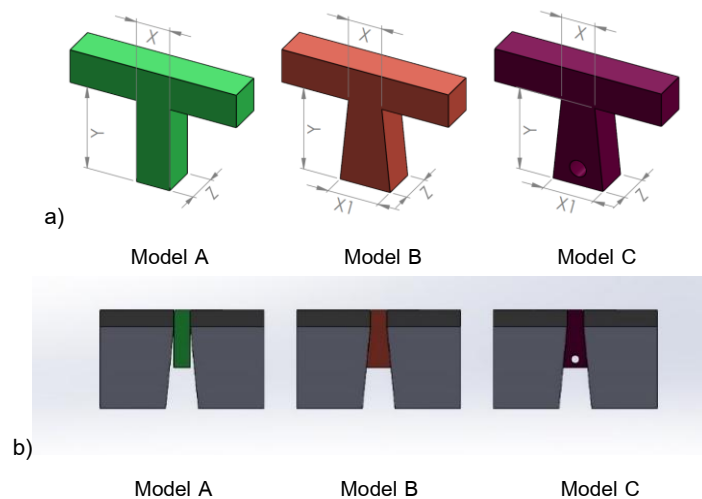


Figure 1 a) Various formats of rubber latch. b) Installation of rubber bolts to concrete slats.

Table 1 Various sizes of various formats of rubber latch.

Designs	X (mm)	X1 (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Model A 10mm-a	10.35	-	25	10
Model A 10mm-b	10.70	-	25	10
Model A 10mm-c	11.05	-	25	10
Model A 20mm-a	10.35	-	25	20
Model A 30mm-a	10.35	-	25	30
Model B 10mm-a	10.35	15.35	25	10
Model B 10mm-b	10.70	15.70	25	10
Model B 10mm-c	11.05	16.05	25	10
Model B 20mm-a	10.35	15.35	25	20
Model B 30mm-a	10.35	15.35	25	30
Model C 10mm-a	10.35	15.35	25	10
Model C 10mm-b	10.70	15.70	25	10
Model C 10mm-c	11.05	16.05	25	10
Model C 20mm-a	10.35	15.35	25	20
Model C 30mm-a	10.35	15.35	25	30

2.2 การเตรียมชิ้นงาน

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาเลือกใช้วัสดุยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับแผ่นปูลาต สำหรับสูตรยางเบื้องต้นในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2 โดยประยุกต์มาจากเทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์ (Plastics Institute of Thailand, 2014) ประกอบด้วยยาง NR (STR5L) ใช้คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black:CB) เกรด N-330 (N-330 ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร) เป็นสารเสริมแรงและมีการใช้น้ำมันพาราฟิน (PO เกรด A เบอร์ 15) เป็นพลาสติกไซเซอร์เพื่อช่วยในการกระจายตัวของฟิลเลอร์ สำหรับซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก วังสเตย์ แอล 2-เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (MBT) และซัลเฟอร์ ซึ่งยางในสูตรนี้มีการใช้สารตัวเติมแบบเสริมแรงที่ 30 phr เพื่อให้ได้ที่มีความแข็งแรงและสมบัติที่ดีต่อความคงทนต่อสภาพแวดล้อม

Table 2 Quantity of chemicals used in rubber compound.

The ingredients	Quantity (phr)
Natural rubber (STR 5L)	100
Carbon Black (CB)	30
stearic acid	1
ZnO	5
wingstay L	1
MBT	0.5
sulphur	1.5
spindle oil	3

การเตรียมยางคอมพาวด์มีวิธีการดังนี้ เริ่มจากการนำยางธรรมชาติบดในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 90 °C ที่ความเร็วลูกกลิ้ง 30 รอบต่อนาที จากนั้นจึงเติมพลาสติกไซเซอร์และสารตัวเติมตามสูตร เพื่อผสมภายในเวลา 30 นาที หลังจากนั้น

จึงนำคอมพาวด์มาผสมกับ ซิงค์ออกไซด์, กรดสเตียริก และ วังสเตย์แอล ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two mill machine) ให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นจะนำคอมพาวด์ที่ผสมแล้วออกจากเครื่องผสมเพื่อให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปผสมกับ MBT และกำมะถัน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการขึ้นรูปใช้วิธีการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์และเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C ที่เวลา 15 นาที เพื่อเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงยึดของสัณฐานและการทดสอบสมบัติเชิงกล

2.3 การทดสอบแรงยึดของสัณฐาน

สัณฐานวิทยาชิ้นงานนี้ทำหน้าที่ในการยึดเกาะแผ่นปูลาตจากยางธรรมชาติกับสแลทคอนกรีตเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นปูลาตเกิดการเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นจะเป็นการวัดเพื่อหาค่าแรงสูงที่สุดที่ทำให้แผ่นสแลทเกิดการเลื่อนไถล โดยทำการทดสอบ 2 วิธี ประกอบด้วย

- 1) วิธีทดสอบแรงดันด้วยเครื่องทดสอบสมบัติวัสดุมาตรฐาน (Universal testing machine) Instron รุ่น 8872 ดังแสดงในภาพที่ 2a) โดยติดตั้งสัณฐานบนแผ่นปูลาตและสแลทคอนกรีตให้เครื่องทดสอบออกแรงดันที่แผ่นปูลาตบันทึกค่าแรงจากโหลดเซลล์เมื่อแผ่นปูลาตเกิดการเลื่อนไถล
- 2) วิธีทดสอบด้วยการดึงชิ้นงาน โดยติดตั้งสัณฐานยึดติดกับแผ่นปูลาตและสแลทคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 2b) ทำการออกแรงดึงที่แผ่นปูลาตออกแรงดึงบันทึกค่าแรงสูงสุดเมื่อแผ่นปูลาตเกิดการเลื่อนไถล โดยใช้เครื่องวัดแรงดึง รุ่น Leo310 SF-50 โดยในแต่ละการทดสอบแรงยึดจะใช้สัณฐานแบบละ 1 ตัว และดำเนินการทดสอบจำนวน 3 ครั้งเพื่อมาคำนวณหาค่าของแรงยึด

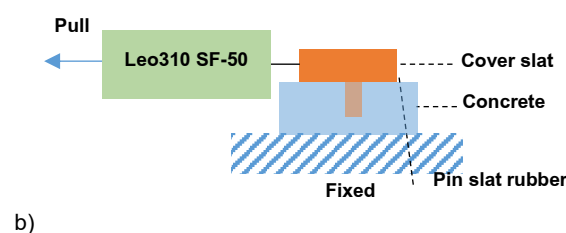
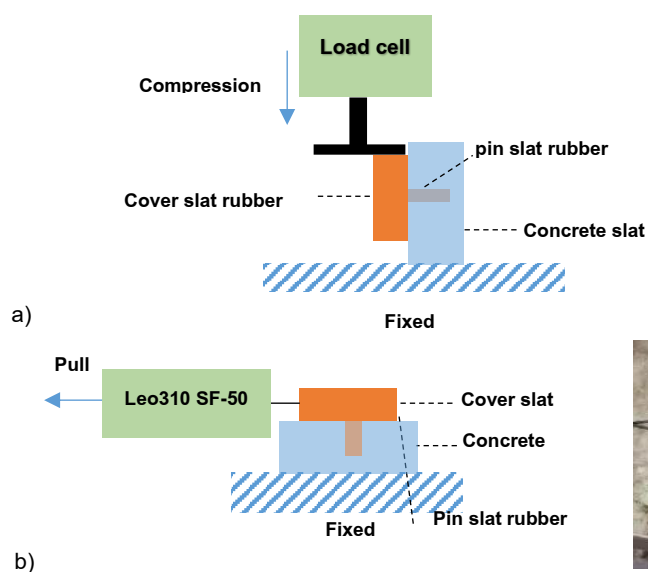


Figure 2 a) Pressure testing with Universal testing machine, b) Tensile testing with a tensile force meter (Leo310-SF-50)

2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณค่าแรงยึดติดของยางกับสแลทคอนกรีต ดำเนินการด้วยวิธีมาตรฐานตาม ASTM 575-91 โดยเตรียมชิ้นวัสดุ สำหรับทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 มม. หนา 12.5 มม. จำนวน 3 ชิ้น สำหรับใช้ในการทดสอบแรงกดเพื่อให้ได้ค่าตัวแทนสมบัติของวัสดุ โดยการกดชิ้นวัสดุตัวอย่างที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาของชิ้นวัสดุตัวอย่าง ที่ความเร็ว 10 มม.ต่อนาที ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติวัสดุมาตรฐาน (Universal testing machine) ยี่ห้อ Zwick/Roell รุ่น Z010 ด้วย Load cell ขนาด 1 kN เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

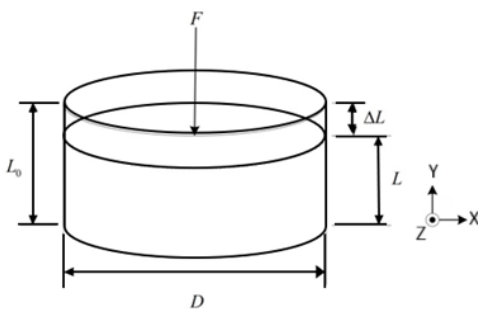


Figure 3 The relationship between stress and contraction rate under uniaxial compression.

$$\text{ความเค้น (stress)} \quad \sigma = \frac{F}{A_0}, A_0 = \pi \frac{D^2}{4} \quad (1)$$

$$\text{ความเครียด (strain)} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

สมบัติการรับแรงอัด (compression) ของวัสดุอย่างรูปทรงกระบอกจะแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (stress, σ) และความเครียด (strain, ε) ตามสมการ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ของตัวแปรต่าง ๆ ประกอบด้วย D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, L_0 คือความสูงของชิ้นงาน, L คือความสูงของชิ้นงานเมื่อเกิดการยุบตัว, ΔL คือผลต่างของความสูงของชิ้นงานเมื่อรับแรงกด, A_0 คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน และ F คือแรงกดที่กระทำต่อชิ้นงาน สำหรับการศึกษาการทดสอบสมบัติการรับแรงกดแสดงดังภาพที่ 3 อย่างไรก็ตามในระหว่างการทดสอบพื้นที่หน้าตัดของยางจะมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือพื้นที่หน้าตัดของยางจะเพิ่มขึ้นในแนวข้างตามระยะที่ยางยุบตัว แต่การทดสอบส่วนใหญ่กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของยางมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าเดิม

2.5 การคำนวณแรงยึดติดของสลักยาง

การคำนวณแรงยึดติดของสลักยางกับสแลทคอนกรีตสามารถพิจารณาตามแผนภาพอิสระการรับแรงของสลักยางดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าแรงเสียดทาน (frictional force, f) จะเกิดขึ้นที่ผิวทั้ง 2 ด้านของสลักยาง ดังนั้น แรงยึด (Adhesive force, F) จะเป็น 2 เท่าของแรงเสียดทาน

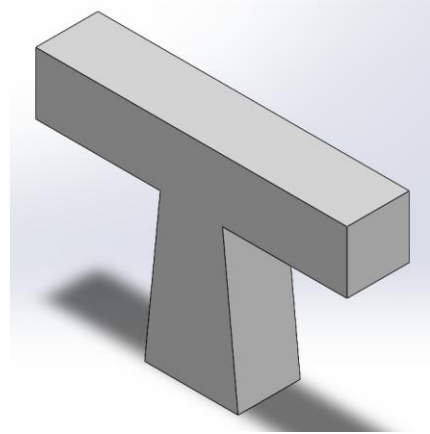


Figure 4 Free body diagram of friction.

ค่าแรงเสียดทานสามารถคำนวณหาโดยใช้สมการ 3 ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ_k) คูณอยู่กับค่าแรงตั้งฉากระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ($N_{\text{ในแนวตั้งฉาก}}$)

$$F_{\text{friction}} = \mu_k \times N_{\text{ในแนวตั้งฉาก}} \quad (3)$$

โดยจากการศึกษาของมูลของงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางและคอนกรีต (μ_k) มีค่าที่เท่ากับ 0.75 สำหรับค่าแรงตั้งฉากระหว่างระหว่างสลักยางกับสแลทคอนกรีตในงานนี้จะใช้โปรแกรม SolidWorks 2021 ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าแรงยึดเกาะหรือแรงเสียดทานต่อไป

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 แรงยึดระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต

เมื่อขึ้นรูปสลักยางเพื่อทำการทดสอบแรงยึดเกาะ โดยการติดตั้งสลักยางยึดแผ่นยางปูสแลทติดกับสแลทคอนกรีตแล้วดำเนินการทดสอบโดยการออกแรงดันด้วยเครื่องทดสอบวัสดุมาตรฐาน (Instron-8872) ทำการบันทึกค่าแรงด้วยโหลดเซลล์ ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5a) การทดสอบแบบแรงดึง โดยการออกแรงดึงผ่านเครื่องวัดแรงดึงรุ่น Leo310 SF-50 ทำการอ่านและบันทึกค่าแรงสูงสุดเมื่อสลักยางเกิดการเลื่อนตัว ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5b)

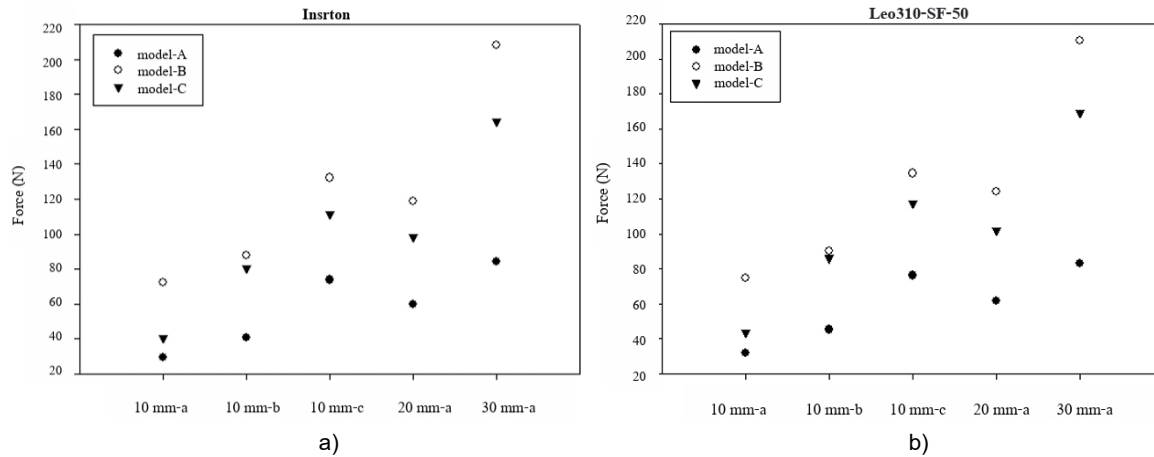


Figure 5 Adhesion test results. a) From Universal testing machine. b) From Tensile force meter. (Leo310-SF-50)

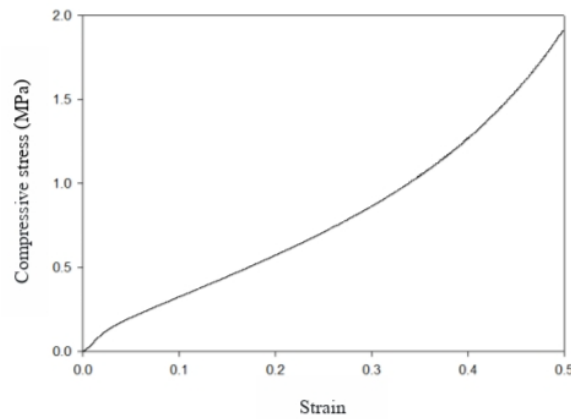


Figure 6 Compressive stress and strain of rubber materials.

จากผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีมีค่าแรงยึดเกาะสอดคล้องกัน และมีความใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่า Model B มีค่าแรงยึดเกาะสูงสุดในทุกรูปแบบทั้งการออกแรงดึงและแรงกดในแนวราบ รองลงมาคือ Model C และ Model A ตามลำดับ และพบว่าเมื่อสลักยางที่มีความหนา (ค่า x และ $x1$) และความยาว (ระยะ z) มากขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเพิ่มมากขึ้นสอดคล้องตามหลักการกลศาสตร์ของวัสดุและหลักการตามพลศาสตร์การเคลื่อนที่ (Russell, 2010; Ferdinand *et al.*, 2017) โดยพบว่าสลักยางใน Model B (รูปแบบ 30 mm-a) ที่มีความยาว 30 มม. มีค่าแรงยึดมากที่สุด และ Model A (รูปแบบ 10 mm-a) มีค่าแรงยึดน้อยที่สุด สำหรับรูปแบบ 10 mm-c มีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบ 20 mm-a และเมื่อเปรียบเทียบกันเฉพาะใน Model A จะพบว่ารูปแบบ 10 mm-c มีค่าสูงกว่ารูปแบบ 10 mm-b และ รูปแบบ 10 mm-a ตามลำดับ

3.2 ผลการทดสอบสอบการรับแรงกด

เมื่อขึ้นรูปวัสดุยางเป็นชิ้นตัวอย่างและนำไปทดสอบสมบัติการรับแรงกดตามมาตรฐาน ASTM D575-91 พบว่าสมบัติเชิงกลภายใต้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุแสดงพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังภาพที่ 6

3.3 การคำนวณแรงปฏิริยาระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต

แรงปฏิริยาระหว่างสลักยางและผนังสแลทคอนกรีตจะขึ้นกับสูตรยาง ระยะอัดตัว และขนาดพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสอง ซึ่งในวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบเป็นเชิงเส้นจะสามารถหาค่าแรงปฏิริยาได้ตามกฎของฮุก (Hooke's law) แต่สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือวัสดุแบบ hyper elastic จะต้องทำการวิเคราะห์การยืดตัวหรือยุบตัวแบบ large strain ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้วิเคราะห์วัสดุยางเพื่อให้มีค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้น และนิยามค่าแรงดังกล่าวโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในงานนี้ใช้โปรแกรม SolidWorks 2021 ในการวิเคราะห์หาค่าแรงปฏิริยาที่สลักยางในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้สมบัติการรับแรงกดในการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear elastic) ดังแสดงในภาพที่ 7a) จำลองกดให้สลักยางเกิดการยุบตัวตามระยะอัดตัว (Compression stroke (mm)) เมื่อติดตั้งกับสแลทคอนกรีตของแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 7b) โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เพื่อหาค่าแรงปฏิริยาที่สลักยางดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเป็นการแบ่งเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้าแบบ 16 โหนด ดังแสดงในภาพที่ 7c) และทำการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

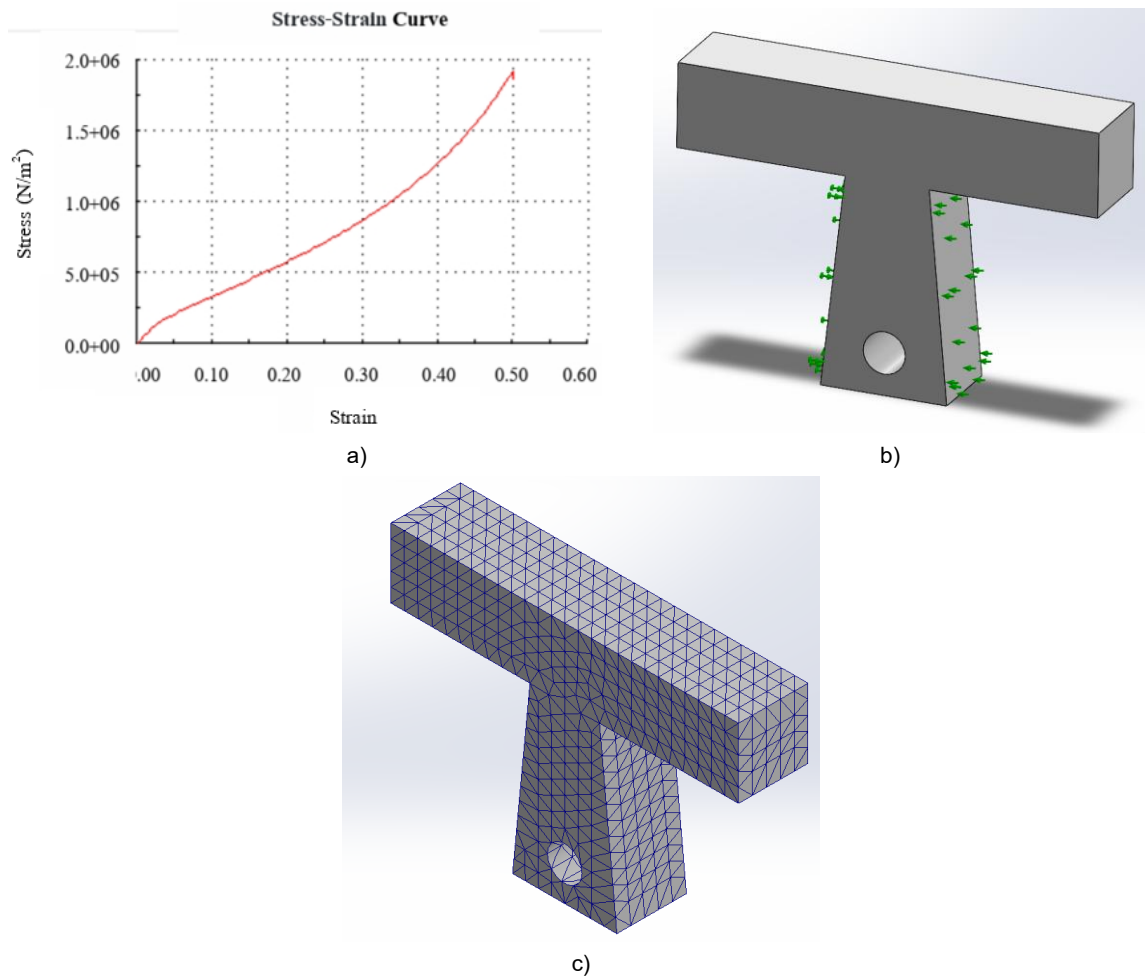


Figure 7 a) Determination of mechanical properties tests for use in finite element analysis. b) Boundary conditions used to analyze the reaction force of rubber latch. c) Finite element nodes

Table 3 Different pattern size of rubber latch.

Designs	Area (mm ²)	Compression stroke (mm)	Total nodes	Total elements	Reaction force (N) Result of FEM
A 10mm-a	100	0.350	8595	5446	20.6
A 10mm-b	100	0.700	8595	5446	35.5
A 10mm-c	100	1.050	8595	5446	51.9
A 20mm-a	200	0.350	16342	10698	45.3
A 30mm-a	300	0.350	22497	14846	69.8
B 10mm-a	250	0.350	11833	7536	40.1
B 10mm-b	250	0.700	11833	7536	64.8
B 10mm-c	250	1.050	11833	7536	92.8
B 20mm-a	500	0.350	21689	14260	78.4
B 30mm-a	750	0.350	30369	20167	120.8
C 10mm-a	200	0.350	11860	7506	34.0
C 10mm-b	200	0.700	11860	7506	58.0
C 10mm-c	200	1.050	11860	7506	82.5
C 20mm-a	400	0.350	21704	14157	70.1
C 30mm-a	600	0.350	30896	20399	107.8

โดยจากผลการวิเคราะห์เมื่อกดยางที่ระยะยวบตัวที่ระยะต่าง ๆ พบว่าค่าแรงปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดความหนาและพื้นที่สัมผัส โดย Model B มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด รองลงมาคือ Model C และ Model A ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของความยาวของสลักยาง (พื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น) ในแต่ละรูปแบบ พบว่าที่ความยาว 30 มม. มีแรงปฏิกิริยาสูงสุด รองลงมาคือที่ความยาว 20 มม. และที่ความยาว 10 มม. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบขนาดระยะอัดตัวที่มากขึ้น (ความหนาที่มากขึ้น) ในแต่ละรูปแบบ พบว่าที่ระยะอัดตัว 1.05 มม. มีแรงปฏิกิริยาสูงสุด รองลงมาคือที่ระยะอัดตัว 0.70 มม. และ 0.35 มม. ตามลำดับเมื่อพิจารณาที่พื้นที่ (Area) เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความยาว (ขนาด Z) และระยะอัดตัว พบว่าที่ยาว 10 มม. ระยะอัดตัว 1.05 มม. มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงกว่าสลักยางที่ โดยที่ระยะอัดตัว 0.35 มม. ยาว 20 มม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่สัมผัสและความหนาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงปฏิกิริยามีค่ามากขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน

3.4 การเปรียบเทียบแรงยึดระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต

แรงปฏิกิริยาซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของยาง พื้นที่สัมผัสและความหนา ซึ่งการจำลองในงานนี้เป็นการลดความซับซ้อนของปัญหาให้ง่ายขึ้น โดยการลดความซับซ้อนของรูปแบบ (simplified model) ด้วยการวิเคราะห์เฉพาะส่วนของสลักเท่านั้น (ไม่ได้ทำการวิเคราะห์แผ่นปูลาดทั้งแผ่น) แม้ว่าความสามารถของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ประมวลผลในปัจจุบันสามารถวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งชิ้นได้ แต่ก็ให้เวลาในการประมวลผลที่นานและใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูงมากกว่า

ภาพที่ 8 แสดงค่าแรงยึดเกาะของสลักยางในแต่ละรูปแบบประกอบด้วยทางทฤษฎี (Theory) ได้จากค่าแรงปฏิกิริยา (ซึ่งได้จากการใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) เปรียบกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (สมการ 3) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงยึดของสลักยางจากเครื่องทดสอบวัสดุมาตรฐาน (Instron-8872) และเครื่องวัดแรงดึงรุ่น Leo310 SF-50 ใน Model A-C พบว่ามีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจริง

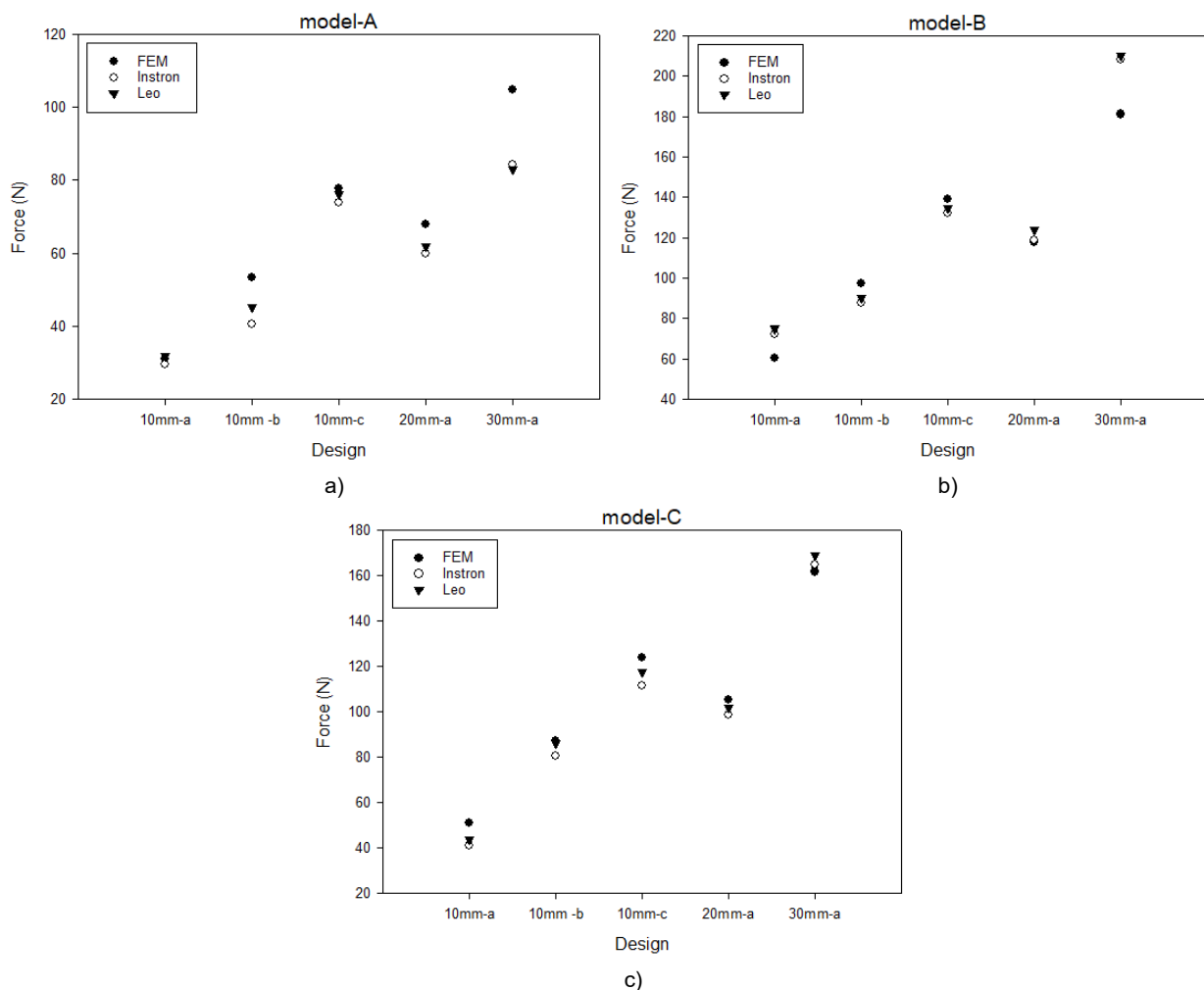


Figure 8 The calculation results are compared with the experimental results. a) Model A, b) Model B and c) Model C

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบ สามารถหาได้จากสมการที่ 4 ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%error) เฉลี่ยอยู่ที่ 6 เปอร์เซ็นต์ เช่น รูปแบบ Model-C 20mm-a แต่ในบางกรณีมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง เช่น Model-A 30mm-a ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการตรวจพบว่าเกิดขึ้นตัวอย่างมีทดสอบมีค่าแตกต่างจากแบบจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีขนาดเล็กกว่าแบบจำลองจึงมีค่าแรงยึดเกาะน้อยกว่า ทำให้เกิดค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถปรับได้โดยการปรับแบบจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับการทดสอบจริง

$$\%error = \frac{FEM-Exp}{FEM} \times 100 \quad (4)$$

ผลการคำนวณให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบในเกือบทุกโมเดล โดย Model B ให้ค่าแรงยึดสูงสุด รองลงมาคือ Model C และ Model A ตามลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องตามค่าแรงปฏิกิริยาและขึ้นอยู่กับรูปแบบ ความหนา ความยาวและสมบัติเชิงกลของวัสดุของสลักยาง โดยเมื่อค่าแรงปฏิกิริยามีค่าสูงมากขึ้นจะส่งผลให้แรงยึดเกาะมีค่าสูงมากขึ้นและให้ผลสอดคล้องกับการทดลองด้วย

4. สรุป

จากการศึกษาในงานนี้ทำการศึกษาระงัดเกาะระหว่างสลักยางกับสแลทคอนกรีต เพื่อใช้ในการป้องกันไม่ให้แผ่นปูสแลทเกิดการเลื่อนตำแหน่ง พบว่าค่าแรงยึดเกาะจะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสแลทกับสลักยาง ในงานนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาค่าแรงปฏิกิริยาของสแลทและสลักยางเพื่อใช้ในการคำนวณค่าแรงยึดเกาะ ซึ่งให้ผลการคำนวณสอดคล้องการทดลองเป็นอย่างดี โดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าสูงมากกว่าการทดลองจริงเล็กน้อย เนื่องจากปัจจัยของการขึ้นรูปต่อคุณภาพของชิ้นงานและความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบต่าง ๆ นอกจากนั้นในงานนี้ไม่ได้ทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดระหว่างวัสดุยางและคอนกรีต ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้มาจากการศึกษาข้อมูลย้อนหลัง อย่างไรก็ตาม ในงานนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงวิธีการหาค่าแรงปฏิกิริยาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสลักยางซึ่งมีพฤติกรรมของวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบสลักยางใหม่ (เมื่อมีการปรับปรุงร่างและสูตรยาง) สำหรับหาค่าแรงยึดเกาะเพื่อป้องกันการเลื่อนตำแหน่งของแผ่นปูสแลทรองคอกสัตว์ หรืองานอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับแรงเสียดทานได้ต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

ตามหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ผลลัพธ์หรือคำตอบจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เมื่อแบบจำลองมี

ความถูกต้อง ใกล้เคียงกับปัญหาจริง อย่างไรก็ตามในงานนี้เป็นการจำลองโดยการลดความซับซ้อนของปัญหาให้ง่ายขึ้นด้วยการลดความซับซ้อนของรูปแบบ (simplified model) แม้ความสามารถของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ประมวลผลในปัจจุบันสามารถวิเคราะห์แรงยึดระหว่างสลักยางและสลักคอนกรีตได้ แต่ก็ให้เวลาในการประมวลผลที่นานและใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูงมากกว่า ดังนั้นการลดรูปแบบของปัญหาให้ง่าย และให้ผลใกล้เคียงและสอดคล้องกับการทดลองถือว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีการยาง วิทยาลัยนานาชาติยางพาราไทย-จีน ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับสถานที่อุปกรณ์ในการดำเนินงาน และทุนวิจัยจากการยางแห่งประเทศไทย (กยท.) ขอบขอบคุณที่ช่วยที่ร่วมมือกันจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Carroll, G.A., Boyle, L.A., Teixeira, D.L., Van Staaveren, N., Hanlon, A. and O'Connell, N.E. 2016. Effects of Scalding and Dehairing of Pig Carcasses at Abattoirs on The Visibility of Welfare-Related Lesions. **Animal** 10(3): 460-467.
- Chookate, A. 2019. Properties Improvement and Cost Reduction of Artificial Slatted Woods from Reclaimed Natural Rubber/ Ethylene-Vinyl Acetate Blends. Master degree of Science (Polymer Science and Technology), Faculty of Science, Department of Polymer Science and Technology, Prince of Songkla University. (in Thai)
- EASYFIX Equine Persse Business Park Perssepark Ballinasloe Co. 2021. Galway, Ireland. **SR Slat Rubber**. Available Source: <https://easyfix.com/product/sr-slat-rubber/>, March 12, 2021.
- Ferdinand, P.B., Elwood, R.J.Jr., John, T.D., David, F.M. and Sanjeev, S. 2017. **Mechanics of materials** (5thed). McGraw-Hill Publishers, New York.
- Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. 2013. **Industrial product standards for animal pen floor mats**. TIS 2041 - 2013. Government Gazette

- page10, vol. 130, special part 52 d. (date April 26, 2013). (in Thai)
- Jaborek, J.R., Lowe, G.D. and Fluharty, F.L. 2016. Effects of Pen Flooring Type and Bedding on Lamb Growth and Carcass Characteristics. **Small Ruminant Research** 144: 28-34.
- Kaewpa, P., Tepvisut, R. and Pechurai, W. 2019. Effect of Carbon Black/CaCO₃ Ratio on Mechanical Properties of Nature Rubber Stall Mat, pp. 989-997. *In The 13th Research Administration Network of Conference*. Chiangmai University, Chiangmai Grandview Convention Center. (in Thai)
- Kaewsakul, W., Jandam, N., Kalkornsurapranee, E., Saiwari, S. and Thitithammawong, A. 2016. High Modulus Rubber Vulcanizates from Natural Rubber/EVA Blends Filled with Reinforcing Fillers. **Advanced Materials Research** 1134: 171-177.
- KilBride, A., Gillman, C., Ossent, P. and Green, L. 2009. Impact of Flooring on The Health and Welfare of Pigs. **In Practice** 31(8): 390-395.
- Linden, J. 2013. **Advice on Floor Types and Maintenance to Reduce Leg Problems and Improve Health and Hygiene in no. 37 in the 'Action for Productivity' series from BPEX**. Available Source: <https://www.thepigsite.com/articles/flooring>, March 12, 2021.
- Mack, L.A., Lay Jr, D.C., Eicher, S.D., Johnson, A.K., Richert, B.T. and Pajor, E.A. 2014. Group Space Allowance has Little Effect on Sow Health, Productivity, or Welfare in A Free-Access Stall System. **Journal of Animal Science** 92(6): 2554-2567.
- Mekbungwan, A., Yothinsirikul, W. and Khanthaprab, S. 1994. **Research Report on Effects of Floors Types on The Growth Performance in Growing Pigs. (weight 10-30 kg.)**. Maejo Institute of Agricultural Technology, Maejo University. (in Thai)
- Panivivat, R., Kegley, E.B., Pennington, J.A., Kellogg, D.W. and Krumpelman, S.L. 2004. Growth Performance and Health of Dairy Calves Bedded with Different Types of Materials. **Journal of Dairy Science** 87(11): 3736-3745.
- Penev, T., Miteva, C., Dimova, V., Roydev, R., Mitev, J. and Manolov, Z. 2013. Assessing frictional properties of rubber floors in free housing systems for dairy cows. **Trakia Journal of Sciences** 2: 197-204.
- Plastics Institute of Thailand. 2014. **Rubber Intelligence Unit**. Office of Industrial Economics. Available Source: <http://www.oie.go.th>, March 16, 2022.
- Russell, C.H. 2010. **Engineering Mechanics Dynamics** (12thed). Pearson Prentice Hall Publishers, New Jersey.
- Samklong, C., Puangchomphu, O., Wasupen, K. and Witthayakun, S. 2004. Effect of Bedding Types on Milk Yield, Milk Quality and Health in Dairy Cows. **Journal of Veterinary Medicine** 14(1): 70-80. (in Thai)
- Suso, P. 2011. Mechanical Properties of Plastic Tertiary Blends High Density Polyethylene, Low Density Polyethylene and Polypropylene. Master degree of Engineering (Manufacturing Engineering), Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Telezhenko, E., Bergsten, C., Magnusson, M., Ventorp, M. and Nilsson, C. 2008. Effect of different flooring systems on weight and pressure distribution on claws of dairy cows. **Journal of Dairy Science** 91(5): 1874-1884.

Research Article

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เมล็ดทุเรียน เมล็ดขุ่น และมันสำปะหลัง ทดแทนข้าวเพื่อ
ต่อขยายเชื้อรา *Trichoderma harzianum* ในชุมชนเขาคิชฌกูฏ

Feasibility of Using Durian Seeds, Jackfruit Seeds and Cassava as a Replacement for Rice
in the Culture of *Trichoderma harzianum* in the Khao Khitchakut Community

ธิตี ทองคำงาม วรณพร ธัญญผล และ สุกฤตา อุนทรกุลชัย *

Titi Thongkamngam, Wannaporn Thanyaphon and Sukritta Anutrakunchai *

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืชและภูมิทัศน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี อำเภอเขาคิชฌกูฏ
จังหวัดจันทบุรี 22210

Department of Plant production and Landscape, Faculty of Agro Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok at Chanthaburi Campus,
Khao Khitchakut, Chanthaburi 22210, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-05-31
Revised: 2024-07-09
Accepted: 2024-07-15

Keywords:

Durian seeds;
jackfruit seeds;
cassava;
rice seed;
Trichoderma harzianum

Currently, in the Khao Kitchakut community of Chanthaburi province, the production volumes of durian, jackfruit and cassava have increased, resulting in a large amount of waste materials from the agricultural sector and the fruit product processing industry. Consequently, a significant amount of agricultural and fruit processing byproducts exists. In particular, there is a substantial quantity of discarded seeds which, if not properly managed, could become a breeding ground for various plant diseases like root rot, stem rot, pink disease, and fruit rot in durian. Therefore, maximizing the utilization of these remaining seed portions becomes imperative. The objective of this study is to investigate the feasibility of using durian seeds, jackfruit seeds, and cassava as alternatives to rice for cultivating *Trichoderma harzianum*. The experimental design employs a Completely Randomized Design (CRD) with four treatments, with ten repetitions: Treatment 1 – rice seeds; Treatment 2 – durian seeds; Treatment 3 – jackfruit seeds; and Treatment 4 – cassava. The rice method showed the highest mycelial growth and sporulation, with 100% colonization and 1.66×10^6 spores per milliliter, respectively. Cassava and jackfruit seeds exhibited the lowest mycelial growth and sporulation, while durian seeds showed only 20% colonization and 0.5×10^4 spores per milliliter, respectively. This was due to contamination by *Aspergillus* sp. and *Penicillium* sp., resulting in the lowest mycelial growth and sporulation of *Trichoderma* sp. Therefore, we conclude that using durian and jackfruit seeds as substitutes for rice to cultivate *Trichoderma* sp. is not suitable for the propagation of the fungus.

* Corresponding author.

E-mail address: Sukritta_An@rmutto.ac.th

Cite this article as:

บทคัดย่อ

ปัจจุบันในชุมชนเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรีมีปริมาณการผลิตทุเรียน ขนุน และ มัณฑาปะหลังเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งในภาคเกษตรและอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ไม้ผลเป็นจำนวนมาก จากปัญหาชิ้นส่วนผลผลิตปล่อยทิ้งดังกล่าวไว้อาจจะกลายเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อราสาเหตุโรคพืชได้ เช่น โรครากเน่าโคนเน่า โรคราสีชมพู และโรคผลเน่าในทุเรียน เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องนำเอาชิ้นส่วนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน และมัณฑาปะหลังมาใช้ทดแทนข้าวเพื่อเลี้ยงเชื้อรา *Trichoderma harzianum* วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) 4 กรรมวิธี ๆ 10 ซ้ำ คือ กรรมวิธีที่ 1 เมล็ดข้าว กรรมวิธีที่ 2 เมล็ดทุเรียน กรรมวิธีที่ 3 เมล็ดขนุน และกรรมวิธีที่ 4 มัณฑาปะหลัง พบว่าทุกกรรมวิธีสามารถเพาะเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาได้ โดยกรรมวิธีข้าว พบการเจริญของเส้นใยเชื้อราและการสร้างสปอร์มากที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์ และ 1.66×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร รองลงมาคือมัณฑาปะหลังและเมล็ดขนุน ส่วนเมล็ดทุเรียนมีค่าการเจริญทางเส้นใยและการสร้างสปอร์น้อยที่สุด เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ และ 0.5×10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร เนื่องจากเกิดการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus* sp. และ *Penicillium* sp. จึงทำให้ค่าการเจริญของเส้นใยเชื้อราไตรโคเดอร์มาและปริมาณการสร้างสปอร์ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการนำเมล็ดทุเรียน และเมล็ดขนุนมาใช้เพื่อทดแทนข้าวเพื่อเลี้ยงขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มาไม่เหมาะสมต่อการนำมาเพาะเลี้ยงเชื้อ

คำสำคัญ: เมล็ดทุเรียน, เมล็ดขนุน, มัณฑาปะหลัง, เมล็ดข้าว, เชื้อราไตรโคเดอร์มา

1. บทนำ

ทุเรียน ขนุน และมัณฑาปะหลัง เป็นพืชเศรษฐกิจที่เกษตรกรนิยมปลูกกันทั่วทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะในเขตภาคตะวันออกมีแหล่งปลูกทุเรียน ขนุน และมัณฑาปะหลังเป็นอันดับต้น ๆ มีอยู่หลายจังหวัด เช่น จังหวัดจันทบุรี ตราด ระยอง ชลบุรี และ ฉะเชิงเทรา เป็นต้น (Charoenphun *et al.*, 2018) ปัจจุบันผลผลิตส่วนเหลือและถูกทิ้งจากการบริโภคและแปรรูปในภาคอุตสาหกรรมมีประมาณ 16,345 – 24,000 กิโลกรัมต่อปี (APAARI, 2018) ก็คือส่วนของเมล็ด ซึ่งการใช้ประโยชน์จากเมล็ดทุเรียนและขนุน ชิ้นส่วนเหลือทิ้งของมัณฑาปะหลังยังมีน้อย (Tulyathan *et al.*, 2002; Beleia *et al.*, 2006) ปัจจุบันนิยมนำไปนึ่ง ต้ม หรือทอด เพื่อใช้ในการบริโภคเป็นอาหารว่างภายในครอบครัว (Rengsutthi and Chaoenrein, 2011) อย่างไรก็ตาม เมล็ดทุเรียน ขนุน และมัณฑาปะหลัง ก็ยังมีประโยชน์อีกมากมายเนื่องจากภายในเมล็ดประกอบด้วยโปรตีน 7 - 12 เปอร์เซ็นต์ (Charles *et al.*, 2004; Amid and Mirhosseini, 2012; Narklaor *et al.*, 2011) รวมไปถึงพวกไขมัน และใยอาหารเป็นองค์ประกอบ (Brown *et al.*, 2001; Baraheng and Karrila, 2019) อีกทั้งยังพบแป้งชนิดอะไมโลส และน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจำพวก L-rhamnose glucose และ D-galactose ผสมกระจายตัวอยู่ในเมล็ด (Bobbio *et al.*, 1978; Amin *et al.*, 2007; Leemud *et al.*, 2020) ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจึงเหมาะสมที่จะนำเอาเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน และมัณฑาปะหลังมาดัดแปลงและใช้ทดแทนเมล็ดข้าว เพราะมีปริมาณแป้งที่ใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการเลี้ยงขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มา (Faridah *et al.*, 2021) เพราะโดยปกติแล้วการใช้ข้าวที่ผ่านการนึ่งมาเลี้ยงเชื้อนั้นเป็นวิธีการที่เกษตรกรทั่วไปใช้เพื่อขยายหรือเพิ่มจำนวนเชื้อราไตรโคเดอร์มาให้มีปริมาณมากพออยู่แล้ว แต่ในบางพื้นที่ของจังหวัดจันทบุรี เช่น ในชุมชนเขาคิชฌกูฏมีปริมาณการผลิตทุเรียน ขนุน และ มัณฑาปะหลัง

ที่ค่อนข้างสูง รวมไปถึงมีการแกะผลและนำเอาส่วนของเนื้อไปทอด กวน หรืออบกรอบ เป็นต้น (Narklaor *et al.*, 2011) จึงทำให้ปริมาณเมล็ดที่แกะออกมาในแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน และมัณฑาปะหลังมาต่อยอดเพื่อเพิ่มมูลค่าดีกว่จะปล่อยทิ้งไว้อาจจะเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อราสาเหตุโรคพืชได้หลากหลายชนิดเช่น โรครากเน่าโคนเน่า โรคราสีชมพู และโรคผลเน่าในทุเรียน เป็นต้น (Thongkamngam and Anutrakunchai, 2019; Pongpisutta *et al.*, 2020) ซึ่งปัจจุบันแนวทางการนำวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้หรือนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวิธีการที่กำลังได้รับความนิยมเพราะเป็นการช่วยลดปัญหาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนสามารถช่วยแก้ปัญหาวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปและยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการหาซื้อวัตถุดิบมาใช้ในการเลี้ยงเชื้อได้อีกด้วย (Charoenphun *et al.*, 2018)

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน และมัณฑาปะหลัง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภคและการแปรรูป โดยนำมาใช้ทดแทนข้าวในการเลี้ยงเชื้อและขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มา

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบหลัก (Proximate analysis)

นำเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มัณฑาปะหลัง และข้าว มาวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบหลัก ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate), โปรตีน (Crude protein), ลิพิด (lipid) ไขมัน (Crude fat), กากใย (Crude fiber) และเถ้า (Ash) โดยส่งตัวอย่างของพืชไปวิเคราะห์สารประกอบหลัก (Proximate analysis) ณ ห้องปฏิบัติการกลาง บริษัทก๊อบไทย เพื่อทำการเปรียบเทียบสารประกอบภายในวัสดุที่ใช้ทดแทนข้าว เพื่อนำมาเลี้ยงขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มาต่อไป

2.2 การเตรียมเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าว เพื่อขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มา

นำเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าว จำนวนอย่างละ 10 กิโลกรัม ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์จากเกษตรกรตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี มาล้างน้ำทำความสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดตามเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าวออก เช่น เศษเปลือกหุ้มเมล็ด ดิน หิน เป็นต้น ในส่วนของเมล็ดทุเรียน ขนุน และมันสำปะหลังจะใช้แผ่นฟองน้ำหรือแปรงสีฟันขัดทำความสะอาด จากนั้นนำเมล็ดพืชทั้ง 3 ชนิด (เมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน และมันสำปะหลัง) มาปอกเปลือกออกแล้วหั่นเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมคล้ายลูกเต๋า ขนาด 2x2 เซนติเมตร (Figure 1) แล้วนำส่วนของพืชทั้งหมดไปล้างน้ำเปล่า จำนวน 3 ครั้ง เพื่อขจัดเมือกหรือยางของเมล็ดออก จากนั้นนำเมล็ดแต่ละชนิดไปนึ่งมาเชื้อในหม้อนึ่ง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการนึ่งในแต่ละชนิดเมล็ดเท่ากันคือ 30 นาที (ถ้าเนิ่นเกินเวลาจากนี้เมล็ดพืชจะนิ่มและเนื้อจะทำให้เกิดการเน่าหลังการนำไปเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาได้) เมื่อครบระยะเวลาทำการตากเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าว ใส่ถุงขณะที่ยังร้อน ปริมาณ 250 กรัมต่อถุง จำนวน 10 ถุง ปิดปากถุงและตั้งทิ้งไว้รอจนอุ่นเพื่อใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มาต่อไป



Figure 1 Characteristics of crushed on durian seeds (a) jackfruit seeds (b) and cassava (c).

2.3 การทดสอบขยายเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาด้วยเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าว

นำเชื้อราไตรโคเดอร์มา (*Trichoderma harzianum*) ที่ได้รับการสนับสนุนจากเกษตรอำเภอเขาคิชฌกูฏ ในรูปแบบผง มาเลี้ยงขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มาลงในเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าว ที่ตากใส่ถุงไว้แล้ว ในทุกกรรมวิธีจะคลุกเคล้าเชื้อราไตรโคเดอร์มา 0.5 กรัมต่อ 250 กรัม วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 4 กรรมวิธี ๆ ละ 10 ซ้ำ ประกอบด้วย ดังนี้

- กรรมวิธีที่ 1 ใช้เมล็ดข้าว (ชุดควบคุม)
- กรรมวิธีที่ 2 ใช้เมล็ดทุเรียน
- กรรมวิธีที่ 3 ใช้เมล็ดขนุน
- กรรมวิธีที่ 4 ใช้มันสำปะหลัง

หลังจากใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มาแล้ว ทำการปิดปากถุงแล้วเขย่าถุงเพื่อคลุกเคล้าเชื้อให้ทั่วกัน จากนั้นเจาะรูที่บริเวณส่วนบนของถุงเพื่อให้มีอากาศถ่ายเท แล้วบ่มเชื้อไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทได้ ห้ามวางซ้อนถุงกันเพื่อลดการทับกันของถุงแล้วจะทำให้เกิดการเน่าเสียได้ บันทึกผลการทดลองโดยถ่ายภาพเปรียบเทียบในแต่ละกรรมวิธี เพื่อสังเกตการเจริญของเส้นใยเชื้อราไตรโคเดอร์มาบนเมล็ดพืชแต่ละชนิดใดที่เชื้อราสามารถเจริญเติบโตได้ สังเกตทุกวันจนกว่าเชื้อราไตรโคเดอร์มาจะเจริญเต็มถุง ควรสังเกตด้วยว่าถ้าหากมีการปนเปื้อน ๆ จากเชื้ออะไรนอกจากนั้นเมื่อเชื้อราไตรโคเดอร์มาเจริญเต็มถุงจะนับจำนวนปริมาณสปอร์ของเชื้อราไตรโคเดอร์มาด้วย hemacytometer เปรียบเทียบในแต่ละกรรมวิธี เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการคัดเลือกใช้พืชแต่ละชนิดในการนำมาทดแทนเมล็ดข้าวในการขยายเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาต่อไป

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การทดสอบขยายเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาด้วยเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน และ มันสำปะหลัง

หลังจากเลี้ยงขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มาด้วยเมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าว ในวันที่ 3, 6, 9, 12 และ 15 วัน พบว่าวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อทุกชนิดสามารถเลี้ยงเชื้อได้แตกต่างกัน ในวันที่ 3 หลังการใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มา พบเส้นใยสีขาวเจริญปกคลุมบริเวณผิวของเมล็ดข้าวและมันสำปะหลัง โดยมีเปอร์เซ็นต์การเจริญของเส้นใย เท่ากับ 20 และ 18.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Table 1) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าวิเคราะห์หาสารประกอบหลัก (Proximate analysis) กับวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มา พบว่ากรรมวิธีที่ใช้ข้าว มีค่าคาร์โบไฮเดรตน้อยที่สุด คือ 42.8 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กรรมวิธีอื่นเพื่อใช้ทดแทนข้าวกับพบว่ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากกว่า คือ เมล็ดทุเรียน (80.7 เปอร์เซ็นต์) เมล็ดขนุน (44.7 เปอร์เซ็นต์) และ มันสำปะหลัง (75.9 เปอร์เซ็นต์) (Table 2) นอกจากนั้นเมื่อสังเกตถึงค่า โปรตีน (8.3-16.2 เปอร์เซ็นต์) ลิพิด (4.8-11.2 เปอร์เซ็นต์) ไขมัน (0.6-2.2 เปอร์เซ็นต์) กากใย (0.9-14.8 เปอร์เซ็นต์) และเถ้า (1.4-15.5 เปอร์เซ็นต์) และในกรรมวิธีที่ใช้เมล็ดขนุนและเมล็ดทุเรียน อีกทั้งเริ่มสังเกตเห็นการปนเปื้อนของเชื้อราชนิดอื่น ๆ โดยมีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวและสีเทาเจริญขึ้นบนชั้นของเมล็ด โดยพบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเจริญของเส้นใย เท่ากับ 6.6 และ 3.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P=0.05$ (Table 1; Figure 2) หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป (ในช่วง 5-9 วันหลังการใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มา) พบว่าแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การเจริญของเส้นใยเชื้อราไตรโคเดอร์มาที่ขึ้นปกคลุมบนวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อในเมล็ดข้าว และมันสำปะหลัง เริ่มเปลี่ยนจากสีขาวกลายเป็นสีเขียวเข้ม และเจริญครอบคลุมทั่วทั้งถุง โดยมีค่าการเจริญของเส้นใยอยู่ในช่วง 38.6 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะเดียวกัน

ในการรวมวิธีที่ใช้เมล็ดขนุนและเมล็ดทุเรียน มีค่าการเจริญเติบโต เช่นเดียวกันกับช่วงแรกของการทดลอง มีค่าอยู่ในช่วง 6.6 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าในการรวมวิธีที่ใช้เมล็ดขนุนและเมล็ดทุเรียนมีการปนเปื้อนของเส้นใยเชื้อรา *Aspergillus* sp. และ *Penicillium* sp. โดยเส้นใยมีสีเหลืองและสีเขียวปนเทาอ่อนเจริญขึ้นปกคลุมบนวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อ (Table 1; Figure 2) และต่อมาในวันที่ 15 วันหลังการใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มา ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับในช่วงแรกของการทดลอง โดยกรรมวิธีที่ใช้ด้วยเมล็ดข้าว และมันสำปะหลัง พบเปอร์เซ็นต์การเจริญของเส้นใยดีที่สุด มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (เชื้อราไตรโคเดอร์มาเจริญเต็มทั่วทั้งถุง) แต่ในการรวมวิธีที่ใช้ด้วยเมล็ดขนุนและ

เมล็ดทุเรียน พบการปนเปื้อนตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง และมีการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อราไตรโคเดอร์มา เท่ากับ 40 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P=0.05$ (Table 1; Figure 2) สอดคล้องกับการทดลองของ Charoenrak and Chamswang (2016) ที่เลี้ยงเชื้อรา *Trichoderma asperellum* (CB-Pin-01) สามารถเจริญและสร้างสปอร์ได้ดีในข้าว ในขณะที่ Chamswang and Intanoo (2002) ทดสอบการเลี้ยงขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มาโดยใช้ข้าว พบว่า เชื้อราไตรโคเดอร์มาสามารถสร้างสปอร์สดและเจริญเติบโตได้รวดเร็วภายใน 7 วันหลังจากใส่เชื้อไตรโคเดอร์มาลงถุง

Table 1 The percentage of mycelial growth of *Trichoderma harzianum* on different substrates such as rice, durian seeds, jackfruit seeds and cassava.

Treatment	Percentage of mycelial growth of <i>Trichoderma harzianum</i> (%) ^{1/}					
	3 DAI ^{2/}	5 DAI	7 DAI	9 DAI	12 DAI	15 DAI
Rice seeds	20a ^{3/}	46.6a	66.6a	80a	100a	100a
Durian seeds	3.3c	6.6c	16.6c	20c	20c	20c
Jackfruit seeds	6.6bc	13.3bc	18.3bc	26.6bc	36.6b	40b
Cassava	18.3ab	38.6ab	53.3ab	66.6ab	86.6a	100a
C.V. (%)	54.7	27.4	22.6	18.6	11.9	8.7
F-value	*	*	*	*	*	*

^{1/} Percentage of mycelium growth = $[\sum(\text{number of total} - \text{number of treatment}) / \text{number of total} \times 100]$

^{2/} Averages followed by the same uppercase letters in column rows are not significantly different at $P = 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

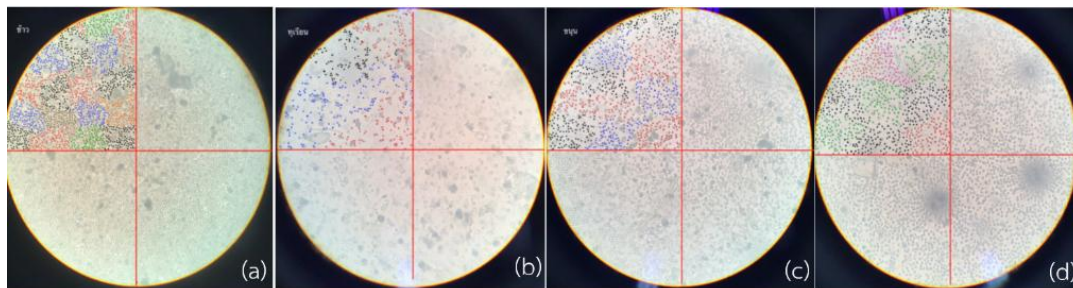
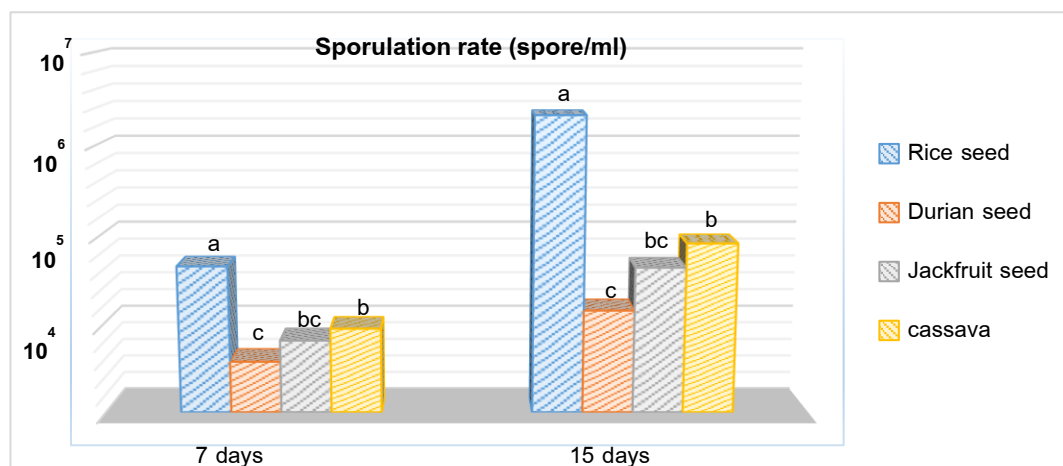
^{3/} DAI = Day after inoculation



Figure 2 Growth characteristics of *Trichoderma harzianum* on rice, durian seeds, jackfruit seeds and cassava at 3,5,7,9,12 and 15 days after inoculation.

Table 2 Proximate analysis on different substrates such as rice, durian seeds, jackfruit seeds and cassava.

Treatment	Parameter (%)					
	Carbohydrate	Lipid	Protein	Fiber	Fat	Ash
Rice seed	42.8	11.2	10.8	14.8	2.2	15.5
Durian seed	80.7	8.9	6.3	0.9	0.6	4.8
Jackfruit seed	44.7	9.6	16.2	3.6	0.9	1.4
Cassava	75.9	4.8	8.3	2.5	1.8	1.6

**Figure 3** Counting of conidia of *Trichoderma harzianum* on slide plates after 15 days using different substrates: (a) rice seed, (b) durian seed, (c) jackfruit seed, and (d) cassava.**Figure 4** Sporulation rate of *Trichoderma harzianum* on rice, durian, jackfruit seeds and cassava at 7 and 15 days.

หลังจากนั้นเมื่อครบระยะเวลา 7 และ 15 วันหลังการใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มา ได้ทำการตรวจนับปริมาณสปอร์ของเชื้อที่เจริญขึ้นปกคลุมในวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อทั้ง 4 ชนิด คือ เมล็ดทุเรียน เมล็ดขนุน มันสำปะหลัง และข้าว (Figure 3) พบว่าในช่วง 7 วันแรกหลังการใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มา กรรมวิธีที่ใช้ข้าวให้ค่าปริมาณของสปอร์สูงที่สุด 0.83×10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร สอดคล้องกับการทดลองของ Sharmani *et al.* (2019) ที่ใช้ข้าวและข้าวสาลีเลี้ยงเชื้อไตรโคเดอร์มา พบว่า สามารถสร้างสปอร์ได้ 1.6×10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตรได้ตั้งแต่ 7 วันแรกของการทดสอบ รองลงมาคือมันสำปะหลังมีปริมาณสปอร์เท่ากับ 0.48×10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร (Figure 4) และในกรรมวิธีที่ใช้เมล็ดขนุนและเมล็ดทุเรียน พบปริมาณสปอร์ของเชื้อราไตรโคเดอร์มาน้อยที่สุด เท่ากับ 0.41 และ 0.29×10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ (Figure 4) นอกจากนั้นใน

กรรมวิธีที่ใช้เมล็ดขนุนและเมล็ดทุเรียนมีการปนเปื้อนของสปอร์เชื้อรา *Aspergillus* sp. และ *Penicillium* sp. ที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าเชื้อราไตรโคเดอร์มากระจายอยู่ในส่วนสปอร์แขวนลอย (spore suspension) ที่ได้จากการล้างสปอร์เชื้อราออกจากวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อ และเมื่อระยะผ่านไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (15 วันหลังการใส่เชื้อราไตรโคเดอร์มา) พบว่าแนวโน้มปริมาณสปอร์ของเชื้อไตรโคเดอร์มาก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับช่วงแรกของการทดลอง กล่าวคือ ในกรรมวิธีที่ใช้เมล็ดข้าว มีปริมาณสปอร์ของเชื้อราไตรโคเดอร์มาสูงที่สุด เท่ากับ 1.66×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร รองลงมาคือ มันสำปะหลังและเมล็ดขนุน มีค่าเท่ากับ 0.96×10^5 และ 0.82×10^5 สปอร์ต่อมิลลิลิตร และในกรรมวิธีที่ใช้ด้วยเมล็ดทุเรียนในค่าปริมาณสปอร์ของเชื้อราไตรโคเดอร์มาน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.5×10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร (Figure 4) เนื่องจากในกรรมวิธีที่ใช้ด้วย

เมล็ดทุเรียนมีการปนเปื้อนตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง (ทั้งหมด 10 ซ้ำ) โดยเมล็ดทุเรียนที่ผ่านการนึ่งแล้วมีลักษณะค่อยข้างนึ่ม หลังจากใส่เชื้อผสมลงไปและผ่านการเขย่าให้เชื้อกระจายตัวทั่วทั้งถุงอาจจะส่งผลทำให้เกิดการแฉะและมีความชื้นมากภายในถุงทำให้เกิดการเข้าปนเปื้อนของเชื้อราชนิดอื่น ๆ เช่น เชื้อรา *Aspergillus* sp. และ *Penicillium* sp. เป็นต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen *et al.* (2019) ที่ได้ทำการทดสอบเลี้ยงเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* ร่วมกับเชื้อรา *Trichoderma viride* ในข้าว โดยเลี้ยงเชื้อรา *P. chrysosporium* ลงไปก่อน 4 วันหลังจากนั้นถึงค่อยใส่เชื้อรา *T. viride* ตามลงไป พบว่าเชื้อราไตรโคเดอร์มาสร้างสปอร์เชื้อได้น้อยกว่าในถุงเชื้อที่ไม่มีการปนเปื้อนเชื้อชนิดอื่น นอกจากนั้นยังส่งผลต่อการย่อยสลายสร้างจำพวก lignin and cellulose ให้ลดต่ำลงจึงทำให้เชื้อราไตรโคเดอร์มาเจริญเติบโตได้ช้ากว่าปกติ โดยมีค่าประมาณ 33.29 เปอร์เซ็นต์ โดยสรุปการใช้เมล็ดทุเรียน เมล็ดขุ่น เพื่อทดแทนข้าวไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำการเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาเพราะปริมาณการสร้างสปอร์ของเชื้อนั้นมีค่อนข้างน้อยรวมไปถึงยังเกิดการปนเปื้อนอีกด้วย แต่ถ้าหากมีความจำเป็นต้องใช้คณะผู้วิจัยแนะนำให้เลือกมันสำปะหลังที่หาง่ายในท้องถิ่นมาใช้ในการเลี้ยงเชื้อไตรโคเดอร์มาแทนดีกว่าเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการหาซื้อข้าวมาเลี้ยงเชื้อราต่อไป

4. สรุป

จากการทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้เมล็ดทุเรียน เมล็ดขุ่น และมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในภาคเกษตรและอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์ไม้ผลในภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยนำมาเพิ่มมูลค่าในการใช้เลี้ยงขยายเชื้อรา *Trichoderma harzianum* เพื่อทดแทนข้าว ในพื้นที่อำเภอเขาฉกรรจ์ จังหวัดจันทบุรี พบว่าวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อทุกชนิดสามารถเลี้ยงเชื้อได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสถิติ โดยกรรมวิธีที่พบการเจริญของเชื้อราไตรโคเดอร์มาและการสร้างสปอร์มากที่สุดคือ ข้าว รองลงมาคือ มันสำปะหลัง และเมล็ดขุ่น โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าสารประกอบหลัก (Proximate analysis) พบว่าข้าวมีปริมาณของ โปรตีน (Crude protein) ลิพิด (lipid) ไขมัน (Crude fat) กากใย (Crude fiber) และเถ้า (Ash) ที่สูงกว่าวัสดุอื่น ๆ ในขณะที่เมล็ดทุเรียนที่คณะผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำมาใช้เพื่อทดแทนข้าวได้ แต่พบว่ามีค่าการเจริญเติบโตของเส้นใยและปริมาณของสปอร์น้อยที่สุด รวมไปถึงยังพบการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus* sp. และ *Penicillium* sp. เจริญปกคลุมร่วมกับเชื้อราไตรโคเดอร์มา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การนำเมล็ดทุเรียน และเมล็ดขุ่น มาใช้เพื่อทดแทนข้าว ในการเลี้ยงขยายเชื้อราไตรโคเดอร์มาไม่เหมาะสมต่อการนำมาเลี้ยงขยายเชื้อ แต่ถ้าหากเปลี่ยนมาใช้มันสำปะหลังก็ยังพอที่สามารถนำมาเป็นทางเลือกให้กับพี่น้องชาวสวนหรือเกษตรกรในพื้นที่สามารถใช้ทดแทนข้าวโดยไม่ต้องเสียเงินเพื่อไปหาซื้อข้าวมาเพื่อเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยพืชสวนจันทบุรี ตำบลตะปอน อำเภอลอง จังหวัดจันทบุรี ที่ช่วยสนับสนุนสถานที่ และห้องปฏิบัติการกีฏวิทยาและโรคพืช สาขาเทคโนโลยีการผลิตพืช และภูมิทัศน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี เพื่อดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Amid, B.T. and Mirhosseini, H. 2012. Optimisation of aqueous extraction of gum from durian (*Durio zibethinus*) seed: A potential, low cost source of hydrocolloid. **Food Chemistry** 132(3): 1258-1268.
- Amin, M.A., Ahmed, A.S., Yin, Y.Y., Yahya, N. and Ibrahim, N. 2007. Extraction, purification and characterization of durian (*Durio zibethinus*) seed gum. **Food Hydrocolloids** 21(2): 273-279.
- APAARI. 2018. Durian in Thailand: A Success Story. **Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institutions**. Bangkok, Thailand.
- Baraheng, S. and Karrila, T. 2019. Chemical and functional properties of durian (*Durio zibethinus* Murr.) seed flour and starch. **Food Bioscience** 30: 400-412.
- Beleia, A., Butarelo, S.S. and Silva, R.S.F. 2006. Modeling of starch gelatinization during cooking of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.). **LWT-Food Science and Technology** 39: 399-404.
- Bobbio, F.O., El-Dash, A.A., Bobbio, P.A., and Rodrigues, L.R. 1978. Isolation and characterization of the physio-chemical properties of the starch of jackfruit seeds (*Artocarpus heterophyllus*). **Cereal Chemistry** 55: 505-511.
- Brown, M.J., Hor, Y.L. and Greenwood, J.S. 2001. Reserve accumulation and protein storage vacuole formation during development of recalcitrant seeds of *Durio zibethinus* L. **Seed Science Research** 11(4): 293-303.
- Chamswarn, C. and Intanoo, W. 2002. Production of *Trichoderma* fresh culture by simple technique for controlling damping-off of yard long bean caused by *Scotium rolfsii*, pp. 114-122. *In Proceeding of 40th Kasetsart University Annual Conference (Subject: Plants)*. Bangkok, Thailand.

- Charles, A.L., Chang, Y.H., Ko, W.C., Sriroth, K. and Huang, T.C. 2004. Some physical and chemical properties of starch isolates of Cassava genotypes. **Starch/Stärke** 56(9): 413-418.
- Charoenphun, N., Setarnawat, S. and Sai-ut, S. 2018. Chemical Composition and Trends in Utilization of By-products and Wastes from 4 Types of Tropical Fruit Processing. **Thai Science and Technology Journal (TSTJ)** 28(1): 113-128. (in Thai)
- Charoenrak, P. and Chamswang, C. 2016. Efficacies of wettable pellet and fresh culture of *Trichoderma asperellum* biocontrol products in growth promoting and reducing dirty panicles of rice. **Agriculture and Natural Resources** 50: 243-249.
- Chen, K.J., Tang, J.C., Xu, B.H., Lan, S.L. and Cao, Y. 2019. Degradation enhancement of rice straw by co-culture of *Phanerochaete chrysosporium* and *Trichoderma viride*. **Scientific Reports** 9: 19708.
- Faridah, S.M.A., Atikah, N.M.R.L. Jau-Shuy, L., Hasmadi, M., Rosni, M.S., Wolyna, P. and Noorakmar, A.W. 2021. Physicochemical and thermal properties of durian seed flour from three varieties of durian native of Sabah. **Food Research** 5(4): 374-381.
- Leemud, P. Karrila, S., Kaewmanee, T. and Karrila, T. 2020. Functional and physicochemical properties of Durian seed flour blended with cassava starch. **Journal of Food Measurement and Characterization** 14: 388-400.
- Narklaor, D., Sangnark, A. and Limroongreungrat, K. 2011. Improvement in Quality of Jackfruit Seed Flour by Pregelatinization. **Burapha Science Journal** 16(1): 12-21. (in Thai)
- Pongpisutta, R., Rattanakreetakul, C., Bincader, S., Chatchaisiri, K. and Boonruangrod, P. 2020. Detection of fungal pathogen causing durian dieback disease. **Khon Kaen Agriculture journal** 48(4): 703-714. (in Thai)
- Rengsutthi, K. and Charoenrein, S. 2011. Physico-chemical properties of jackfruit seed starch (*Artocarpus heterophyllus*) and its application as a thickener and stabilizer in chili sauce. **LWT-Food Science and Technology** 44(5): 1309-1313.
- Sharmani, H.R., Halabi, H.H., and Abedy, A.N. 2019. Efficacy of rice husks compost and *Trichoderma harzianum* on *Rhizoctonia solani* and its effect on seeds germination and seedling health. **Earth and Environmental Science** 388: 1-12.
- Thongkamngam, T. and Anutrakunchai, S. 2019. Survey and collection of fungal pathogen of durian in Chanthaburi province, pp. 117-122. *In Proceedings of 3rd International Symposium on Agricultural Technology and 17th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology*. Krabi, Thailand.
- Tulyathan, V., Tananuwig, K., Songjinda, P. and Jaiboon, N. 2002. Some physicochemical properties of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam) seed flour and starch. **Science Asia** 28: 37-41.



Research Article

ผลของการใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริมสำหรับการเพาะเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่น

Effects of Using Spent Coffee Grounds as a Substrate Supplement for Cultivation of Abalone Mushroom (*Pleurotus cystidiosus*)

วารภรณ์ แก้วคอน ^{a*} และ นิคม นาคสุพรรณ ^b

Waraporn Kaewkhon ^{a*} and Nikhom Naksupan ^b

^a โปรแกรมวิชาชีววิทยา คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย 57100

^a Biology Program, Faculty of Education, Chiang Rai Rajabhat University, Mueang, Chiang Rai 57100, Thailand.

^b สาขาสาขาสัตววิทยาและปรสิตวิทยา คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

^b Division of Microbiology and Parasitology, School of Medical Science, University of Phayao, Mueang, Phayao 56000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-25

Revised: 2024-06-12

Accepted: 2025-01-06

Keywords:

mushroom cultivation;

spent coffee grounds;

Abalone mushroom;

mycelial growth

In Chiang Rai province, the number of coffee shops is increasing, resulting in a greater amount of spent coffee grounds (SCGs) each year. SCGs are a by-product generated by the coffee shop, and their waste has caused increasing environmental problems. Nowadays, there is a growing trend toward reusing SCGs. This study investigates the influence of SCGs as a supplementary substrate for abalone mushroom (*Pleurotus cystidiosus*) cultivation. The experiment was divided into (1) a control group of 100% sawdust and (2) treatment group with sawdust supplemented with SCGs in different ratios: 0.25% v/v, 0.50% v/v, 1.0% v/v and 2.5% v/v. The results showed that adding SCGs at ratios of 0.25 to 2.5% v/v increased mycelia growth. The highest growth rate was observed with 0.25% v/v and 0.5% v/v SCGs supplementation, compared to the control group ($p < 0.05$). Furthermore, sawdust substrate supplemented with 0.25 to 2.5% v/v SCGs produced a higher yield of abalone mushrooms compared to the control group ($p < 0.05$). These findings indicate that using 0.25% and 0.5% v/v as a supplementary substrate can effectively promote mycelial growth, fruiting body size and yield of abalone mushrooms.

* Corresponding author.

E-mail address: waraporn.kae@rru.ac.th

Cite this article as:

Kaewkhon, W. and Naksupan, N. 2025. Effects of Spent Coffee Grounds used as a Substrate Supplement for Mushroom Cultivation of Abalone Mushroom (*Pleurotus cystidiosus*) *Recent Science and Technology* 17(3): 262649.

บทคัดย่อ

ร้านกาแฟในจังหวัดเชียงรายเพิ่มจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้กากกาแฟซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำกาแฟมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี กากกาแฟบางส่วนถูกทิ้งเป็นขยะโดยเปล่าประโยชน์และส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ปัจจุบันจึงเริ่มมีแนวทางการนำกากกาแฟกลับมาใช้ประโยชน์เพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งของการเพิ่มคุณค่าวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟเพื่อการเพาะเห็ด มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากกาแฟเป็นอาหารเสริมสำหรับการเพาะเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่น โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 กลุ่ม คือ (1) กลุ่มควบคุมใช้วัสดุเพาะจากขี้เลื่อยไม่ย่ำพารา และ (2) กลุ่มทดลองใช้วัสดุเพาะจากขี้เลื่อยไม่ย่ำพาราสวมกากกาแฟ อัตราส่วน 0.25% v/v, 0.50% v/v, 1.0% v/v และ 2.5% v/v ตามลำดับ จากผลวิจัยพบว่า การใช้วัสดุเพาะจากขี้เลื่อยไม่ย่ำพาราสวมกากกาแฟอัตราส่วน 0.25-2.5% v/v สามารถส่งเสริมการเจริญของเส้นใยเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่นได้ อัตราส่วนของกากกาแฟ 0.25% v/v และ 0.5% v/v มีการเจริญของเส้นใยเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่นเร็วกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในด้านของผลผลิตเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่นพบว่า กากกาแฟส่งผลต่อจำนวนดอกเห็ดต่อช่อ แต่มีผลทำให้น้ำหนักผลผลิตของเห็ดมากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การใช้วัสดุเพาะเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่นจากการใช้ขี้เลื่อยไม่ย่ำพาราสวมกากกาแฟอัตราส่วน 0.25% และ 0.5% v/v สามารถส่งเสริมการเจริญของเส้นใยเห็ด ขนาดดอกเห็ด และผลผลิตดอกเห็ด

คำสำคัญ: การเพาะเห็ด, กากกาแฟ, เห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่น, การเจริญของเส้นใย

1. บทนำ

กากกาแฟ (Spent coffee grounds) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการคั่วบดกาแฟเพื่อแปรรูปเป็นเครื่องดื่ม และมักจะถูกกำจัดทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ โดยเฉพาะในจังหวัดเชียงรายนิยมปลูกกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้ามากที่สุด เนื่องจากตั้งอยู่เหนือสุดของประเทศไทย และมีอากาศหนาวเย็นทำให้กาแฟอาราบิก้าสามารถเจริญเติบโตได้ดี ทำให้เชียงรายได้ชื่อว่าเป็นแหล่งผลิตกาแฟที่มีเอกลักษณ์และมีความโดดเด่นทั้งในด้านคุณภาพและด้านรสชาติ ส่งผลให้ธุรกิจเกี่ยวกับกาแฟในจังหวัดเชียงรายเพิ่มขึ้น ปริมาณกากกาแฟก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน แม้ในปัจจุบันจะเริ่มมีการนำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์หลากหลายมากขึ้น เช่น พลังงานชีวภาพ ไบโอดีเซล (Tuntiwattananapun *et al.*, 2017) กระดาษต้นไม้จากกากกาแฟ (Chaichan *et al.*, 2018) ปุ๋ยอินทรีย์ (Febrian and Ismail, 2021) ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว (Rodrigues *et al.*, 2023) รวมถึงการใช้เป็นวัสดุในการเพาะเห็ดนางฟ้าภูฐาน (Bunyovimonnat *et al.*, 2019) การเพาะเห็ดนางรมทอง (Kamsan *et al.*, 2021) แหล่งอาหารเสริมสำหรับการเพาะเห็ดโคนญี่ปุ่น (Kaewkhon *et al.*, 2022) งานวิจัยพบว่า กากกาแฟประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) รวมทั้งปริมาณไนโตรเจน โฟสเฟต และฟอสฟอรัส มีค่า pH 6.5-6.8 และมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน เท่ากับ 11:1 (Chulaka *et al.*, 2014) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการเพาะเห็ดชนิดต่าง ๆ สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของเห็ดได้ ในปัจจุบันนิยมเพาะเห็ดในถุงพลาสติกโดยใช้วัสดุเพาะจากขี้เลื่อยไม่ย่ำพารา และมีการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรมหลากหลายชนิดมาใช้เป็นอาหารเสริม เช่น ฟางข้าว เปลือกข้าวโพด ชังข้าวโพด ชานอ้อย และจอกหูหนู (Kaewkhon *et al.*, 2020) ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีสารอาหารใกล้เคียงกับกากกาแฟจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำกากกาแฟมาใช้เป็นอาหารเสริมในการเพาะเห็ด

เห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่น (Abalone Mushroom หรือ *Pleurotus cystidis* O.K. Miller สามารถเพาะได้ทุกฤดูกาล มีระยะพักตัวสั้น ลักษณะหมวกดอกเห็ดมีสีครีมถึงเทาเข้ม ผิวดอกแห้ง ขอบมันวาว ก้านดอกน้อย มีครีบใต้หมวกดอก ก้านดอกขนาดใหญ่ มีรสชาติและกลิ่นเป็นเอกลักษณ์ เนื้อเห็ดหนาและกรอบ ลักษณะคล้ายเนื้อไก่ จึงนิยมใช้รับประทานแทนเนื้อสัตว์ได้ เนื่องจากมีสารอาหารประเภทโปรตีน 17-42% คาร์โบไฮเดรต 37-48% และเส้นใย 24-31% (Khan *et al.*, 2008) และมีสรรพคุณทางยา เช่น ลดระดับน้ำตาลในเลือดต้านทานโรคเบาหวาน (Antidiabetic) ป้องกันโรคมะเร็ง (Anticancer) ป้องกันไวรัสและแบคทีเรีย (Antiviral-antibacterial activities) และช่วยบรรเทาอาการโรคข้ออักเสบ (Antiarthritic) (Deepalakshmi and Mirunalini, 2014) เห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่น สามารถเพาะและเจริญได้ดีในอากาศที่มีอุณหภูมิประมาณ 15-22 องศาเซลเซียส การเพาะเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่นมักใช้วัสดุเพาะเห็ดพื้นฐานเหมือนกับเห็ดสกุลนางรมชนิดอื่น วัสดุที่ใช้เพาะส่วนใหญ่เป็นขี้เลื่อยไม่ย่ำพารา และมีการใส่อาหารเสริม เช่น ปูนขาว ยิบซัม ภูไมท์ เพื่อช่วยเพิ่มขนาดและน้ำหนักของดอกเห็ด แต่เมื่อราคาของอาหารเสริมสำหรับเร่งการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตเห็ดเพิ่มขึ้น การใช้อาหารเสริมจากวัสดุธรรมชาติจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยลดต้นทุนการผลิตเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่นได้

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าเพื่อใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับการเพาะเห็ดเป๋าฮื้อญี่ปุ่น เนื่องจากกากกาแฟมีสารสำคัญที่เห็ดสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ เป็นการเพิ่มมูลค่ากากกาแฟที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง ลดปัญหาการกำจัดขยะกากกาแฟที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแนวทางในการส่งเสริมการเพาะเห็ดแบบอินทรีย์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมเชื้อเห็ดและวัสดุเพาะเห็ด

การวิจัยครั้งนี้ใช้หัวเชื้อเห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่นจากอานนท์ ไบโอเทค (ไทยไบโอเทค, ปทุมธานี) วัสดุหลักในการเพาะ คือ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (อำเภอพญาเม็งราย จังหวัดเชียงราย) และกากกาแฟพันธุ์ราบิเก่าที่เหลือทิ้งจากร้านกาแฟเพื่อนเดินทาง (อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย) โดยนำกากกาแฟ มาตากแดดเพื่อกำจัดความชื้นเป็นระยะเวลา 5-7 วัน แล้วนำไปผึ่งในที่ร่ม เพื่อกำจัดความชื้นส่วนเกินเป็นระยะเวลา 2-3 วัน และเก็บไว้ในภาชนะที่ปราศจากความชื้น

2.2 การผสมวัสดุเพาะเห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่น

ทำการผสมวัสดุเพาะเห็ดโดยใช้อัตราส่วนของขี้เลื่อยไม้ยางพาราและกากกาแฟพันธุ์ราบิเก่าแต่ละกลุ่มการทดลองที่แตกต่างกัน โดยแบ่งกลุ่มทดลองเป็น 2 กลุ่ม คือ (1) กลุ่มควบคุมใช้วัสดุเพาะขี้เลื่อยไม้ยางพารา (100%) และ (2) กลุ่มทดลองใช้วัสดุเพาะขี้เลื่อยไม้ยางพาราสผสมกากกาแฟเพื่อเป็นแหล่งอาหารเสริมในอัตราส่วน 0.25% v/v, 0.50% v/v, 1.0% v/v และ 2.5% v/v ตามลำดับ จำนวนกลุ่มการทดลองละ 30 ก่อนจากนั้นนำส่วนผสมแต่ละสูตรผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม และเพิ่มความชื้นด้วยน้ำสะอาดเพื่อให้วัสดุเพาะมีความชื้นประมาณร้อยละ 60-70 จากนั้นนำวัสดุเพาะที่ผสมในแต่ละสูตรบรรจุก้อนเห็ดลงในถุงพลาสติกทนความร้อนขนาด 6.5×12.5 นิ้ว นำหนักวัสดุเพาะถุงละ 750 กรัม อัดหัววัสดุเพาะเห็ดแน่นด้วยเครื่องอัดก้อนเห็ด ปิดปากถุงด้วยฝาจุก คอขวดพร้อมสาลี่ นำก้อนเห็ดทั้งหมดนี้มาเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อแรงดันไอน้ำ (autoclave) ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที

2.3 การเพาะเห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่น

ภายหลังการนึ่งฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อแรงดันไอน้ำ ก้อนเห็ดที่พร้อมจะทำการถ่ายเชื้อบริสุทธิ์เห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่น โดยเทคนิคปราศจากเชื้อ (Aseptic technique) ลงในถุงเพาะเห็ด น้ำหนักของเชื้อเห็ด 10 กรัมต่อก้อน (30-40 เมล็ดข้าวฟ่าง) จากนั้นนำก้อนเชื้อเห็ดไปบ่มให้เส้นใยเจริญที่โรงบ่มก้อนเห็ด เป็นระยะเวลา ประมาณ 60 วันหรือจนเส้นใยเจริญเต็มก้อน เมื่อเส้นใยเจริญเต็มก้อนเห็ดจึงนำไปเปิดดอกในโรงเพาะเห็ด เพื่อประเมินผลการศึกษา

2.4 การเก็บข้อมูลการเจริญของเห็ด

การศึกษการเจริญของเส้นใยเห็ด ก้อนเห็ดที่ได้รับการถ่ายเชื้อแล้วได้รับการประเมินผลร้อยละการเจริญของเส้นใยเห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่น ในสัปดาห์ที่ 3, 5, 7 และ 8 ตามลำดับ โดยวัดระยะ

การเจริญของเส้นใยจากปากคอขวดถึงระยะปลายสุดของเส้นใยเห็ด จากนั้นนำมาคำนวณร้อยละการเจริญ (Percentage of colonization)

$$\%Colonization = \frac{\text{ความยาว ของเส้นใย} \times 100}{\text{ความยาวของก้อนเห็ด}}$$

การศึกษาผลผลิตดอกเห็ด บันทึกผลด้านผลผลิตของดอกเห็ดในแต่ละกลุ่มการทดลอง โดยประเมินผลผลิตเห็ดในการออกดอกเห็ดรุ่นแรก (first flush) คือ (1) น้ำหนักดอกเห็ด และ (2) จำนวนและขนาดดอกเห็ด

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลร้อยละการเจริญของเส้นใย และผลผลิตของดอกเห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่นมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองด้วยวิธี Duncan Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การเจริญของเส้นใยเห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่น

การเจริญของเส้นใยเห็ดเป่าฮื้อญี่ปุ่นหลังจากลงหัวเชื้อเห็ดภายในระยะเวลา 2 เดือน พบว่า เมื่อบ่มก้อนเห็ดจนมีอายุครบ 3 สัปดาห์ กลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองที่ใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริม 0.25% v/v มีร้อยละการเจริญของเส้นใยเห็ดเร็วที่สุดแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่กลุ่มทดลองที่ใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริม 0.5% v/v, 1.0% v/v และ 2.5% v/v ตามลำดับ มีการเจริญของเส้นใยเห็ดช้าตามอัตราส่วนของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นและช้ากว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่เมื่อก่อนเห็ดมีอายุ 5-7 สัปดาห์ พบว่า กลุ่มทดลองที่ใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริม 0.25% และ 0.5% v/v มีการเจริญของเส้นใยเร็วที่สุดและมากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เส้นใยเห็ดเจริญเต็มก้อน (100% colonization) เมื่ออายุของก้อนเห็ดครบ 8 สัปดาห์ ในขณะที่กลุ่มทดลองที่ใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริม 1.0% และ 2.5% v/v มีร้อยละการเจริญของเส้นใยช้ากว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bunyovimonnat *et al.* (2019) ที่พบว่า อัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N ratio) ที่ผสมในวัสดุเพาะเห็ด ควรมีค่า C/N ratio ที่ไม่สูงจนเกินไป เพื่อให้เกิดการย่อยสลายวัสดุเพาะได้ง่าย ถ้าหากวัสดุเพาะมีค่า C สูงมากเกินไปจะเกิดการย่อยสลายยาก เช่นเดียวกับการใช้วัสดุเพาะของกลุ่มควบคุมที่ใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (100%) มีค่า C/N ratio เท่ากับ 125.5:1 ในขณะที่กลุ่มการทดลองมีการผสมกากกาแฟร่วมกับขี้เลื่อยไม้ยางพารา มีค่า C/N ratio เท่ากับ 59-45:1 ซึ่งเห็ดจึงสามารถย่อย

สลายสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตได้เร็ว จึงส่งเสริมการเจริญของเส้นใยเห็ดได้ดี

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อก่อนเห็ดอายุครบ 8 สัปดาห์ กลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง (1.0% และ 2.5% v/v กากกาแฟ) มีการเจริญของเส้นใยเห็ดได้ร้อยละ 95.41±4.87, 87.91±9.53 และ 78.84±9.51 ตามลำดับ และเส้นใยยังเจริญไม่เต็มก้อน จึงทำการบ่มก้อนเห็ดต่อไปจนเส้นใยเจริญเต็มก้อน (100%) ซึ่งกลุ่มควบคุมจะใช้ระยะเวลาการเจริญของเส้นใยประมาณ 9 สัปดาห์ ในขณะที่กลุ่มทดลอง 1.0% และ 2.5% v/v กากกาแฟ ใช้ระยะเวลาการเจริญของเส้นใยประมาณ 10 และ 11 สัปดาห์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเจริญของเส้นใยเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Alsanad *et al.* (2020) ที่ศึกษาการเจริญของเส้นใยเห็ด *P. ostreatus* เมื่อทำการเพาะเลี้ยงด้วยกากกาแฟกับซีลี้อย่างพาราในสัดส่วนที่ต่างกัน (0, 33, 67 และ 100%) พบว่า วัสดุเพาะเห็ดจากกากกาแฟ (100%) จะมีปริมาณคาเฟอีน (caffeine) เหลือในกากกาแฟประมาณ 10-25 $\mu\text{mol/g}$ จึงส่งผลยับยั้งการเจริญของเส้นใยเห็ดนางรมบนอาหารวุ้นและอาหารเหลวในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่อัตราส่วนของกากกาแฟที่ลดลง (33% และ 67%) มีการเจริญของเส้นใยได้ไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม เช่นเดียวกับการใช้กากกาแฟในการเพาะเลี้ยงเห็ดนางรมภูฐานของงานวิจัย Bunyovimonnat *et al.* (2019) ที่พบว่ากากกาแฟ 100% ส่งผลให้การเจริญของเส้นใยเห็ดช้ำมากและเส้นใยบาง ไม่หนาแน่น ในขณะที่ใช้กากกาแฟผสมซีลี้อย่างพารา ในอัตราส่วน 50% และ 25% ตามลำดับ การเจริญของเส้นใยเร็วขึ้นและไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของกากกาแฟมีผลต่อการเจริญของเส้นใยเห็ด

งานวิจัยดังกล่าวเบื้องต้นเป็นการใช้กากกาแฟเพื่อทดแทนการใช้ซีลี้อย่างพารา ในส่วนของการใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริมพบว่าผลวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaewkhon *et*

al. (2022) ที่ศึกษาการใช้กากกาแฟอัตราส่วน ร้อยละ 0.25, 0.50 และ 1.00 (โดยปริมาตร) ผสมกับซีลี้อย่างพาราสำหรับเป็นวัสดุเพาะเห็ดโคนญี่ปุ่นพบว่ากากกาแฟอัตราส่วนร้อยละ 1.00 มีการเจริญของเส้นใยเห็ดโคนญี่ปุ่นช้าที่สุด แต่มีลักษณะของเส้นใยหนาแน่นกว่ากลุ่มควบคุมที่ใช้ซีลี้อย่างพารา

3.2 รูปร่างดอกเห็ดและผลผลิตเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่น

หลังจากเส้นใยเห็ดเจริญเต็มก้อน จึงนำก้อนเห็ดไปเปิดดอกที่โรงเพาะเห็ด เพื่อศึกษาผลของกากกาแฟต่อผลผลิตเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่นในการออกดอกเห็ดครั้งแรก (first flush) โดยปกติแล้วลักษณะของดอกเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่น เมื่อดอกเห็ดเจริญเต็มที่ห่มวกดอกจะโค้งลงและเริ่มมีสีขาว ถ้าดอกเห็ดดอกเป็นเดี่ยวจะมีความกว้างประมาณ 10-12 เซนติเมตร แต่หากมีการออกดอกเป็นช่ออาจจะมีดอกเห็ดเป็นดอกย่อย 2-3 ดอกต่อช่อ (Raman *et al.*, 2021) จากการศึกษา พบว่ากลุ่มควบคุมและทุกกลุ่มการทดลองมีจำนวนดอกเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่นไม่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 2 ดอกต่อช่อ (Figure 1)

ผลผลิตเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่น พบว่าทุกกลุ่มการทดลองที่ผสมกากกาแฟมีน้ำหนักช่อดอกมากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยน้ำหนักเฉลี่ยของช่อดอกมากที่สุด คือ การผสมกากกาแฟ 0.25% และ 0.5% v/v ซึ่งมีน้ำหนักช่อดอกเฉลี่ยเท่ากับ 82.10±7.58 และ 84.19±11.35 กรัม ตามลำดับ มากกว่ากลุ่มที่ผสมกากกาแฟ 1.0% และ 2.5% v/v อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และเมื่อพิจารณาด้านขนาดของดอกเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่น พบว่าการผสมกากกาแฟ 0.25% และ 0.5% v/v มีดอกเห็ดที่ค่อนข้างสมบูรณ์ จำนวนดอกเห็ดต่อช่อ (2 ดอก) ขนาดดอกทั้งสองดอกต่อช่อสมบูรณ์ ขนาดดอกใกล้เคียงกัน ส่วนในด้านความกว้างและความยาวของดอกเห็ดจากสูตรทั้งสองพบว่า มีขนาดใหญ่กว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (Table 2)

Table 1 The percentage of the mycelial growth of abalone mushrooms

Treatments	Percentage of the mycelial growth of mushrooms			
	3 weeks	5 weeks	7 weeks	8 weeks
1. SD	38.59±2.06 ^a	60.79±4.05 ^b	73.10±5.93 ^b	95.41±4.87 ^b
2. SD+0.25%SCGs	38.41±1.44 ^a	66.76±4.88 ^a	80.37±6.15 ^a	100.00±0.00 ^a
3. SD+0.50%SCGs	36.02±4.39 ^b	66.08±9.18 ^a	80.56±9.10 ^a	100.00±0.00 ^a
4. SD+1.00%SCGs	34.48±2.29 ^c	60.17±3.74 ^b	70.92±4.24 ^b	87.91±9.53 ^c
5. SD+2.50%SCGs	27.81±3.05 ^d	48.03±6.46 ^c	58.62±9.03 ^c	78.84±9.51 ^d

Mean value of the mycelial growth of mushroom (N=30); measurements ± standard deviation;

SD = Sawdust; SCGs = Spent Mushroom Grounds

^{abcd} different letters in a column are significantly different level ($p<0.05$) according to Duncan's multiple range test

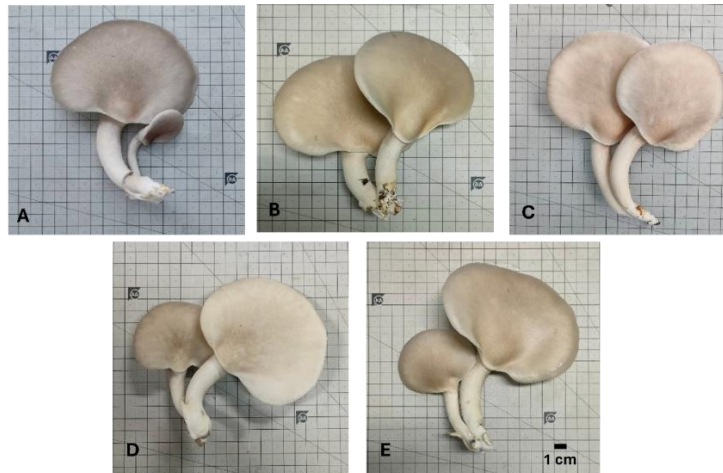


Figure 1 Abalone mushrooms (SD = Sawdust; SCGs = Spent Mushroom Grounds; A: SD control group, B: SD+SCGs0.25%, C: SD+SCGs0.5%, D: SD-SCGs+1% and E: SD+SCGs2.5%)

Table 2 The average of abalone mushroom weight and size of fruiting body

Treatments	The weight and size of fruiting body			
	Average number of fruiting	Mushroom weight	Fruiting body size	
	bodies		Width (cm)	Length (cm)
	(fruiting bodies/bunch)	(g/bunch)		
1. SD	2.10±0.92 ^{ns}	66.42±8.25 ^c	11.03±1.45 ^c	16.82±1.52 ^b
2. SD+0.25%SCGs	2.53±0.94 ^{ns}	82.10±7.58 ^a	12.39±1.57 ^{ab}	16.56±1.95 ^b
3. SD+0.50%SCGs	2.03±0.67 ^{ns}	84.19±11.35 ^a	12.82±1.80 ^a	19.07±1.44 ^a
4. SD+1.00%SCGs	2.20±0.85 ^{ns}	76.84±9.69 ^b	11.33±1.40 ^{bc}	18.33±1.35 ^a
5. SD+2.50%SCGs	2.10±0.66 ^{ns}	75.16±7.65 ^b	11.58±1.36 ^{abc}	15.58±1.69 ^b

Mean value of the mycelial growth of mushroom (N=30); measurements ± standard deviation

SD = Sawdust; SCGs = Spent Mushroom Grounds

^{ns} letters in a column are non-significantly different level ($p>0.05$) according to Duncan's multiple range test

^{abcd} different letters in a column are significantly different level ($p<0.05$) according to Duncan's multiple range test

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bunyovimonnat *et al.* (2019) ที่ศึกษาการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ พบว่ากากกาแฟผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราอัตราส่วนร้อยละ 50:50 ได้ผลผลิตดอกเห็ดนางรมที่มีปริมาณมากกว่าวัสดุเพาะขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100% แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของกากกาแฟที่เหมาะสมมีส่วนช่วยเพิ่มผลผลิตเห็ด และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Srijumpa *et al.* (2018) ที่เพาะเห็ดนางรม เห็ดฟางและเห็ดถั่วด้วยกากเมล็ดกาแฟผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 7:3 (โดยปริมาตร) ให้ผลผลิตต่อก้อนของเห็ดสกุลนางรม และเห็ดฟางสูงกว่าการใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (100%) แต่ไม่สามารถใช้เพาะเห็ดถั่วได้ แสดงให้เห็นว่า การใช้กากกาแฟเป็นวัสดุเพาะเห็ดจำเป็นต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพาะเห็ดแต่ละชนิด

สำหรับการใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริม เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kaewkhon *et al.* (2022) ที่เพาะ

เห็ดโคนญี่ปุ่นด้วยขี้เลื่อยไม้ยางพาราเสริมกากกาแฟ พบว่าอัตราส่วนกากกาแฟร้อยละ 0.25, 0.50 และ 1.00 (โดยปริมาตร) สามารถกระตุ้นการเกิดระยะหัวเข็มหมุด ระยะตุ่มดอกเห็ดและเจริญเป็นเห็ดโคนญี่ปุ่นได้เร็วกว่าการเพาะด้วยขี้เลื่อยไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากในกากกาแฟพันธุ์อาราบิก้ามีสารสำคัญ คือ Cellulose (glucan) 8.6 g/100g, Hemicellulose 36.7 g/100g, Protein 13.6 g/100g, Potassium 3549 mg/kg, Phosphorus 1475.1 mg/kg และ Magnesium 1293.3 mg/kg (Campos-Vega *et al.*, 2015) ที่แตกต่างจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่มีองค์ประกอบเป็น Cellulose 38.3-42.0%, Hemicellulose 29.7-32.8%, Lignin 18.1-21.3% (Anantasaran *et al.*, 2023) ดังนั้นเมื่อใช้กากกาแฟเป็นอาหารเสริมเพิ่มเติมจึงช่วยส่งเสริมการเจริญของเส้นใยเห็ด ขนาดดอกเห็ด และผลผลิตดอกเห็ดได้ดีกว่าการใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียว

4. สรุป

วัสดุเพาะเห็ดจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเมื่อนำมาผสมกับกากกาแฟเพื่อเป็นอาหารเสริมสามารถเพาะเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่นได้ ซึ่งอัตราส่วนของกากกาแฟ 0.25% และ 0.05% v/v เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่นมากที่สุด โดยสามารถส่งเสริมการเจริญของเส้นใยเห็ด เพิ่มผลผลิตเห็ดในด้านน้ำหนักช่อดอก และส่งเสริมให้ดอกเห็ดในช่อดอกมีรูปร่างและขนาด ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้นควรมีการส่งเสริมให้เกษตรกรเลือกใช้อาหารเสริมกากกาแฟสำหรับการผลิตเห็ดเป่าฮือญี่ปุ่น เพื่อลดต้นทุนการใช้อาหารเสริมชนิดอื่น ช่วยเพิ่มมูลค่ากากกาแฟ และลดปัญหาการกำจัดกากกาแฟทั้งโดยเปล่าประโยชน์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และกากกาแฟจากร้านกาแฟเพื่อนเดินทาง มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย จังหวัดเชียงราย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องวัสดุเหลือใช้จากกากกาแฟ

ขอขอบคุณ นายรัชฎาณนท์ ใจจุมปา, นางสาวปานิศา จองคำอาจ, นางสาวชลธิชา โพธิ์นาม และนางสาวสุตารัตน์ รักแม่ สังกัดโปรแกรมวิชาชีววิทยา คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยและเก็บผลการวิจัยจนสำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ โปรแกรมวิชาชีววิทยา คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Alsanad, M.A., Sassine, Y.N., Sebaaly, Z.E. and Fayssal, S.A. 2020. Spent coffee grounds influence on *Pleurotus ostreatus* production, composition, fatty acid profile, and lignocellulose biodegradation capacity. **CyTA-Journal of Food** 19(1): 11-20.
- Anantasaran, J., Sae-Liw, N. and Thongkum, T. 2023. Cultivation of abalone mushroom with leftover earleaf acacia sawdust from zebra dove cage making industry. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University** 25(3): 65-74. (in Thai)
- Bunyovimonnat, N., Burakron, J., Jindavutikul, S. and Somrith A. 2019. Increasing nutrition of oyster mushrooms using waste coffee grounds. **Bulletin of Applied Sciences** 8(8): 96-105. (in Thai)
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H.A. and Oomah, B.D. 2015. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. **Trends in Food Science & Technology** 45(1): 24-36.
- Chaichan, W., Chaichan, W. and Sawain, A. 2018. **Research report on plant pots from co-production of spent coffee grounds, shell lime and rubber wood sawdust.** Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang. (in Thai)
- Chulaka, P., Kaewsorn, P. and Jeenprosom, P. 2014. Effect of growing media containing coffee ground on germination and growth of tomato seedling (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Agricultural Science Journal** 45(2): 349-352. (in Thai)
- Deepalakshmi, K. and Mirunalini, S. 2014. *Pleurotus ostreatus*: an oyster mushroom with nutritional and medicinal properties. **Journal of Biochemical Technology** 5(2): 718-726.
- Febrian, P.A. and Ismail, Y. 2021. The study of composting from spent coffee grounds in making process liquid fertilizer. **Journal of Environmental Engineering and Waste Management** 6(2): 111-128.
- Kaewkhon, W., Naksupan, N., Seethi, I., Taomun, P., Phetkianphai, S. and Lagsamongkol, K. 2020. Development of abalone mushroom cultivation using dried-corn cobs and floating mass as a supplement for mushroom substrate. In Chandeying, V. ed. **Symposium on The 9th National Science Research Conference.** University of Phayao, Phayao.
- Kaewkhon, W., Manopattarakul, S., Thmmawong, T., Chaibong, T., Kwirachai, T. and Naksupan, N. 2022. Effect of spent coffee grounds with rubber wood sawdust substrates on the mycelial growth and primordial formation of *Agrocybe cylindracea* Maire, pp. 598-606. In Mongkolaussavarat, T. ed. **Symposium on The 14th National Science Research Conference.** University of Phayao, Phayao.
- Kamsan, T., Kiddee, P. and Wonglom, P. 2021. Use of coffee ground waste with rubber wood sawdust for golden oyster mushroom (*Pleurotus citrinopileatus* Singer) cultivation material. **PSRU Journal of Science and Technology** 6(2): 86-97. (in Thai)
- Khan, M.A., Amin, S.M.R., Uddin, M.N., Tania, M. and Alam, N. 2008. Comparative study of the nutritional

composition of oyster mushrooms cultivated in Bangladesh. **Bangladesh Journal of Mushroom** 2: 9-14.

Raman, J., Jang, K.Y., Oh, Y.L., Oh, M., Im, J.H., Lakshmanan, H. and Sabaratnam, V. 2021. Cultivation and nutritional value of prominent *Pleurotus* spp.: an overview. **Mycobiology** 49(1): 1-14.

Rodrigues, R., Oliveira, M.B.P.P. and Alves, R.C. 2023. Chlorogenic acids and caffeine from coffee by-products: a review on skincare applications. **Cosmetics** 10(12): 1-15.

Srijumpa, N., Khayankarn, S. and Chaichuchote, S. 2018. **Research Report on Using Coffee Pulps as Substrates for Cultivation of *Pleurotus* spp., *Volvariella volvacea* and *Coprinus fimetarius*.** Chiangrai Horticulture Research Center, Chiangrai.

Tuntiwiwattanapun, N., Usapein, P. and Tongcumpou, C. 2017. The energy usage and environmental impact assessment of spent coffee grounds biodiesel production by an *in-situ* transesterification process. **Energy for Sustainable Development** 40: 50-58.



Research Article

ผลของสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลที่มีต่อการควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียน

Conogethes punctiferalis Guenée (Lepidoptera: Crambidae)

Effect of Combination between Insecticide and Fruit Bagging for the Control of Durian Fruit

Borer, *Conogethes punctiferalis* Guenée (Lepidoptera: Crambidae)

พัชรภรณ์ วาณิชย์ปกรณ* พรศิลป์ สีเฟือก และ สกุลรัตน์ หาญศึก

Patcharaporn Vanichpakorn*, Pornsil Seephueak and Sakulrat Hansuek

คณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80240

Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thung Yai, Nakhon Si Thammarat 80240, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-29

Revised: 2024-12-27

Accepted: 2025-01-06

Keywords:

insecticide;

fruit bagging;

Conogethes punctiferalis;

durian

The durian fruit borer, *Conogethes punctiferalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae), is a serious insect pest of durian cv. Monthong, and integrated pest management is the best strategy to protect the plant. The objective of this research was to compare the integrated methods, which used insecticide and fruit bagging with spun-bonded bag or blue nylon bag, with farmer's practice to manage durian fruit borer. The research was conducted from November 2022 to September 2023 at a durian orchard of the Faculty of Agriculture in Thung Yai District, Nakhon Si Thammarat Province. The experiment was arranged in a randomized complete block design (RCBD) with three treatments and three replications. The three treatment combinations were as follows: 1) spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag, 2) spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag, and 3) spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice). All tactics provided 100% protection of durian fruit from durian fruit borer. The durians from all tactics did not differ in fruit weight and quality, and no insecticide residues were detected. Additionally, the highest benefit cost ratio of 12.84 was obtained from the combination of insecticide spray and fruit bagging with spun-bonded bag, followed by insecticide spray and fruit bagging with plastic bag (12.21), and insecticide spray and fruit bagging with blue nylon bag (11.18), respectively. This study demonstrated that the integrated method of insecticide spray and fruit bagging combined with spun-bonded bag is a highly effective strategy in preventing damage from durian fruit borer while protecting the environment and creating a more sustainable agroecosystem.

* Corresponding author.

E-mail address: Patcharaporn.v@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Vanichpakorn, P., Seephueak, P. and Hansuek, S. 2025. Effect of Combination between Insecticide and Fruit Bagging for the Control of Durian Fruit Borer, *Conogethes punctiferalis* Guenée (Lepidoptera: Crambidae). *Recent Science and Technology* 17(3): 262706.

บทคัดย่อ

หนอนเจาะผลทุเรียน (*Conogethes punctiferalis*) เป็นแมลงศัตรูร้ายแรงของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง การบริหารแมลงศัตรูพืชแบบผสมผสานเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการปกป้องพืช การวิจัยเรื่องนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์หรือถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้ากับวิธีเกษตรกรรมสำหรับควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียน โดยทดสอบในสวนทุเรียน คณะเกษตรศาสตร์ อำเภอยะใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2565 – กันยายน 2566 วางแผนการทดลองแบบสุ่มไม่บล็อกสมบูรณ์ จำนวน 3 กรรมวิธี ๆ ละ 3 ซ้ำ ดังนี้ 1) วิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลด้วยถุงสับบอนด์ 2) วิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลด้วยถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า และ 3) วิธีผสมผสานของเกษตรกรรมระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่น ผลการทดสอบพบว่า วิธีผสมผสานทุกกรรมวิธีป้องกันการทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียนได้ 100% โดยผลทุเรียนมีคุณภาพไม่แตกต่างกัน และไม่พบสารเคมีตกค้างในผลทุเรียน วิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ ให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนสูงสุดเท่ากับ 12.84 รองลงมาได้แก่ การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่น (12.21) และ การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลด้วยถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า (11.18) ดังนั้น การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการจัดการหนอนเจาะผลทุเรียน ที่ช่วยปกป้องสภาพแวดล้อมและสร้างระบบนิเวศเกษตรให้ยั่งยืนยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช, การห่อผล, หนอนเจาะผล, ทุเรียน

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกทุเรียนสดมากเป็นอันดับ 1 ของโลก ในปี 2565 มีปริมาณการส่งออกประมาณ 827,090 ตัน คิดเป็นมูลค่า 110, 144 ล้านบาท (Office of Agricultural Economics, 2023) เนื่องจากความต้องการในตลาดต่างประเทศที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกทุเรียนเพิ่มมากขึ้น โดยพื้นที่ที่นิยมปลูกและเป็นพื้นที่ขึ้นชอบของผู้บริโภค ได้แก่ พันธุ์หมอนทอง ในปี 2566 นครศรีธรรมราชเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกทุเรียนประมาณ 101,648 ไร่ เป็นลำดับที่ 4 ของประเทศ โดยมีพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้นจากปี 2565 คิดเป็น 7.21% มีพื้นที่ให้ผลผลิตแล้ว 69,994 ไร่ เพิ่มขึ้นจากปี 2565 คิดเป็น 14.43% (Office of Agricultural Economics, 2024) ปัญหาสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการผลิตทุเรียนของกลุ่มเกษตรกรในจังหวัดนครศรีธรรมราช คือ การระบาดของหนอนเจาะผลทุเรียน *Conogethes punctiferalis* Guenée (Lepidoptera: Crambidae) ระยะตัวเต็มวัยของแมลงศัตรูชนิดนี้เป็นผีเสื้อกลางคืนขนาดเล็ก ปีกทั้งคู่มีสีเหลืองถึงส้มและมีจุดสีดำกระจายทั่วปีก ตัวเต็มวัยเพศเมียมีพฤติกรรมวางไข่บนเปลือกผลทุเรียน ระยะไข่อายุ 4 วัน จึงฟักเป็นตัวหนอน หนอนวัยแรกจะแทะกินผิวเปลือกทุเรียน เริ่มเข้าทำลายเนื้อข้างในเมื่อเจริญเติบโตขึ้น และเข้ากัดแฉะระหว่างหนามบนเปลือกทุเรียน โดยสร้างใยและปล่อยมูลหุ้ม เนื้อทุเรียนจะแสดงอาการเน่าและร่วงหล่นเมื่อผลสุก หนอนใช้ระยะเวลาเจริญเติบโต 12 - 13 วัน ระยะดักแด้ 7 - 9 วัน ระยะตัวเต็มวัยเพศผู้ 10-18 วัน และเพศเมีย 14-18 วัน เมื่อเลี้ยงด้วยผลละหุ่ง การเข้าทำลายสามารถพบได้ตั้งแต่ทุเรียนอายุ 2 เดือนจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยสังเกตจากมูลและรังของหนอนที่เปลือกของผลทุเรียนได้อย่างชัดเจน (Department of Agriculture, 2007) การเข้าทำลายของหนอนส่งผลให้การค้ารับซื้อทุเรียนลดต่ำลง

หรือไม่สามารถจำหน่ายผลทุเรียนได้ การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชเป็นวิธีปฏิบัติที่เกษตรกรนิยมใช้ควบคุมหนอนชนิดนี้ ยกตัวอย่างเช่น กลุ่มเกษตรกรทุเรียนแปลงใหญ่อำเภอยะใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีการใช้สารป้องกันกำจัดโรคและแมลงศัตรูพืช เช่น คาร์บาริล (carbaryl) และ คาร์โบซัลแฟน (carbosulfan) ตั้งแต่เตรียมต้นจนถึงเก็บเกี่ยวผลผลิตทุเรียนไม่น้อยกว่า 12 ครั้ง (Vanichpakorn *et al.*, 2022) การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชผิดวิธีหรือต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของเกษตรกร และสิ่งมีชีวิตที่มีประโยชน์ต่อระบบนิเวศ เช่น แมลงศัตรูธรรมชาติ แมลงผสมเกสร และนก เป็นต้น พิษตกค้างของสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชยังก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค รวมทั้งเป็นปัญหาสำคัญต่อการส่งออกทุเรียนไปต่างประเทศ ซึ่งกฎหมายกำหนดให้การผลิตทุเรียนต้องอยู่ภายใต้การรับรองมาตรฐาน GAP และผลผลิตทุเรียนต้องปลอดจากสารพิษตกค้าง

การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ จัดเป็นวิธีผสมผสานที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียน โดย Vorakulduromrongchai *et al.* (2018) รายงานว่า การป้องกันกำจัดศัตรูทุเรียนโดยวิธีผสมผสานด้วยการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ถุงกระดาษห่อขนุน ถุงกระดาษคาร์บอน 2 ชั้น ถุงกระดาษคราฟท์ห่อกล้วย ถุงรีเมย์ ถุงตาข่ายไนลอนสีน้ำเงิน ถุงพลาสติกชนิดมีหูหิ้วแบบใส และถุงพลาสติกชนิดมีหูหิ้วสีน้ำเงิน เมื่อผลอายุ 1.5 เดือนจนถึงเก็บเกี่ยว สามารถควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียน 100% ช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดการใช้สารเคมีในช่วงผลทุเรียนอายุ 1.5 เดือนถึงระยะเก็บเกี่ยวอย่างน้อย 5 ครั้ง ให้กับเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนในจังหวัดจันทบุรี นอกจากนี้ Vanichpakorn *et al.* (2022) ได้คัดเลือกวิธีการควบคุม

หนอนเจาะผลทุเรียนในพื้นที่เกษตรกรรมอำเภอช้างกลาง จังหวัดนครศรีธรรมราช และพบว่า การฉีดพ่นสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชอะบาเม็คติน 1.8% EC จำนวน 1 ครั้ง เมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน ร่วมกับห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ หรือถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า เมื่อผลทุเรียนอายุ 6 สัปดาห์หลังดอกบาน จนถึงระยะเก็บเกี่ยว เป็นวิธีผสมผสานที่เหมาะสมสามารถป้องกันการเข้าทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน 100% ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพภายนอกของผล รวมทั้งให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูง ส่วนการไม่ใช้วิธีใด ๆ ควบคุมหนอนชนิดดังกล่าว พบความเสียหายของผลทุเรียนเฉลี่ย 53.33 - 66.67% ในสัปดาห์ที่ 5 - 16 หลังดอกบาน ปัจจุบันเกษตรกรในจังหวัดนครศรีธรรมราชตระหนักถึงความสำคัญของการผลิตทุเรียนปลอดภัยตามมาตรฐาน GAP โดยเริ่มนำวิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่นมาใช้ควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียนในบางพื้นที่ของอำเภอช้างกลาง และอำเภอทุ่งใหญ่ เป็นต้น ซึ่งพบข้อจำกัดคือ เมื่อผลทุเรียนมีขนาดใหญ่ขึ้น หนามทุเรียนแทงลงจนฉีกขาดเป็นช่องทางให้แมลงเข้าทำลายได้ นอกจากนี้เปลือกผลทุเรียนมีสีเหลืองเข้มออกส้ม ไม่เป็นที่ต้องการของตลาดรับซื้อ ซึ่งตลาดต้องการหนามมีสีเขียวหรือสีน้ำตาลอมเขียว รวมทั้งถ้าเจาะรูระบายอากาศไม่ดี มีน้ำขังอยู่ภายในถุง ทำให้ผลทุเรียนเป็นแผลสีน้ำตาล ขายได้ในราคาต่ำอีกด้วย แต่ยังไม่มีการนำวิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ หรือถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า มาใช้ควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียน ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีผสมผสานในการควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียน ระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ หรือถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า กับวิธีผสมผสานของเกษตรกรระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตทุเรียนของเกษตรกรให้มีคุณภาพต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การศึกษาผลการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนเพื่อควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียน

ดำเนินการทดสอบในสวนทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุ 7 - 8 ปี ระยะปลูก 10 x 10 เมตร ของคณะเกษตรศาสตร์ อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2565 - กันยายน 2566 เตรียมความพร้อมของต้นทุเรียนหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต ด้วยการตัดแต่งกิ่ง แล้วใส่ปูนโดโลไมท์อัตรา 2 กิโลกรัม/ต้น ใส่ปุ๋ยหมักผสมเชื้อราเขียว *Metarhizium anisopliae* อัตรา 50 กิโลกรัม/ต้น และปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 2 กิโลกรัม/ต้น ช่วงกระตุนการออกดอก ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 18-24-24 อัตรา 2 กิโลกรัม/ต้น ระยะออกดอก ฉีดพ่นปุ๋ยทางใบแคลเซียม โบรอน ชื่อการค้า

โฟแม็กซ์ 400 (Phomax 400) อัตรา 20 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร จำนวน 2 ครั้ง ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 0-0-60 (1 ส่วน) ผสมปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 (3 ส่วน) อัตรา 1.5 กิโลกรัม/ต้น ควบคุมการให้น้ำ ตัดแต่งดอก และช่วยผสมเกสร ระยะพัฒนาของผล ตัดแต่งผลอ่อน ควบคุมการให้น้ำ ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 0-0-60 อัตรา 0.5 กิโลกรัม/ต้น จำนวน 4 ครั้ง พ่นปุ๋ยทางใบแคลเซียม โบรอน ชื่อการค้า โฟแม็กซ์ 400 (Phomax 400) อัตรา 20 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร จำนวน 3 ครั้ง พ่นสารป้องกันกำจัดเชื้อราเมทาแลกซิล (metalaxyl) 25% WP ชื่อการค้า โซแลกซิล (solaxyl) อัตรา 40 กรัม/น้ำ 1 ลิตร ป้องกันโรคผลเน่า เมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน โยงกิ่งเพื่อป้องกันกิ่งหัก และกำจัดวัชพืชระหว่างต้นและแถวทุเรียน สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับห่อผลทุเรียนด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) จำนวน 3 กรรมวิธี ๆ ละ 3 ซ้ำ โดยใช้ทุเรียน 1 ต้น/ซ้ำ ระยะห่างของต้นทุเรียนระหว่างซ้ำ 20 เมตร และระหว่างกรรมวิธี 20 เมตร ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 วิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช ร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์

สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ใช้ได้แก่ แลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน (lambda-cyhalothrin) และอะบาเม็คติน (abamectin) ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (Srijuntra, 2022) โดยพ่นสารจำนวน 3 ครั้งดังนี้ ครั้งที่ 1 พ่นสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน ชื่อการค้า คิวทาโร (Kuetaro) 2.5% W/V EC อัตรา 20 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร ก่อนดอกบาน 6 สัปดาห์ ครั้งที่ 2 พ่นสารอะบาเม็คติน ชื่อการค้า แจคเก็ต (Jacket) 1.8% W/V EC อัตรา 15 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร ก่อนดอกบาน 3 สัปดาห์ และครั้งที่ 3 พ่นสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน ชื่อการค้า คิวทาโร อัตรา 20 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร เมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน ส่วนการห่อผลทุเรียนใช้ถุงผ้าสับบอนด์หนา 30 แกรม ขนาด 19 x 21 นิ้ว (กว้าง x ยาว) เมื่อผลทุเรียนอายุ 6 สัปดาห์หลังดอกบานจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยสุ่มห่อผลจำนวน 3 ต้น ๆ ละ 20 ผล (ซ้ำ)

กรรมวิธีที่ 2 วิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช ร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า

สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ใช้ได้แก่ สารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน และสารอะบาเม็คติน โดยฉีดพ่นสารจำนวน 3 ครั้ง เช่นเดียวกับกรรมวิธีที่ 1 ส่วนการห่อผลทุเรียนใช้ถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้าขนาด 21.5 x 35 นิ้ว (กว้าง x ยาว) ห่อผล 2 ชั้น เมื่อผลทุเรียนอายุ 6 สัปดาห์หลังดอกบานจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยสุ่มห่อผลจำนวน 3 ต้น ๆ ละ 20 ผล (ซ้ำ)

กรรมวิธีที่ 3 วิธีผสมผสานของเกษตรกรระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช ร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่น

สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ใช้ได้แก่ สารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน และสารอะบาเม็คติน โดยฉีดพ่นสารจำนวน 3 ครั้ง เช่นเดียวกับการวิธีที่ 1 สำหรับการห่อผลทุเรียนใช้ถุงพลาสติกแบบขุ่นขนาด 15 x 30 นิ้ว (กว้าง x ยาว) เมื่อผลอายุ 6 สัปดาห์หลังดอกบานจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยตัดที่ก้นถุง 4 แนวยาว 2 เซนติเมตร และสุ่มห่อผลจำนวน 3 ต้น ๆ ละ 20 ผล (ซ้ำ)

2.2 การบันทึกข้อมูล ดำเนินการดังนี้

2.2.1 ความเสียหายของผลทุเรียนที่เกิดจากการทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน

สำรวจผลทุเรียนที่ถูกหนอนเจาะผลทุเรียนทำลายทุกสัปดาห์ โดยประเมินด้วยสายตาจากอาการเปลือกผลทุเรียนเป็นแผลสีน้ำตาลถึงสีน้ำตาลเข้มเห็นมูลและรังของหนอนอย่างชัดเจนและมีน้ำไหลจากแผล สุ่มจากผลทุเรียนที่ห่อผลด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ จำนวน 10 ผล/ต้น เริ่มสำรวจความเสียหายครั้งแรกเมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบานจนถึงอายุ 16 สัปดาห์หลังดอกบานรวม 12 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของผลทุเรียนดังสมการ

$$\text{ความเสียหายของผลทุเรียน (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{จำนวนผลทุเรียนที่ถูกหนอนทำลาย}}{\text{จำนวนผลทุเรียนทั้งหมดที่สุ่มตัวอย่าง (10 ผล)}} \times 100$$

2.2.2 น้ำหนักผลผลิต

เก็บเกี่ยวผลทุเรียนเมื่ออายุ 17 สัปดาห์หลังดอกบาน (120 วัน) โดยสุ่มเก็บผลทุเรียนที่ห่อผลด้วยวัสดุแต่ละชนิดจำนวน 15 ผล/ต้น นำมาชั่งน้ำหนักผลผลิตดีและผลผลิตเสีย นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นน้ำหนักรวมผลผลิตดีและผลผลิตเสียที่เกิดจากการทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน น้ำหนักต่อผลของผลผลิตดีและผลผลิตเสียดังสมการ

น้ำหนักรวมผลผลิตดี (กิโลกรัม) = ผลรวมของน้ำหนักผลผลิตดีจากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 15 ผล

น้ำหนักรวมผลผลิตเสีย (กิโลกรัม) = ผลรวมของน้ำหนักผลผลิตเสียจากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 15 ผล

น้ำหนักต่อผลของผลผลิตดี (กิโลกรัม/ผล) = ผลรวมของน้ำหนักผลผลิตดี/จำนวนผลผลิตดี

น้ำหนักต่อผลของผลผลิตเสีย (กิโลกรัม/ผล) = ผลรวมของน้ำหนักผลผลิตเสีย/จำนวนผลผลิตเสีย

2.2.3 คุณภาพภายนอกของผลทุเรียน

สุ่มเก็บผลทุเรียนระยะเก็บเกี่ยวอายุ 17 สัปดาห์หลังดอกบาน (120 วัน) ที่ห่อผล จำนวน 3 ผล/ต้น นำมาตรวจสอบคุณภาพภายนอกโดยบันทึกข้อมูลสีเปลือก และสีเนื้อของผลทุเรียนเทียบกับแผ่นเทียบสีของ The Royal Horticultural Society ตามวิธีการของ Vorakuldumrongchai *et al.* (2018)

2.2.4 คุณภาพภายในของผลทุเรียน

นำผลทุเรียนที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพภายนอกตามข้อ 2.2.3 มาวิเคราะห์คุณภาพภายในของผลทุเรียนได้แก่ น้ำหนักสด (กิโลกรัม/ผล) ความหนาเปลือก (เซนติเมตร) น้ำหนักเปลือก (กรัม/ผล) น้ำหนักเนื้อ (กรัม/ผล) น้ำหนักเมล็ด (กรัม/ผล) ความแน่นเนื้อ (นิวตัน) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์)

2.2.5 วิเคราะห์สารเคมีตกค้างในเนื้อทุเรียน

นำผลทุเรียนระยะเก็บเกี่ยวอายุ 17 สัปดาห์หลังดอกบาน (120 วัน) ที่ห่อผลจำนวน 2 ผล/ต้น มาวิเคราะห์สารเคมีตกค้างในเนื้อทุเรียนได้แก่ สารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน และสารอะบาเม็คติน หลังฉีดพ่นสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชครั้งสุดท้าย เมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน ณ บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด อำเภอดอนจาน จังหวัดสงขลา

2.2.6 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ

นำข้อมูลน้ำหนักผลผลิตจำนวน 15 ผล/ต้น ตามข้อ 2.2.2 รายได้จากการขายผลผลิต และต้นทุนทั้งหมดในการจัดการหนอนเจาะผลทุเรียน กำไรสุทธิ มาวิเคราะห์หาสัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนดัดแปลงจากวิธีการของ Srijuntra *et al.* (2016)

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของผลทุเรียน น้ำหนักรวมผลผลิตดีและผลผลิตเสีย น้ำหนักต่อผลของผลผลิตดีและผลผลิตเสีย น้ำหนักสด ความหนาเปลือก น้ำหนักเปลือก น้ำหนักเนื้อ น้ำหนักเมล็ด ความแน่นเนื้อ และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ในแต่ละกรรมวิธี มาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ด้วยโปรแกรม SPSS (V.20)

Table 1 Effect of combination between insecticides and different materials of fruit bagging for the management of *Conogethes punctiferalis* on durian fruit damage at the durian orchard in Thung Yai District, Nakhon Si Thammarat Province during November 2022 to September 2023.

Treatments	Durian fruit damage (Mean $\pm$ SD, %)					
	Weeks after the flowers bloomed					
	5	6	7	8	9	10
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1 = spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag

2 = spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag

3 = spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice)

Table 1 (Continuous)

Treatments	Durian fruit damage (Mean $\pm$ SD, %)					
	Weeks after the flowers bloomed					
	11	12	13	14	15	16
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1 = spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag

2 = spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag

3 = spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ความเสียหายของผลทุเรียนที่เกิดจากการทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน

การสำรวจความเสียหายของผลทุเรียนตั้งแต่ผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน จนถึงผลทุเรียนอายุ 16 สัปดาห์หลังดอกบาน ไม่พบความเสียหายของผลทุเรียนที่เกิดจากการทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน ซึ่งผลการสำรวจชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการจัดการหนอนเจาะผลทุเรียนโดยใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ หรือถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า หรือถุงพลาสติกแบบขุ่น สามารถป้องกันการเข้าทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน 100% (Table 1)

3.2 น้ำหนักผลผลิต

ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) ของน้ำหนักรวมผลผลิตดีและผลผลิตเสียของทุเรียนระหว่างกรรมวิธี การใช้สาร

ป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับห่อผลทุเรียนด้วยถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า มีแนวโน้มให้น้ำหนักผลผลิตดีรวมเฉลี่ยสูงสุด 49.34 กิโลกรัม/15 ผล รองลงมาได้แก่ การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ (45.55 กิโลกรัม/15 ผล) ในขณะที่กรรมวิธีที่ 3 คือ การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่น มีแนวโน้มให้น้ำหนักผลผลิตดีรวมเฉลี่ยต่ำสุด 42.20 กิโลกรัม/15 ผล นอกจากนี้ไม่พบผลผลิตเสียในทุกกรรมวิธี เมื่อพิจารณาน้ำหนักเฉลี่ยต่อผลทั้งของผลผลิตดีและผลผลิตเสีย ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างกรรมวิธีเช่นเดียวกัน โดยกรรมวิธีที่ 2 มีแนวโน้มให้น้ำหนักผลผลิตดีเฉลี่ยสูงสุด 3.29 กิโลกรัม/ผล รองลงมาได้แก่ กรรมวิธีที่ 1 (3.03 กิโลกรัม/ผล) ส่วนกรรมวิธีที่ 3 มีแนวโน้มให้น้ำหนักผลผลิตดีเฉลี่ยต่ำสุด 2.81 กิโลกรัม/ผล (Table 2)

Table 2 Effect of combination between insecticides and different materials of fruit bagging for the management of *Conogethes punctiferalis* on fruit weight of durian at the durian orchard in Thung Yai District, Nakhon Si Thammarat Province during November 2022 to September 2023.

Treatments	Total fruit weight (Mean±SD, kg/15 fruits)		Average fruit weight (Mean±SD, kg/fruit)	
	Undamaged fruit	Damaged fruit	Undamaged fruit	Damaged fruit
1	45.55±6.85	0.00	3.03±0.47	0.00
2	49.34±13.87	0.00	3.29±0.92	0.00
3	42.20±5.91	0.00	2.81±0.40	0.00
F-Test	ns	-	ns	-
CV %)	17.50	-	17.66	-

1 = spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag

2 = spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag

3 = spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice)

ns = not significant.

Table 3 Effect of combination between insecticides and different materials of fruit bagging for the management of *Conogethes punctiferalis* on peel and pulp color of durian at the durian orchard in Thung Yai District, Nakhon Si Thammarat Province during November 2022 to September 2023.

Treatments	Peel color	Pulp color
1	Green	Yellow, Pale yellow
2	Greenish brown	Yellow, Pale yellow
3	Deep yellow	Yellow, Pale yellow

1 = spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag

2 = spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag

3 = spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice)

3.3 คุณภาพภายนอกของผลทุเรียน

เมื่อพิจารณาสีเปลือกและสีเนื้อของทุเรียน พบว่า ผลทุเรียนในกรรมวิธีที่ 1 เปลือกทุเรียนมีสีเขียว ส่วนเนื้อทุเรียนมีสีเหลืองสวสดำเสมอ บางผลมีสีเหลืองนวล สำหรับผลทุเรียนในกรรมวิธีที่ 2 เปลือกทุเรียนมีสีน้ำตาลอมเขียว ส่วนเนื้อทุเรียนมีสีเหลืองสวสดำเสมอ บางผลมีสีเหลืองนวล ส่วนผลทุเรียนในกรรมวิธีที่ 3 พบว่า เปลือกทุเรียนมีสีเหลืองเข้ม เนื้อทุเรียนมีสีเหลืองสวสดำเสมอ บางผลมีสีเหลืองนวล (Table 3)

3.4 คุณภาพภายในของผลทุเรียน

ผลการตรวจสอบคุณภาพภายในของผลทุเรียนที่ระยะเก็บเกี่ยว ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) ของน้ำหนักสด ความหนาเปลือก น้ำหนักเปลือก น้ำหนักเมล็ด ความแน่นเนื้อ และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ระหว่างกรรมวิธี ยกเว้นน้ำหนักของเนื้อทุเรียนที่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยผลทุเรียนในกรรมวิธีที่ 2 มีน้ำหนักเนื้อมากที่สุดเฉลี่ย 1,650.00

กรัม/ผล ในขณะที่ผลทุเรียนในกรรมวิธีที่ 3 มีน้ำหนักเนื้อน้อยสุดเฉลี่ย 1,250.00 กรัม/ผล แต่ไม่แตกต่างจากกรรมวิธีที่ 1 (1,266.67 กรัม/ผล) (Table 4)

Table 4 Effect of combination between insecticides and different materials of fruit bagging for the management of *Conogethes punctiferalis* on the internal quality of durian at the durian orchard in Thung Yai District, Nakhon Si Thammarat Province during November 2022 to September 2023.

Treatments	Internal quality of durian (Mean ± SD, %)						
	Fresh weight (kg/fruit)	Peel thickness (cm)	Peel weight (g/fruit)	Flesh weight ¹ (g/fruit)	Seed weight (g/fruit)	Pulp firmness (N)	Total soluble solids (°Brix)
1	3.11±0.78	1.04±0.17	1,733.33±404.15	1,266.67±305.51 ^b	116.67±76.38	12.58±5.77	27.69±3.47
2	3.86±0.67	1.01±0.25	2,116.67±652.56	1,650.00±350.00 ^a	96.68±15.28	13.51±0.99	26.60±4.91
3	3.25±0.55	1.18±0.14	1,833.33±288.68	1,250.00±278.39 ^b	163.33±32.15	12.76±4.65	31.70±5.47
F-Test	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
CV (%)	20.41	28.04	20.14	10.36	25.02	28.44	19.57

1 = spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag

2 = spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag

3 = spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice)

¹ Means in the same column followed by same letters are not significantly different at the 5% probability level by Duncan's New Multiple Range Test (DMRT).

ns = not significant.

Table 5 Effect of combination between insecticides and different materials of fruit bagging for the management of *Conogethes punctiferalis* on insecticides residues in durian pulp at the durian orchard in Thung Yai District, Nakhon Si Thammarat Province during November 2022 to September 2023.

Treatments	Insecticides residues (ppm)	
	Lambda-cyhalothrin	Abamectin
1	ND	ND
2	ND	ND
3	ND	ND

1 = spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag

2 = spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag

3 = spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice)

ND = Non-detectable

Table 6 Comparison of benefit-cost ratio for management of *Conogethes punctiferalis* with the combination between insecticides and different materials of fruit bagging at the durian orchard in Thung Yai District, Nakhon Si Thammarat Province during November 2022 to September 2023.

Items	Treatments		
	1	2	3
Cost of <i>C. punctiferalis</i> control (Baht/plant, C)	461.13	573.63	344.88
1. Insecticide	16.13	16.13	16.13
2. Bag for durian bagging	150.00	262.50	33.75
3. Application labor	195.00	195.00	195.00
4. Miscellaneous (Fuel)	100.00	100.00	100.00
Marketable yield (kg/15 fruits/plant)	45.55	49.34	42.20
Average income (Baht/plant, R)	5,921.50	6,414.20	4,211.00
Net income (Baht/plant)	5,460.37	5,840.57	3,866.12
Benefit-cost ratio (R/C)	12.84	11.18	12.21

1 = spray of insecticide + fruit bagging with spun-bonded bag

2 = spray of insecticide + fruit bagging with blue nylon bag

3 = spray of insecticide + fruit bagging with plastic bag (farmer's practice)

3.5 สารพิษตกค้างในผลทุเรียน

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารเคมีตกค้างในผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่ระยะเก็บเกี่ยว จำนวน 2 ชนิดได้แก่ สารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน และสารอะบาเม็กติน ปรากฏว่า ไม่พบสารเคมีตกค้างทั้ง 2 ชนิด ในผลทุเรียนทุกกรรมวิธี (Table 5)

3.6 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ

ผลการศึกษาผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ พบว่า กรรมวิธีที่ 1 ให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนสูงสุดเท่ากับ 12.84 โดยมีต้นทุนในการจัดการหอนเจาะผลทุเรียนรวม 461.13 บาท แบ่งเป็นค่าสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช 16.13 บาท ค่าแรงงานในการห่อผลทุเรียนและฉีดพ่นสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชเป็นเงิน 195.00

บาท ค่าถุงสับบอนด์จำนวน 15 ถุงๆละ 10 บาท รวมเป็นเงิน 150 บาท และอื่น ๆ ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 100.00 บาท ได้ผลผลิตเฉลี่ย 45.55 กิโลกรัม/15 ผล/ต้น มีรายได้จากการขายทุเรียน 5,921.50 บาท โดยขายทุเรียนได้ในราคา กิโลกรัมละ 130.00 บาท และมีกำไรสุทธิ 5,460.37 บาท รองลงมาได้แก่ กรรมวิธีที่ 3 ให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนเท่ากับ 12.21 มีต้นทุนในการจัดการหอนเจาะผลทุเรียนต่ำสุดรวม 344.88 บาท แบ่งเป็นค่าถุงพลาสติกที่ใช้ห่อผลเป็นเงิน 33.75 บาท (2.25 บาท/ถุง) ส่วนต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เหลือเท่ากับกรรมวิธีที่ 1 กรรมวิธีที่ 3 ได้ผลผลิตเฉลี่ย 42.20 กิโลกรัม/15 ผล มีรายได้จากการขายผลผลิต 4,211.00 บาท แบ่งเป็นผลทุเรียนที่มีคุณภาพดีจำนวน 16.70 กิโลกรัม ขายได้ในราคา 130 บาท/กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 2,171 บาท และผลทุเรียนที่มีตำหนิ (เปลือกทุเรียนมีสีเหลืองส้ม หรือ เปลือกผลทุเรียน

มีเมล็ดสีน้ำตาลดำ) จำนวน 25.50 กิโลกรัม ขายได้ในราคา 80 บาท/กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 2,040.00 บาท โดยมีกำไรสุทธิ 3,866.12 บาท ส่วนกรรมวิธีที่ 2 ให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนต่ำสุดเท่ากับ 11.18 มีต้นทุนในการจัดการหนอนเจาะผลทุเรียนสูงสุดรวม 573.63 บาท แบ่งเป็นค่าถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้าราคา 17.50 บาท/ถุง รวมเป็นเงิน 262.50 บาท ส่วนค่าใช้จ่ายที่เหลือเท่ากับกรรมวิธีที่ 1 กรรมวิธีที่ 2 ได้ผลผลิตเฉลี่ย 49.34 กิโลกรัม/15 ผล เป็นผลผลิตมีคุณภาพภายนอกตรงตามความต้องการของตลาดรับซื้อ ขายได้ในราคา 130 บาท/กิโลกรัม มีรายได้รวม 6,414.20 บาท และมีกำไรสุทธิเฉลี่ย 5,840.57 บาท (Table 6)

การบริหารแมลงศัตรูพืชเป็นเทคโนโลยีที่สามารถควบคุมแมลงศัตรูพืชอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เทคนิคในการบริหารแมลงศัตรูพืชทำได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้วิธีเขตกรรม วิธีกล ใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช ใช้ศัตรูธรรมชาติของแมลงศัตรูพืช หรือการใช้วิธีผสมผสานซึ่งเป็นการควบคุมแมลงศัตรูพืชโดยใช้วิธีการต่าง ๆ ตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไปร่วมกัน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการควบคุมศัตรูพืช และได้รับผลตอบแทนสูงสุดทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสภาพแวดล้อม ซึ่งการควบคุมแมลงศัตรูพืชโดยวิธีผสมผสานเป็นเทคนิคที่ดีที่สุดของการบริหารศัตรูพืช งานวิจัยเรื่องนี้ได้นำวิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ หรือถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า เพื่อใช้ในการจัดการหนอนเจาะผลทุเรียน เปรียบเทียบกับการจัดการของเกษตรกรซึ่งใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่น ผลการทดสอบพบว่า การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด สามารถป้องกันการเข้าทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน 100% สอดคล้องกับ Vorakuldumrongchai *et al.* (2018) รายงานว่า การป้องกันกำจัดศัตรูทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยวิธีผสมผสานด้วยการพ่นสารเคมีป้องกันกำจัดโรคและแมลงตามคำแนะนำของศูนย์วิจัยพืชสวนจันทร์บุรี เริ่มตั้งแต่การเตรียมต้นจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ร่วมกับการห่อผลทุเรียนเมื่อผลอายุ 1.5 เดือนจนถึงเก็บเกี่ยวด้วยวัสดุห่อผล 7 ชนิด ได้แก่ ถุงตาข่ายไนลอนสีน้ำเงิน ถุงกระดาษห่อขุ่น ถุงกระดาษคาร์บอน 2 ชั้น ถุงกระดาษคราฟท์ห่อกล้วย ถุงรีเมย์ ถุงพลาสติกชนิดมีหูหิ้วแบบใส และถุงพลาสติกชนิดมีหูหิ้วสีน้ำเงิน ทุกวิธีสามารถป้องกันกำจัดหนอนเจาะผลทุเรียน หนอนเจาะเมล็ดทุเรียน เพลี้ยชนิดต่าง ๆ รวมทั้งโรคราดำและโคนเน่า 100% การห่อผลยังช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดการใช้สารเคมีโดยสามารถลดจำนวนครั้งในการพ่นสารเคมีในช่วงผลทุเรียนอายุ 1.5 เดือนถึงระยะเก็บเกี่ยวอย่างน้อย 5 ครั้ง และยังสามารถลดต้นทุนการห่อผลได้ เมื่อเทียบกับกรรมวิธีที่ไม่ห่อผล การห่อผลยังช่วยลดต้นทุนการผลิตทุเรียนให้กับเกษตรกร เนื่องจากลด

ปริมาณการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในช่วงการเจริญเติบโตของผลถึงเก็บเกี่ยวได้น้อย 7 ครั้ง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับรายงานวิจัยในต่างประเทศ โดย Nguyen *et al.* (2022) ศึกษาชนิดของวัสดุห่อผลล้นจี 4 ชนิด ได้แก่ ถุงนอนวูฟเวน ถุงตาข่าย ถุงผ้าฝ้ายสีขาว และถุงพลาสติก ต่อการป้องกันการเข้าทำลายของหนอนเจาะผลล้นจี (*C. punctiferalis*) เปรียบเทียบกับการไม่ห่อผล ผลการศึกษาพบว่า วัสดุห่อผลทั้ง 4 ชนิด ป้องกันการทำลายของหนอนเจาะผลล้นจี 100% ในขณะที่กรรมวิธีไม่ห่อผลพบการทำลายของหนอนเจาะผล 7.22% นอกจากนี้การห่อผลล้นจีด้วยวัสดุทั้ง 4 ชนิด ยังพบอัตราการร่วงของผล 30.73 - 35.38% น้อยกว่ากรรมวิธีไม่ห่อผลซึ่งมีการร่วงของผล 47.14%

นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับวัสดุห่อผล ในการป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชในพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น ๆ ที่สอดคล้องกับการวิจัยครั้งนี้ เช่น Srijuntra *et al.* (2011) รายงานว่า การใช้สาร permethrin/phosalone 28.75% EC อัตรา 40 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร จำนวน 4 ครั้ง แล้วห่อผลส้มโอด้วยถุงสับบอนด์ หรือถุงผ้าไนลอน เมื่อผลอายุ 1.5 เดือนจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ช่วยป้องกันการเข้าทำลายของหนอนเจาะผลส้มโอได้ดี Rueangkhanab *et al.* (2015) ทดสอบวัสดุห่อผลที่เหมาะสมในการผลิตลองกองคุณภาพในจังหวัดสงขลา ได้แก่ ถุงตาข่ายไนลอน ถุงผ้าตาข่าย ถุงพลาสติกหุ้ม และถุงกระดาษเคลือบไข (ขุนฟง) เปรียบเทียบกับผลลองกองที่ไม่มีการห่อผล ผลปรากฏว่าการห่อผลด้วยถุงตาข่ายไนลอน พบแมลงและมีเปอร์เซ็นต์ผลเน่า น้อยกว่าวัสดุห่อผลชนิดอื่น ๆ Suthi-aromna *et al.* (2016) ศึกษาเทคโนโลยีการห่อผลเพื่อป้องกันกำจัดแมลงวันผลไม้ในแก้วมังกรโดยใช้วัสดุห่อผล 6 ชนิด ได้แก่ ถุงพลาสติก ถุงเคลือบสารเคมี ถุงใยสังเคราะห์ ถุงห่อผลไม้สำเร็จรูปขุนฟง ถุงกระดาษสีน้ำตาล และถุงผ้าไนลอน เปรียบเทียบกับการไม่ห่อผล พบว่า ถุงห่อผลที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ให้ผลป้องกันการเข้าทำลายของแมลงวันผลไม้ 100% ในขณะที่กรรมวิธีไม่ห่อผลพบการทำลายของแมลงวันผลไม้ 24.57%

การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการห่อผลทุเรียน เป็นวิธีผสมผสานที่มีประสิทธิภาพในการจัดการหนอนเจาะผลทุเรียน การทดสอบครั้งนี้ใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ แลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน และอะบาเม็คติน ดิฟเฟอเรนเชียล 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 พ่นแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน ก่อนดอกทุเรียนบาน 6 สัปดาห์ ครั้งที่ 2 พ่นอะบาเม็คติน ก่อนดอกทุเรียนบาน 3 สัปดาห์ และครั้งที่ 3 พ่นแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน เมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน แลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินเป็นสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชในกลุ่ม 3 มีกลไกการออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท โดยไปปรับ (modulator) ของ voltage-gated sodium channel ที่บริเวณผิวแขนงประสาทขาออก (axon) ของเซลล์ประสาท ทำให้การเปิดของ voltage-gated sodium channel ช้ากว่าปกติ ส่งผลให้ช่วงการถ่ายทอดกระแสประสาทเกิดยาวนาน

(hyperexcitation) สารกลุ่มนี้ออกฤทธิ์รวดเร็วมาก ทำให้แมลงตายทันทีเมื่อแมลงได้รับสาร เรียกว่าการตายทันทีว่า “knockdown” ซึ่งกรมวิชาการเกษตรแนะนำให้ใช้แลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน 2.5% EC อัตรา 20 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร ป้องกันกำจัดหนอนเจาะผลทุเรียน โดยพ่นหลังจากทุเรียนติดผลแล้ว 1 เดือน พ่น 3 - 4 ครั้ง ทุก 20 วัน (Srijuntra, 2022) สำหรับประสิทธิภาพของสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินต่อการควบคุมหนอนเจาะผลทุเรียนในงานวิจัยครั้งนี้ สอดคล้องกับ Senthil Kumar *et al.* (2019) รายงานว่า การพ่นสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน 5% EC ในอัตรา 2 มิลลิลิตร/ลิตร จำนวน 2 ครั้ง สามารถป้องกันกำจัดหนอนเจาะลำต้นขมิ้นชัน (*C. punctiferalis*) โดยพบความเสียหายของลำต้นเพียง 1.0% เมื่อเทียบกับการฉีดพ่นน้ำซึ่งพบความเสียหายของลำต้นสูงถึง 35.0% ส่วนอะบาเม็คตินเป็นสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชในกลุ่ม 6 มีประสิทธิภาพในการควบคุมหนอนผีเสื้อชนิดต่าง ๆ (Ali, 2021) และเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำต่อแมลงศัตรูธรรมชาติ (Mahmoud, 2017) สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชชนิดนี้ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทและกล้ามเนื้อ โดยไปยับยั้งการนำกระแสประสาทระหว่างเซลล์ประสาทและเซลล์กล้ามเนื้อ กระตุ้นการจับของ glutamate ที่ glutamate-gated chloride channels บริเวณปลายเซลล์ประสาทที่เชื่อมต่อกับเซลล์กล้ามเนื้อ ทำให้แคลอไรด์ไอออนจำนวนมากไหลผ่านช่องแคลอไรด์เข้าไปในเซลล์ประสาท จึงเกิดการยับยั้งกระแสประสาท หรือเกิด hyperpolarization ขึ้น มีผลทำให้กล้ามเนื้อของแมลงเป็นอัมพาต (Morsy and Elwan, 2021) สาเหตุที่มีการใช้แลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน สลับกับอะบาเม็คติน ซึ่งมีกลไกการออกฤทธิ์ต่างกัน เพื่อป้องกันหนอนเจาะผลทุเรียนสร้างความต้านทานต่อสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช Plant Protection Research and Development Office (2021) สรุปไว้ว่า การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชแบบหมุนเวียนโดยแบ่งช่วงเวลาการพ่นสารกลุ่มต่าง ๆ เป็นช่วง ๆ ซึ่งมักมีระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงของแมลงหรือไรศัตรูพืช การพ่นสารแต่ละกลุ่มไม่ควรเกินระยะเวลา 1 ชั่วโมงแล้วในช่วงระยะเวลา 1 ชั่วโมงสุดท้ายถัดมาจะต้องหลีกเลี่ยงการใช้สารกลุ่มเดิมซ้ำกันอีก สามารถช่วยแก้ปัญหาความต้านทานสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชหรือไรศัตรูพืช

เมื่อพิจารณาน้ำหนักของผลผลิตทุเรียนที่ระยะเก็บเกี่ยว ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างกรรมวิธี อย่างไรก็ตาม ผลทุเรียนในวิธีผสมผสานที่ใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชรวมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงตาข่ายในลอนสีฟ้า มีแนวโน้มให้น้ำหนักผลผลิตสูงสุด เนื่องจากถุงตาข่ายในลอนสีฟ้ามีความห่างของรูตาข่ายมากกว่าถุงสับบอนด์หรือถุงพลาสติกแบบขุ่น ทำให้แสงส่องผ่านมายังผลทุเรียนได้มากกว่า การสังเคราะห์แสงสร้างอาหารจึงเกิดขึ้นมาก รวมทั้งการห่อผลทุเรียนด้วยถุงตาข่ายในลอนสีฟ้า ทำ 2 ชั้น ทำให้ผลทุเรียนสูญเสียความชื้นสัมพัทธ์จากการคายน้ำน้อย เมื่อพิจารณาคุณภาพภายนอกของผลทุเรียนที่ห่อด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ สีเปลือกทุเรียนมีความแตกต่างกันตั้งแต่สีน้ำตาล-

เขียว-เหลืองเข้ม โดยเฉพาะทุเรียนที่ห่อด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่นมีสีเหลืองเข้มหรือสีเหลืองส้ม ลักษณะเหมือนทุเรียนสุกงอม อาจเนื่องจากถุงพลาสติกแบบขุ่นลดความเข้มแสงที่ส่องเข้ามายังผล ทำให้เปลือกทุเรียนมีการสร้างสารสีแซนโทฟิลล์ แคโรทีน และแอนโทไซยานิน ขึ้นมาแทนที่สารคลอโรฟิลล์ สอดคล้องกับ Nagaharshitha *et al.* (2016) รายงานว่า มะม่วงที่ห่อผลด้วยถุงพลาสติกมีปริมาณสารสีแคโรทีนสูงกว่ามะม่วงที่ห่อผลด้วยถุงกระดาษหนังสือพิมพ์ หรือถุงกระดาษสีน้ำตาล ส่วนผลทุเรียนที่ห่อด้วยถุงตาข่ายในลอนสีฟ้าหรือถุงสับบอนด์มีสีใกล้เคียงกับทุเรียนที่ไม่ห่อผล ทุเรียนที่ห่อผลด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีสีเนื้อใกล้เคียงกันคือบางผลมีสีเหลืองนวล บางผลมีสีเหลืองสวรสมาเสมอ ส่วนคุณภาพภายในของผลทุเรียนไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามผลทุเรียนในวิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชรวมกับการห่อผลด้วยตาข่ายในลอนสีฟ้า ให้น้ำหนักเนื้อมากกว่าผลทุเรียนในกรรมวิธีที่ห่อผลด้วยถุงสับบอนด์หรือถุงพลาสติกแบบขุ่น อาจเนื่องจากได้รับแสงมากกว่า การสังเคราะห์แสงสร้างอาหารจึงสูง เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้พบว่า ผลทุเรียนในกรรมวิธีที่ห่อผลด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่นมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้หรือค่าความหวานสูง อาจเนื่องจากการห่อผลด้วยถุงพลาสติกมีการระบายอากาศไม่ดี ทำให้มีความร้อนสะสมอยู่ในถุงสูง สอดคล้องกับ Chumpookam *et al.* (2018) กล่าวไว้ว่า การห่อผลไม้ทำให้สภาพแวดล้อมของผลเกิดการเปลี่ยนแปลง มีความร้อนสะสมจากกระบวนการหายใจ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ สามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูงกว่าปกติ จึงเกิดการสะสมหรือสังเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้มากกว่าปกติ

สำหรับการตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในผลทุเรียน ไม่พบสารพิษตกค้างของสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชทั้ง 2 ชนิดในทุกกรรมวิธี แสดงให้เห็นว่า การฉีดพ่นสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชจำนวน 3 ครั้ง โดยครั้งสุดท้ายฉีดพ่นเมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน ผลทุเรียนมีความปลอดภัยต่อการบริโภค เนื่องจากช่วงเวลาที่ฉีดพ่นสารครั้งสุดท้ายจนถึงระยะเวลาเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นสัปดาห์ที่ 17 หลังดอกบาน มีช่วงเวลาห่างกัน 12 สัปดาห์ สารเคมีที่ใช้สลายตัวตามธรรมชาติ จึงมีความปลอดภัยต่อการบริโภค สอดคล้องกับ Katintet *et al.* (2022) ตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินในแปลงคະນ້າຈັງหวັດນครປູມและสุพรรณบุรี พบว่า มีการตกค้างในคະນ້ານานประมาณ 10 วันหลังการพ่นสาร โดยแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินถูกดูดซับได้ดีในส่วนของใบและลำต้นคະນ້า หลังจากนั้นจะค่อย ๆ สลายตัวไป และไม่พบการตกค้างในชวง 14 - 30 วัน จากปฏิกิริยา photolysis และ hydrolysis ในแปลง นอกจากนี้มีรายงานว่า สารอะบาเม็คตินมีความปลอดภัยสูงสำหรับผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการใช้สารดังกล่าวในพืชจะลดปริมาณของผลผลิตครั้งหนึ่งทุก ๆ 4 - 6 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุน พบว่าวิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ ให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนสูงสุดเท่ากับ 12.84 เนื่องจากกรรมวิธีดังกล่าวให้ปริมาณผลผลิตสูง การห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพภายนอกของทุเรียน เนื่องจากสามารถระบายน้ำและอากาศได้ดี โดยเปลือกทุเรียนมีสีเขียวตรงตามความต้องการของตลาดรับซื้อ รวมทั้งผลทุเรียนไม่มีตำหนิใด ๆ ที่เกิดจากการทำลายของโรคและแมลงศัตรูพืช เมื่อพิจารณาความทนทานของถุงสับบอนด์พบว่า หลังการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนสามารถนำถุงกลับมาใช้ซ้ำได้อีกในรอบการผลิตถัดไป ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตให้กับเกษตรกร อย่างไรก็ตามจากการสังเกตถุงสับบอนด์ที่ใช้ห่อผลทุเรียนบริเวณส่วนบนของต้นทุเรียนถูกแสงแดดและฝนมากกว่าส่วนล่างของต้น ทำให้ถุงบริเวณดังกล่าวได้รับความเสียหายไม่เกิน 10% ส่วนกรรมวิธีผสมผสานของเกษตรกรระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่นให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนรองลงมาเท่ากับ 12.21 โดยให้ปริมาณผลผลิตต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่น สาเหตุอาจเกิดจากถุงพลาสติกแบบขุ่นลดความเข้มแสงที่ส่องเข้ามายังผล ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงสร้างอาหารน้อย นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบคุณภาพภายนอกของทุเรียนที่ระยะเก็บเกี่ยวพบว่า ทุเรียนบางผลเป็นแผลไหม้สีน้ำตาล บางผลเปลือกมีสีเหลืองส้ม ไม่เป็นที่ต้องการของตลาดรับซื้อ ทำให้ขายทุเรียนได้ในราคาต่ำเพียงครึ่งหนึ่ง (80 บาท/กิโลกรัม) ของราคาทุเรียนคุณภาพ (130 บาท/กิโลกรัม) ซึ่งมีลักษณะสำคัญคือ เปลือกทุเรียนมีสีเขียวหรือน้ำตาลอมเขียว ผลไม่มีร่องรอยการถูกทำลายจากโรคและแมลงศัตรูพืช ผลทุเรียนที่ห่อด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่นเป็นแผลไหม้สีน้ำตาล อาจเกิดจากการห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติก มีการระบายน้ำและอากาศไม่ดีเท่าที่ควร มีความชื้นภายในถุงสูงซึ่งเป็นสภาพที่ส่งเสริมให้เชื้อจุลินทรีย์สาเหตุโรคพืชเข้าทำลายผล ทำให้เปลือกผลทุเรียนเป็นแผลสีน้ำตาลดำ จากการวินิจฉัยพบว่า ทุเรียนเป็นโรคผลเน่าจากการทำลายของเชื้อรา *Phytophthora palmivora* ส่วนสาเหตุที่เปลือกทุเรียนมีสีเหลืองส้มอาจเกิดจากเหตุผลดังกล่าวแล้วข้างต้น กรรมวิธีผสมผสานของเกษตรกรมีต้นทุนในการจัดการหนอนเจาะผลทุเรียนต่ำสุด เนื่องจากถุงพลาสติกที่ใช้ห่อผลมีราคาต่ำเพียง 2.25 บาท/ถุง เมื่อพิจารณาความทนทานของถุงพบว่า ถุงพลาสติกแบบขุ่นที่ใช้ห่อผลทุเรียนมีการฉีกขาด สาเหตุจากหนามทุเรียนไปเกี่ยวถุงเมื่อผลมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมทั้งเมื่อเก็บเกี่ยวทุเรียนวิธีที่สะดวกในการเอาทุเรียนออกจากถุงคือการกรีดถุงพลาสติกให้ขาด จึงทำให้ไม่สามารถนำถุงพลาสติกกลับมาใช้ห่อผลทุเรียนในฤดูการผลิตใหม่ได้ ต้องซื้อถุงใหม่ทุกครั้งเมื่อห่อผล ดังนั้นการห่อผลทุเรียนด้วยถุงพลาสติกแบบขุ่นมีข้อจำกัดเรื่องการระบายน้ำและอากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพภายนอกของผลทุเรียน ในขณะที่วิธีผสมผสานระหว่างการใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชร่วมกับการ

ห่อผลทุเรียนด้วยถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้า ให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนต่ำสุดเท่ากับ 11.18 เนื่องจากต้นทุนของถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้าเท่ากับ 17.50 บาท/ถุง ซึ่งสูงกว่าวัสดุห่อผลชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม วิธีผสมผสานดังกล่าวให้ปริมาณผลผลิตสูงสุด และเป็นผลผลิตที่มีคุณภาพภายนอกดีตรงตามความต้องการของตลาดรับซื้อ เนื่องจากถุงตาข่ายไนลอนเป็นวัสดุที่ระบายน้ำและอากาศได้ดี แสงสามารถส่องผ่านไปยังผลได้ และยังเป็นวัสดุห่อผลที่มีความทนทานไม่ได้รับความเสียหายจากการห่อผล สามารถนำกลับมาใช้ห่อผลทุเรียนในฤดูกาลใหม่ได้ทั้งหมด จึงมีแนวโน้มให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนสูงในปีที่ 2 ของการผลิตทุเรียน เนื่องจากไม่มีต้นทุนค่าถุงตาข่ายไนลอนสีฟ้าสำหรับห่อผล

4. สรุป

การใช้สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินและอะบาเม็คติน ฉีดพ่นสลับกัน 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 พ่นสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน ก่อนดอกบาน 6 สัปดาห์ ครั้งที่ 2 พ่นสารอะบาเม็คติน ก่อนดอกบาน 3 สัปดาห์ และครั้งที่ 3 พ่นสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน เมื่อผลทุเรียนอายุ 5 สัปดาห์หลังดอกบาน ร่วมกับการห่อผลทุเรียนด้วยถุงสับบอนด์ เมื่อผลทุเรียนอายุ 6 สัปดาห์หลังดอกบานจนถึงระยะเก็บเกี่ยว เป็นวิธีผสมผสานที่ป้องกันการเข้าทำลายของหนอนเจาะผลทุเรียน 100% ตั้งแต่ห่อผลจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพทั้งภายนอกและภายในของทุเรียน ผลทุเรียนมีความปลอดภัยจากสารพิษตกค้าง ช่วยลดอันตรายที่จะเกิดกับสุขภาพอนามัยของเกษตรกรและผู้บริโภค รวมทั้งให้สัดส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนสูงสุด

5. ข้อเสนอแนะ

การห่อผลทุเรียนเหมาะกับต้นทุเรียนที่มีความสูงไม่เกิน 5 เมตร หรือมีอายุประมาณ 6 - 8 ปี ดังนั้นควรพัฒนาต่อยอดผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์ที่สามารถห่อผลทุเรียนได้อย่างสะดวก ทั้งนี้เพื่อให้เกษตรกรสามารถผลิตทุเรียนอย่างมีคุณภาพ ปลอดภัยจากสารเคมีตกค้าง และให้ผลตอบแทนคุ้มค่าต่อการลงทุน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนทุนการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Ali, A.M. 2021. Efficacy and residual effect of abamectin and chlorpyrifos-methyl against the second larval instar of the cotton leafworm, *Spodoptera littoralis* (BOISD.) under field and semi-field condition. **Journal of Plant Protection and Pathology** 12(1): 5-9.
- Chumpookam, J., Ngeuntap, N., Namiki, I. and Chatbanyong, R. 2018. Effect of bagging materials on the quality of 'Nam Dok Mai No. 4' mango. **Thai Journal of Science and Technology** 7(4): 393-398. (in Thai)
- Department of Agriculture. 2007. **Quality Management System: GAP for Durian**. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Katintet, A., Phonkong, J. and Klaimala, P. 2022. **Research Report on Risk Assessment of Lambda-cyhalothrin Insecticide Used to Farmer, Consumer and Environment**. Agricultural Production Sciences Research and Development Division, Department of Agriculture. (in Thai)
- Mahmoud, S.A. 2017. Effect of abamectin and hexaflumuron against cotton leafworm, *Spodoptera littoralis* (Boisdval) under laboratory and field conditions. **Menoufia Journal of Plant Protection** 2(1): 57-61.
- Morsy, M.M. and Elwan, A.A. 2021. Use of abamectin as an eco-friendly pesticide against diamondback moth on cabbage crop. **Journal of the Advances in Agricultural Researches** 26(4): 466-478.
- Nagaharshitha, D., Haldankar, P.M. and Khopkar, R.R. 2016. Effect of bagging on chemical properties of mango (*Mangifera indica* L.) CV. Alphonso. **International Journal of Horticultural & Crop Science Research** 6(1): 1-8.
- Nguyen, T.N.H., Tran, T.M.H. and Dang, Q.C. 2022. Effect of fruit bagging on control damage of fruit borers and fruit quality of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) cv. Edor. **Journal of Entomology and Zoology Studies** 10(5): 211-215.
- Office of Agricultural Economics. 2023. **Statistics on Trade of Thai Agricultural Products with Foreign Countries**. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Office of Agricultural Economics. 2024. **Agricultural Statistics of Thailand 2023**. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Plant Protection Research and Development Office. 2021. **Insecticide and Miticide Application to Solve Problem Pesticide Resistance in Plant Pests**. Department of Agriculture, Bangkok. (in Thai)
- Rueangkhanab, M., Chootummatat, S., Supatra, L., Kangkamanee, L. and Sirikhantaya, C. 2015. **Research Report on Effect of Bagging Materials on Quality of Longkong (*Lansium domesticum* Corr.) in Songkhla Province**. Office of Agricultural and Development Region 8, Department of Agriculture.
- Senthil Kumar, C.M., Jacob, T.K. and Devasahayam, S. 2019. Evaluation of insecticides and a natural product for their efficacy against shoot borer (*Conogethes punctiferalis* Guen.) (Lepidoptera: Crambidae) infesting ginger (*Zingiber officinale* Rosc.). **Journal of Spices and Aromatic Crops** 26(2): 91-94.
- Srijuntra, S., Tassakorn, T., Sukonthabhirom na Pattalung, S., Nareawuttikun, N., Chotsethee, W., Anantanamanee, Y., Chowattanawong, P., Promkerd, P., Wittayawannakul, W. and Rintarak, D. 2016. Integrated Pest Management in Orchid. **Entomology and Zoology Gazette** 34(1): 2-11.
- Srijuntra, S. 2022. **Recommendations for Pesticide Application from 2023 Research**. Department of Agriculture, Bangkok. (in Thai)
- Srijuntra, S., Manusmunkong, B., Plodcornburi, W. and Suthhi-aromna, S. 2011. Fruit bagging and chemical control against citrus fruit borer; *Citripestis sagittiferella* Moore. **Entomology and Zoology Gazette** 29(2): 12-23. (in Thai)
- Suthhi-aromna, S., Wongnikong, W., Srikacha, S. and Plodcornburi, W. 2016. Study on fruit flies: *Bactrocera dorsalis* Hendel in dragon fruit and their control. **Entomology and Zoology Gazette** 34(1): 17-28. (in Thai)
- Tada, N., Sripatnet, A., Suwanmek, N. and Kwanpool, L. 2021. Effects of nonwoven fruit wrapping materials on the quality of Monthong durian. **Khon Kaen Agriculture Journal** 49(Suppl.I): 238-242. (in Thai)
- Vanichpakorn, P., Seephueak, P. and Hansuek, S. 2022. **Research Report on Durian Fruit Borer Management with Appropriate Technologies for Enhancing**

Durian Productivity. Rajamangala University of
Technology Srivijaya. (in Thai)

Vorakuldumrongchai, S., Tempeetikul, W., Koppaipoon, A. and
Sitthilit, U. 2018. **Research Report on Effect of
Fruit Bagging Material on Growth and Quality
Durian from High Density Plantation.** Chanthaburi
Horticultural Research Center, Department of Agriculture.
(in Thai)

Research Article

การพัฒนาเชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมเพื่อทาแผลรักษาโรคลำต้นเน่า
ของทุเรียนที่ระบาดซ้ำซากในแปลงปลูกทุเรียนภาคตะวันออก

Development of *Trichoderma* Cream Formulation for Controlling the Repeated
Dissemination Disease of Stem Rot in Durian Plantations in the Eastern Region

ธิตี ทองคำงาม คมสันต์ สุป้อง และ สุกฤตยา อุนทรกุลชัย *

Titi Thongkamngam, Khomsan Supong and Sukritta Anutrakunchai *

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืชและภูมิทัศน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี 22210

Department of Plant production and Landscape, Faculty of Agro Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok at Chanthaburi Campus,
Khao Khitchakut, Chanthaburi 22210, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-09-21
Revised: 2024-06-06
Accepted: 2024-07-15

Keywords:

Trichoderma cream;
stem rot disease;
phytophthora palmivora;
Fusarium solani

Stem rot disease spreading in durian causes severe damage to durian trees. The spread of the disease can cause durian trees to die. Therefore, it is necessary to find ways to prevent and eliminate stem rot disease in durian plantations. This research aims to develop a *Trichoderma* cream formulation to control the repeated dissemination of stem rot disease in durian plantations in the eastern region. The study was conducted by collecting samples of stem rot disease in durian, identifying the pathogenic fungi and *Trichoderma* fungi, and morphologically classifying the fungi. It was found that the cause of the disease was *Phytophthora palmivora* and *Fusarium solani*, while the *Trichoderma* fungus was classified by molecular biology as *T. asperellum*. Then, it was tested for initial efficacy using a dual-culture test, which found that *T. asperellum* could inhibit the hyphal growth of *P. palmivora* and *F. solani* at 79.8 and 88.7 percent, respectively. After that, the percentage of stem rot disease occurrence in durian was tested after applying the *Trichoderma* cream, the chemical metalaxyl and fosetyl-aluminium. It was found that the *Trichoderma* cream reduced disease occurrence to only 25 percent (dry and non-spreading lesions), while the chemical method with metalaxyl and fosetyl-aluminium resulted in a high percentage of disease occurrence, up to 94 and 96 percent (spreading lesions without drying). This indicates that the use of chemical substances such as metalaxyl and fosetyl-aluminium cannot control stem rot disease in durian trees. Therefore, the development of a *Trichoderma* cream formulation may be one way to reduce the problem of repeated dissemination of stem rot disease in durian plantations in the eastern region. Alternatively, if chemical substances are to be used for treatment, other chemical groups should be tested to replace the current group.

© 2025 Thongkamngam, T., Supong, K. and Anutrakunchai, S. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: Sukritta_An@rmutto.ac.th

Cite this article as:

Thongkamngam, T., Supong, K. and Anutrakunchai, S. 2025. Development of *Trichoderma* Cream Formulation for Controlling the Repeated Dissemination Disease of Stem Rot in Durian Plantations Eastern Region. **Recent Science and Technology** 17(3): 260505.

บทคัดย่อ

ปัญหาการแพร่ระบาดของโรคลำต้นเน่าของทุเรียนสร้างความเสียหายอย่างรุนแรงให้กับเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนอย่างมาก เพราะปัญหาการแพร่ระบาดของโรคสามารถทำให้ต้นทุเรียนยืนต้นตายจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการหาวิธีการป้องกันกำจัดที่สามารถช่วยลดปัญหาการแพร่ระบาดของโรคลำต้นเน่าในแปลงปลูกทุเรียน โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมเพื่อทาผลรักษาโรคลำต้นเน่าของทุเรียนที่ระบาดซ้ำซากในแปลงปลูกทุเรียนภาคตะวันออก ดำเนินการเก็บตัวอย่างโรคลำต้นเน่าของทุเรียนมาแยกเชื้อราสาเหตุโรคและเชื้อราไตรโคเดอร์มา พร้อมทั้งจัดจำแนกทางสัณฐานวิทยาของเชื้อราสาเหตุโรค พบว่ามีสาเหตุจากเชื้อรา *Phytophthora palmivora* และ *Fusarium solani* ส่วนเชื้อราไตรโคเดอร์มาจัดจำแนกโดยชีวโมเลกุล ได้เป็นเชื้อรา *Trichoderma asperellum* ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *T. asperellum* ต่อการยับยั้งการเจริญทางเส้นใยของเชื้อรา *P. palmivora* และ *F. solani* ด้วยวิธี dual-culture test พบการยับยั้ง เท่ากับ 79.8 และ 88.7 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบการทาผลโรคลำต้นเน่าของทุเรียนด้วยไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีม เปรียบเทียบกับสารเคมีเมทาแลกซิล และฟอสฟิไทล-อะลูมิเนียม พบว่ากรรมวิธีที่ทาด้วยไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมเกิดโรคน้อยที่สุด 25 เปอร์เซ็นต์ (ผลมีลักษณะแห้งสนิท ไม่มีการลุกลาม) ในขณะที่กรรมวิธีที่ทาด้วยสารเคมีเมทาแลกซิล และฟอสฟิไทล-อะลูมิเนียม พบเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคสูงถึง 94 และ 96 เปอร์เซ็นต์ (ผลลุกลามฉ่ำน้ำเพิ่มขึ้น) แสดงว่าการใช้สารเคมีเมทาแลกซิล และฟอสฟิไทล-อะลูมิเนียม ทาลำต้นไม่สามารถควบคุมโรคลำต้นเน่าในทุเรียนได้ โดยสรุปจากการพัฒนาไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมมาทาเพื่อรักษาลำต้นเน่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาการแพร่ระบาดของโรคลำต้นเน่าในทุเรียนภาคตะวันออกได้ หรือถ้าหากจะใช้สารเคมีรักษาก็ควรที่จะต้องมีการทดสอบสารเคมีในกลุ่มอื่นเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีกลุ่มเดิมต่อไป

คำสำคัญ: ไตรโคเดอร์มาครีม, โรคลำต้นเน่า, เชื้อรา *Phytophthora palmivora*, เชื้อรา *Fusarium solani*

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการแพร่ระบาดของโรคลำต้นเน่าของทุเรียนสร้างปัญหาต่อเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนในภาคตะวันออกทั้งจังหวัดจันทบุรีและตราด โดยเชื้อราสาเหตุที่สร้างความเสียหายและเกษตรกรรู้จักกันดี คือ เชื้อรา *Phytophthora palmivora* (Butler) (Kwangtid and Sangchote, 2002; Prommate et al. (2019); Kongtragoul et al., 2021) ลักษณะอาการของโรคจะพบบริเวณส่วนของลำต้น หรือบริเวณโคนต้น ลำต้นเป็นแผลจุดฉ่ำน้ำ เปลือกเน่าเป็นสีน้ำตาลปนดำ พบการเข้าทำลายจากชั้นเปลือกไม้เข้าไปถึงชั้นของเนื้อไม้ด้านใน ถ้าหากระบาดหนักอาจจะทำให้ต้นไหม้ใบเหลืองร่วงหล่น เหลือเพียงกิ่งและยืนต้นตาย (Chataisiri et al., 2018; Koohapitagtam, 2016; Nianwichai et al., 2022) นอกจากนั้นในปี พ.ศ. 2559 เป็นต้นมา มีรายงานการแพร่ระบาดของโรคลำต้นเน่าที่มีสาเหตุนอกเหนือจากเชื้อรา *P. palmivora* (Butler) ได้แก่ โรคราสีชมพู (Pink Disease) ในอดีตเกิดจากเชื้อรา *Corticium salmonicolor* (Berk) เข้าทำลายบริเวณกิ่งลักษณะเป็นผองสีเหลืองปนสีชมพู (Anupama et al., 2009) ซึ่งเดิมเคยเป็นเชื้อก่อโรคและแพร่ระบาดในสวนยางพารา แต่เนื่องจากในช่วงเวลานั้นราคาทุเรียนมีการปรับราคาที่สูงขึ้นอย่างมาก จึงทำให้เกษตรกรโค่นยางพาราและเปลี่ยนมาปลูกทุเรียนจึงทำให้เชื้อราชนิดนี้กลับมาอุบัติใหม่ในสวนทุเรียน (Thongkamngam and Anutrakunchai, 2019) นอกจากนั้นยังพบเชื้อรา *Fusarium* spp. เช่น *Fusarium oxysporum* และ *Fusarium solani* (Pongpisutta et al., 2020; Chantarasiri and Boontanom, 2021) โดยลักษณะของอาการโรคที่พบนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับโรคที่เกิดจากเชื้อรา *P. palmivora* (Butler) แต่บริเวณส่วนของลำต้นจะไม่มีอาการเป็น

จุดแผลฉ่ำน้ำ แต่จะพบเป็นผองแบ้งสีเหลืองปนชมพูเจริญปกคลุมบริเวณลำต้น และกิ่ง ถ้าหากเกิดการระบาดหนักจะทำให้ใบเหลืองและร่วงหล่น เมื่อใช้มีดผ่าดูส่วนของกิ่งหรือลำต้นที่ติดเชื้อมีพบเนื้อเยื่อเป็นสีน้ำตาลไปถึงตาอยู่ภายในท่อลำเลียงน้ำ (xylem) ถ้าปล่อยทิ้งไว้ก็จะพบส่วนขยายพันธุ์ของเชื้อเจริญขึ้นปกคลุมทั่วทั้งกิ่งและลำต้น (Drenth and Guest, 2004)

เนื่องจากเป็นโรคที่สร้างความเสียหายร้ายแรงเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนจึงตระหนักในการหาวิธีการแก้ปัญหาการแพร่ระบาดของโรคลำต้นเน่าของทุเรียน โดยเกษตรกรนิยมเลือกใช้สารเคมีได้แก่ เมทาแลกซิล และฟอสฟิไทล-อะลูมิเนียม มาฉีดพ่นและทารักษาแผล (Elansky et al., 2007; Deising et al., 2008; Zhu et al., 2008; Chi et al., 2020; Chacon et al., 2022) อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานทำให้เชื้อราเกิดการดื้อยา การใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มา เป็นอีกวิธีการที่สามารถป้องกันกำจัดโรคพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรคพืชได้หลากหลายชนิด เช่น การสร้างสารปฏิชีวนะ (antibiotics) การแก่งแย่งแข่งขัน (competition) การเป็นปรสิต (mycoparasitism) และการชักนำให้เกิดความต้านทาน (induced resistance) (Intana et al., 2007; Vinale et al., 2008; Oszust et al., 2021) แนวทางการประยุกต์ใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมสำหรับใช้ทาเพื่อรักษาแผลโรคลำต้นเน่าทุเรียนจะเป็นอีกแนวทางในการป้องกันกำจัดเชื้อราสาเหตุโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากเชื้อราไตรโคเดอร์มาสามารถควบคุมเชื้อราสาเหตุโรคได้หลายชนิดได้ (Thongkamngam et al., 2013; Thongbansai et al., 2016)

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมสำหรับทาผลรักษาโรคลำต้นเน่าของ

ทุเรียนในพื้นที่แปลงปลูกทุเรียนภาคตะวันออก ผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์เกษตรกรในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันกำจัดโรคลำต้นเน่าของทุเรียนทั่วประเทศอย่างปลอดภัยและยั่งยืน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเก็บตัวอย่างโรคลำต้นเน่าทุเรียนและแยกเชื้อราไตรโคเดอร์มา

เก็บตัวอย่างเปลือกลำต้นทุเรียนที่แสดงอาการโรคลำต้นเน่า (Figure 1) จากตำบลเขาหัวพลอยหวาน อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี และ ตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด มาแยกเชื้อโดยวิธี tissue transplanting method นำตัวอย่างเปลือกลำต้นมาล้างทำความสะอาดบริเวณพื้นผิวเปลือกลำต้นทุเรียนด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 10 เปอร์เซ็นต์ และแอลกอฮอล์ 75 เปอร์เซ็นต์ ล้างผ่านน้ำนิ่งฆ่าเชื้อ 3 ครั้ง ชับตัวอย่างเปลือกด้วยกระดาษทิชชู ทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำชิ้นตัวอย่างเลี้ยงลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ water agar (WA) เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นเขียนเส้นใยที่เจริญออกมาจากชิ้นพืชย้ายลงอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato dextrose agar (PDA) จนกระทั่งเชื้อเจริญบนอาหารเป็นเวลา 7 วัน จำแนกลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิดประกอบ (compound microscope) และเก็บรักษาเพื่อรอใช้ในการทดลองต่อไป

เชื้อรา *Trichoderma* sp. แยกมาจากดินบริเวณแปลงที่ปลูกทุเรียนที่เก็บตัวอย่างพืชที่แสดงอาการของโรคลำต้นเน่าจำนวน 5 ตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างดินจะสุ่มจากพื้นที่แปลงจำนวน 3 จุด รวมเก็บทั้งหมด 20 ตัวอย่าง โดยนำดินตัวอย่างที่ได้มาทำการเจือจางด้วยวิธี Serial dilution method นำน้ำละลายเชื้อที่ได้มาเกลี่ย Pour plate method บนอาหารเลี้ยงเชื้อ *Trichoderma* selective medium (TSM) หลังจากนั้นเขียนเชื้อที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน นำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และจัดจำแนกในระดับชีวโมเลกุล โดยคัดเลือก primer และหาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมโดยใช้ primer ในส่วนของ rDNA (ITS5 และ ITS4) คือ primer ITS5 (5-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3)-ITS4 (5-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3) (White *et al.*, 1990) โดยทำการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ ITS ด้วยวิธี maximum likelihood (ML) ด้วยโปรแกรม MEGA 11.0 กำหนดค่า bootstrap analysis ให้มีค่าเท่ากับ 1000 พร้อมรายงานผลเป็น Phylogenetic tree



Figure 1 Stem rot disease of durian tree: Symptom of stem rot it begins to exhibit symptoms of yellowing and leaf fall, in comparison to healthy trees that do not show signs of the disease (a). Stem rot infiltrates and damages the bark of durian trees, extending its destruction to the inner woody tissue of the durian tree (b).

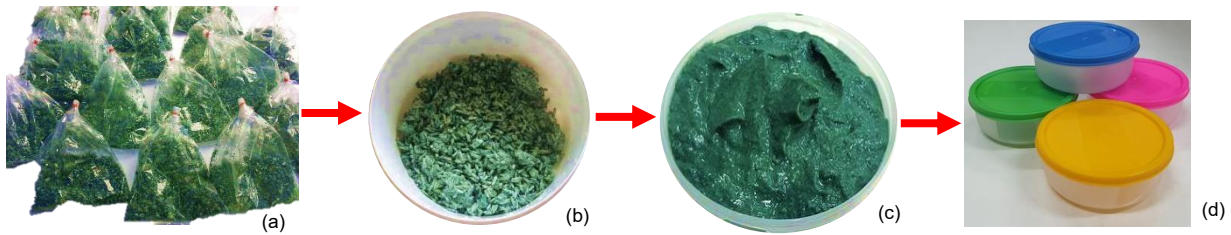


Figure 2 Preparing of *Trichoderma* cream: (a) Characteristics of bags of rice treated with *Trichoderma* fungi for 7 days; (b) Rice grains with *Trichoderma* growth covering the whole grain; (c) Characteristics of the cream texture finely green in color, blended and mixed to have a uniform texture with good smoothness and elasticity; (d) A transparent container with a tight-fitting lid used to store the cream.

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อราไตรโคเดอร์มาในการยับยั้งการเจริญทางเส้นใยของเชื้อราสาเหตุโรคลำต้นเน่าโดยวิธี dual-culture test

เลี้ยงเชื้อรา *Trichoderma asperellum* และเชื้อรา *Phytophthora palmivora* และ *Fusarium solani* สาเหตุโรคลำต้นเน่าในทุเรียน บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA บ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 7 วัน จากนั้นใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร เจาะบริเวณขอบของโคโลนีของเชื้อทั้งสอง ย้ายชิ้นส่วนของเชื้อราแต่ละชนิดจำนวน 1 ชิ้น วางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ในลักษณะตรงข้ามกัน ให้มีระยะห่าง 3 เซนติเมตร ตามวิธีการของ (Dennis and Webster, 1971) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (control) ให้เลี้ยงเชื้อทั้งสองแยกจากกันบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง บันทึกผลการทดลอง ด้วยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อราสาเหตุโรค นำค่าที่ได้มาคำนวณเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเจริญของโคโลนีของเชื้อราสาเหตุโรค (Growth inhibition; GI) และศึกษากลไกการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุโรคลำต้นเน่าทั้งกลไกการแข่งขัน คือ การแย่งแยกราดูอาหาร (competition) และการสร้างสารปฏิชีวนะ (antibiosis) สังเกตความผิดปกติของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จากสูตรของ (Dennis and Webster, 1971) ดังต่อไปนี้

$$\%GI = \frac{D1 - D2}{D1} \times 100$$

โดย D1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราสาเหตุโรคในจานอาหารชุดควบคุม (control)

D2 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราสาเหตุโรคในจานอาหารเลี้ยงเชื้อร่วม (dual-culture test)

2.3 การเตรียมเชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีม

เลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มาลงในข้าวสุก (ควรหุงข้าวให้แข็งร่วนเป็นเมล็ด ไม่ให้แฉะ เพราะถ้าแฉะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย) หลังจากใส่เชื้อลงไปเขย่าให้เชื้อกระจายทั่วถุงข้าวนำไปบ่ม

ไว้ที่อุณหภูมิห้อง หรือจนกระทั่งเชื้อราเจริญเต็มทั่วทั้งถุง เป็นเวลา 7 วัน รอจนกว่าเชื้อไตรโคเดอร์มาจะเจริญเต็มถุงข้าว (เส้นใยขึ้นปกคลุมเมล็ดข้าวเป็นสีเขียว) (Figure 2a-b) นำข้าวที่ผ่านการเลี้ยงเชื้อปริมาณ 200 กรัม มาใส่เครื่องปั่นความเร็วสูง (vacuum blender) เติมน้ำนิ่งฆ่าเชื้อปริมาตร 1 ลิตร บั่นให้ละเอียด เป็นเวลา 5 นาที กรองกากข้าวออกโดยใช้ตะแกรงกรอง ขนาดรูตะแกรง 40 mesh เพื่อแยกเก็บเฉพาะส่วนที่เป็นส่วนของเหลว สำหรับกากข้าว บั่นให้ละเอียดอีกครั้งจนให้เหลือเศษน้อยที่สุด นำน้ำที่ผ่านการกรองได้มาผสมด้วยแป้งทัลคัม (Talcum powder : TALC) ปริมาตร 50 กรัม และเติมสารให้ความคงตัว หรือความหนืดข้นเหนียว คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (Carboxymethyl cellulose: CMC) 35 กรัม เพื่อให้เกิดความคงตัวหรือความหนืด และเติมสารลดแรงตึงผิว 3 มิลลิลิตรลงไป ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องผสมแป้ง (stand mixer) ตีให้ส่วนผสมรวมตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (จะมีลักษณะเหนียวหนืดและมีคุณสมบัติการยึดติดกับพื้นผิวดี ลักษณะเป็นเนื้อครีมละเอียดสีเขียว) (Figure 2c) จากนั้นเก็บใส่ในกระปุกสีใสเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสี (Figure 2d) พร้อมทั้งนำไปเก็บรักษาไว้ในตู้เย็น (เพื่อยืดเวลาให้ครีมสามารถยืดอายุได้นานขึ้น) รอใช้ในการทดลองต่อไป

2.4 การทดสอบเชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมรักษาแผลโรคลำต้นเน่าของทุเรียน

การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมรักษาแผลโรคลำต้นเน่าของทุเรียน เริ่มจากคัดเลือกต้นทุเรียนที่มีอายุใกล้เคียงกันอายุของต้น 5 ปีขึ้นไป จำนวน 20 ต้น และต้องเป็นต้นทุเรียนที่มีการให้ผลผลิตแล้ว (เนื่องจากจะเป็นระยะที่ติดโรคลำต้นเน่ามากที่สุดจากการสำรวจ) คือ สวนน้ำทรัพย์ ตำบลเขาหัวพลอยแหวน อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี โดยก่อนการทาครีมรักษาให้ทำการถากเปิดบาดแผลที่แสดงอาการลำต้นเน่าด้วยแท่งเหล็กรูปตัว L ที่ผ่านการจี้ฆ่าเชื้อด้วยแอลกอฮอล์ (ถ้าเฉพาะเปลือกภายนอกเท่านั้น ไม่ถากลึกถึงแก่นของเนื้อไม้ซึ่งจะทำให้แผลอาจเกิดการติดเชื้ออื่น ๆ ได้) (Figure 3 a-b) ให้มีขนาดพอประมาณตามความยาวของแผลที่เกิดขึ้นบนส่วนของลำต้น



Figure 3 Characteristics of durian trees showing symptoms of trunk rot and open wounds on the trunk. (a-b) Treating durian tree wounds by scraping and removing the rotten bark, being careful not to reach the inner wood core. (c-d) Treating durian wounds with wound-healing cream by applying it to cover the scraped area and allowing it to spread outward from the wound edges.

ทุเรียน เมื่อทำการเปิดบาดแผลแล้วใช้แปรงทาสีหรือไม้พายทาขมทาครีมให้ครอบคลุมพื้นที่บาดแผล เปรียบเทียบกับการใช้สารเคมี เมทาแลกซิล และฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม ซึ่งเกษตรกรนิยมใช้สำหรับรักษาอาการของโรคลำต้นเน่า เพื่อใช้เป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่ใช้ครีมไตรโคเดอร์มาทาต้น) โดยเน้นทาครีมหรือสารเคมีให้ห่างออกมาจากบาดแผลประมาณ 4-5 เซนติเมตร (เพื่อต้องการทราบขนาดของบาดแผลที่เปิดไว้ว่าลุกลามออกไปจากกรอบที่กำหนดไว้หรือไม่) (Figure 3 c-d) (อัตราการใช้ 50 กรัม/ต้น) ดำเนินการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง โดยมีระยะห่างกัน 7 วัน (เพื่อจะได้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของบาดแผลที่เกิดขึ้นแต่ละช่วงเวลา) วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ประกอบด้วย 4 กรรมวิธี ๆ ละ 5 ซ้ำ ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 ทาด้วยน้ำเปล่า (กรรมวิธีควบคุม)

กรรมวิธีที่ 2 ทาด้วยไตรโคเดอร์มารูปแบบครีม (50 กรัม)

กรรมวิธีที่ 3 ทาด้วยสารเคมีเมทาแลกซิล (metalaxyl) 35% WP (50 กรัม)

กรรมวิธีที่ 4 ทาด้วยสารเคมีฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม (fosetyl-aluminium) 80% WP (50 กรัม)

บันทึกผลการทดลองโดยสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของบาดแผล (แผลเน่า) หลังผ่านการทาในแต่ละครั้ง จากนั้นคำนวณเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคและการลดลงของอาการโรค ดัดแปลงวิธีการของ Nianwichai *et al.* (2022) หลังการทาด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ พร้อมทั้งถ่ายภาพ

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของการเก็บตัวอย่างโรคลำต้นเน่าและแยกเชื้อราไตรโคเดอร์มา

จากการเก็บตัวอย่างโรคลำต้นเน่าที่เข้าทำลายทุเรียนในพื้นที่แปลงเกษตรกร สามารถแยกเชื้อราสาเหตุโรคได้ 2 ชนิด คือ เชื้อรา *Phytophthora palmivora* และเชื้อรา *Fusarium solani* (Figure 4) โดยลักษณะเส้นใยของเชื้อรา *P. palmivora* มีสีขาวเจริญอยู่หน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ เป็นแฉกคล้ายรูปดอกไม้ เจริญเต็มจานอาหารเลี้ยงเชื้อใช้เวลา 1 วัน หลังจากนั้นเมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบส่วนขยายพันธุ์เหมือนดอกบัวตูม (Sporangia) และ Zoosporangia ที่มี zoospore ไหลออกมาเพื่อพร้อมแพร่ระบาดต่อไป (Figure 4a-b) สอดคล้องกับการรายงานของ Pongpisutta *et al.* (2020); Koochapitagtam (2016); Abad and Cruz (2013) ในส่วนของเชื้อรา *F. solani* เส้นใยมีสีเหลืองฟูเจริญอยู่หน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ เจริญเต็มจานอาหารเลี้ยงเชื้อ 7 วัน หลังจากนั้นเมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบส่วนขยายพันธุ์เหมือนเส้นใยพระจันทร์ (Macroconidia) และ Microconidia สร้างอยู่ด้านปลายของก้านชูโคนินทรีย์ (Conidiophore) (Figure 4c-d) สอดคล้องกับการรายงานของ Chantarasiri and Boontanom (2021); Pongpisutta *et al.* (2020); Brasileiro *et al.* (2004); Booth, (1971)

เชื้อราไตรโคเดอร์มาหลังจากแยกด้วยอาหาร TSM พบเชื้อราไตรโคเดอร์มา *Trichoderma asperellum* (THR3) ลักษณะโคโลนีบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ เจริญเป็นรูปวงกลมซ้อนกัน จำนวน 4 วงโคโลนีสีเขียวเข้ม ตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบส่วนขยายพันธุ์ของเชื้อรา โคนินทรีย์ (conidia) และก้านชูโคนินทรีย์ (conidiophore) (Figure 5a-b) เมื่อตรวจสอบระดับชีวโมเลกุลโดยใช้ primer ในส่วนของ rDNA (ITS5 และ ITS4) คือ primer ITS5 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3)-ITS4 (5'-TCCTCCGC TTATTGATATGC-3) ทำการวิเคราะห์ ITS เปรียบเทียบกับเชื้อ *Trichoderma* spp. สายพันธุ์อื่น ๆ สามารถจัดจำแนกได้ว่าเป็นเชื้อรา *T. asperellum* (THR3) 100 เปอร์เซ็นต์ (Figure 6)

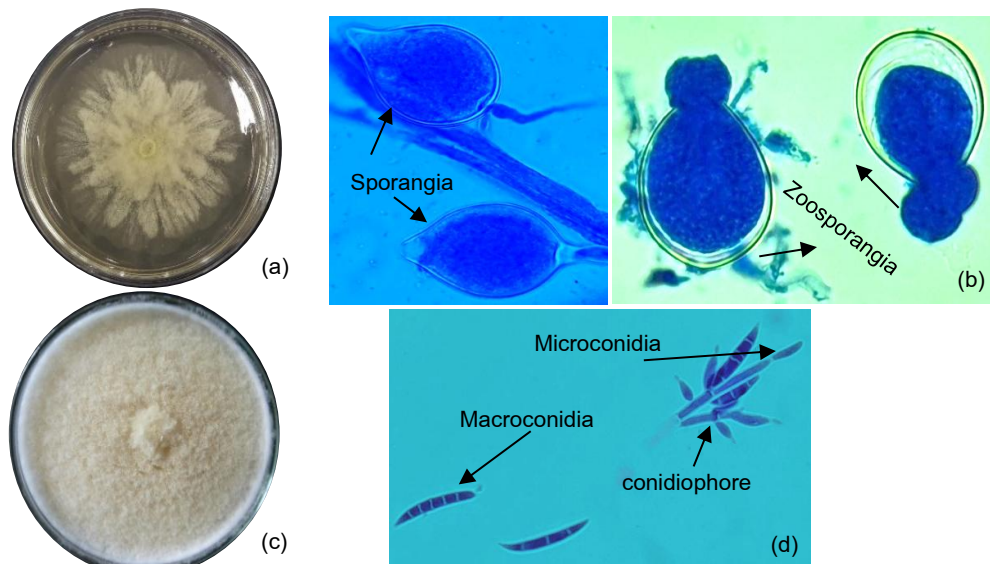


Figure 4 Morphological characteristics of the pathogens of stem rot disease in durian: (a) *Phytophthora palmivora* on PDA at 7 days; (b) Reproduction of sporangia and zoosporangia; (c) *Fusarium solani* on PDA at 7 days; (d) Macroconidia and microconidia.

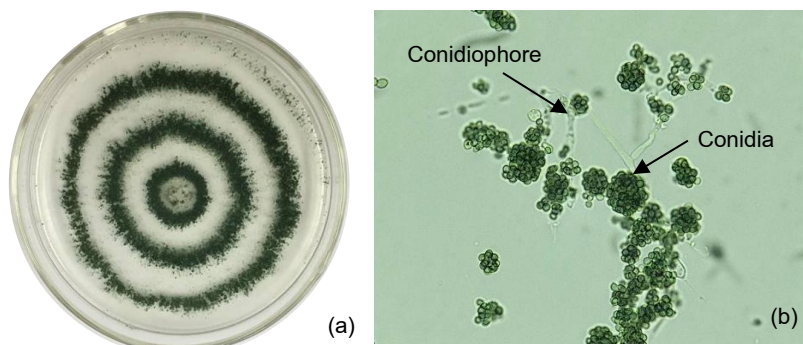


Figure 5 Morphological characteristics of *Trichoderma asperellum* (THR3) : a) Colony on potato dextrose agar (PDA) at 7 days; (b) Conidia and phialides.

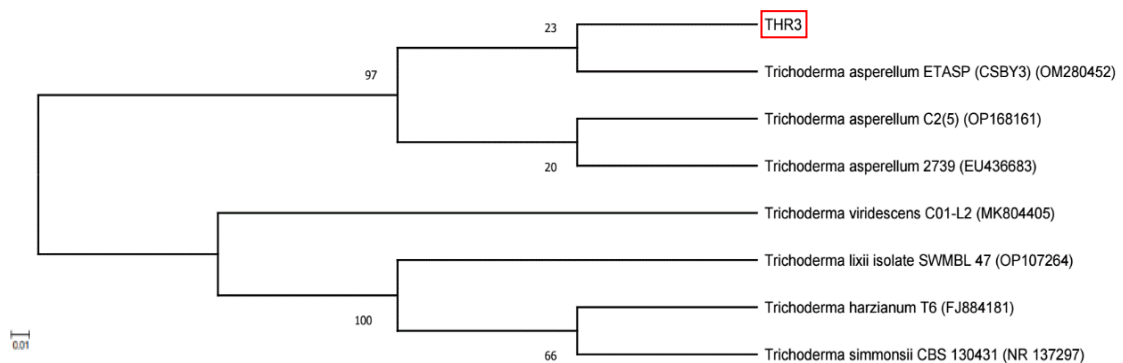


Figure 6 Classification of *Trichoderma asperellum* (THR3): phylogenetic tree obtained from the analysis of the nucleotide sequence in the ITS by maximum likelihood (ML) on MEGA 11.0, with bootstrap analysis configured to a value of 1000.

3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *Trichoderma asperellum* ในการยับยั้งการเจริญทางเส้นใยของเชื้อรา *Phytophthora palmivora* และ เชื้อรา *Fusarium solani* สาเหตุโรค ลำต้นเน่าในทุเรียน โดยวิธี *Dual-culture test*.

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อราปฏิปักษ์ *T. asperellum* ในการยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อรา *P. palmivora* และ เชื้อรา *F. solani* สาเหตุโรคลำต้นเน่าในทุเรียน โดยวิธี *dual-culture test* พบว่าเชื้อรา *T. asperellum* สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราก่อโรค 2 ชนิดได้ดีตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง (3 วันหลังการปลูกเชื้อ) โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง 46.5 และ 67.7 เปอร์เซ็นต์ (Table 1 and Figure 7) หลังจากสิ้นสุดการทดลอง 7 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเพิ่มขึ้นเป็น 79.8 และ

88.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เชื้อรา *T. asperellum* สามารถสร้างสารปฏิชีวนะและมีกลไกการแข่งขันสูงจึงสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุและเจริญได้รวดเร็วกว่าเชื้อราสาเหตุโรคพืช สอดคล้องกับการทดลองของ Intana *et al.* (2007) ที่ทดสอบ *T. harzianum* สายพันธุ์ดั้งเดิม 2 สายพันธุ์ กับเชื้อรา *P. palmivora* พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยได้สูงมากที่สุด 82.20 และ 80.50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นยังมีการทดสอบของ Prommate *et al.* (2019) ได้ทดสอบเชื้อ *Chaetomium* spp. สามารถยับยั้งได้ 50 เปอร์เซ็นต์ และจากการรายงานของ Thongkamngam *et al.* (2013) ได้ทดสอบเชื้อรา *Trichoderma* sp. ในการยับยั้งเชื้อรา *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae* พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญทางเส้นใยของเชื้อราได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

Table 1 Assessment of the antagonistic effect of *Trichoderma asperellum* on the colony growth of *Phytophthora palmivora* and *Fusarium solani* causal agents of stem rot in durian, using a dual-culture antagonistic test.

Pathogens	<i>Trichoderma asperellum</i>					
	Growth inhibition over control (%) ^{1/}			Antagonistic mechanism ^{2/}		
	3 DAI ^{3/}	5 DAI	7 DAI	3 DAI	5 DAI	7 DAI
<i>Phytophthora palmivora</i>	46.5AB ^{4/}	65.4AB	79.8AB	A	C	C
<i>Fusarium solani</i>	67.7A	75.4A	88.7A	A	A	A
C.V. (%)	7.8	6.5	4.6	-	-	-
F-value	*	*	*	-	-	-

^{1/} %Growth inhibition over control = ((D1 – D2) / D1) x 100 (D1-diameter of pathogen growth in control; D2-diameter of pathogen growth in treatment)

^{2/} Antagonistic mechanism : A = Antibiosis, and C = Competition

^{3/} DAI = Day after inoculation

^{4/} Average followed by the same uppercase English letters in each column are not significantly different at P = 0.05 according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

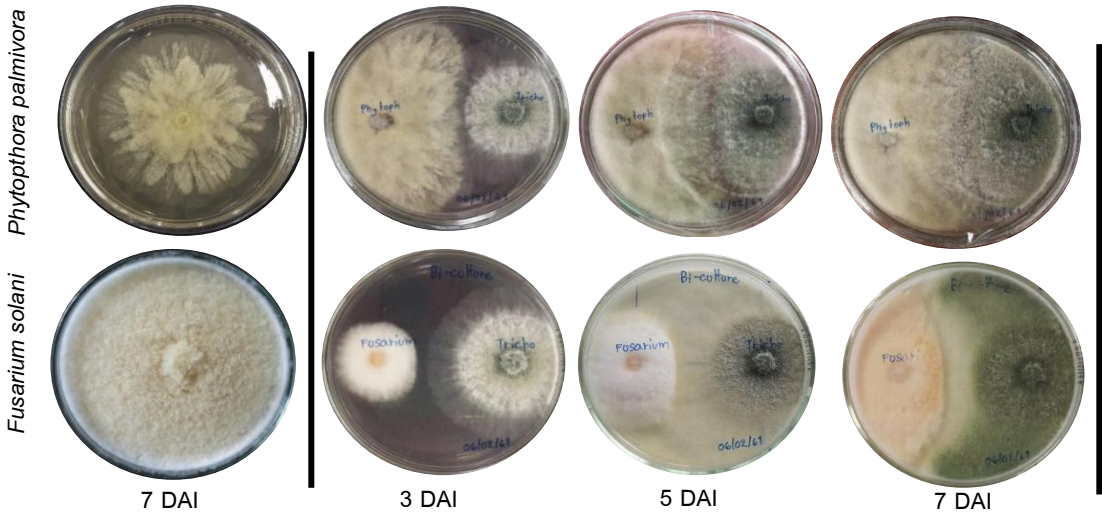


Figure 7 Dual-culture antagonistic test of *Trichoderma asperellum* against *Phytophthora palmivora* and *Fusarium solani* at 3, 5, and 7 days after inoculation (DAI).

3.3 การทดสอบเชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมเพื่อรักษาแผลโรคลำต้นเน่าของทุเรียน

จากการทดสอบการทาแผลต้นทุเรียนที่เกิดโรคลำต้นเน่าโดยใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีม สารเคมีเมทาแลกซิลและฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม เพื่อรักษาโรคลำต้นเน่าของทุเรียน พบว่าวันที่ 15 หลังจากทาแผลในกรรมวิธีที่ทาด้วยครีมไตรโคเดอร์มา พบเส้นใยและสปอร์ของเชื้อราไตรโคเดอร์มาเจริญขึ้นรอบ ๆ บาดแผล (Figure 8a-b) นอกจากนั้นยังพบส่วนขยายพันธุ์ของเชื้อรา *Fusarium solani* เจริญออกมาจากเนื้อไม้ ลักษณะเป็นผงสีเหลืองปนสีชมพู ขณะเดียวกันยังพบเชื้อราไตรโคเดอร์มาเจริญขึ้นมาซ้อนทับอยู่บริเวณพื้นที่บาดแผล (Figure 8c) หลังจากระยะเวลาผ่านไป (30 วันหลังทาแผล) พบว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคลำต้นเน่าของทุเรียนในทุกกรรมวิธีมีความใกล้เคียงกัน อยู่ระหว่าง 74-88 เปอร์เซ็นต์ โดยในกรรมวิธีที่ใช้สารเคมีทั้ง 2 ชนิด (เมทาแลกซิลและฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม) แผลเริ่มแห้ง แต่แผลก็ยังฉ่ำน้ำและขยายขนาดได้อยู่ ส่วนกรรมวิธีควบคุม (ทาด้วยน้ำเปล่ามีเปอร์เซ็นต์การเกิดโรค เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์) แผลมีลักษณะฉ่ำน้ำ มีสีดำปนน้ำตาล กลิ่นเหม็นคาว มีการลุกลามและขยายขนาดของแผลเพิ่มขึ้น (Figure 9 and Figure 11)

หลังจากระยะเวลาผ่านไป 60 วันหลังการทาแผล พบว่ากรรมวิธีที่ทาแผลด้วยครีมไตรโคเดอร์มามีเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเพียง 47 เปอร์เซ็นต์ โดยลักษณะแผลมีอาการแห้งหยุดการเจริญลุกลาม ไม่พบอาการฉ่ำน้ำ ในขณะที่กรรมวิธีที่ทาด้วยสารเคมีเมทาแลกซิล และฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม พบเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเพิ่มขึ้น เท่ากับ 89 และ 92 เปอร์เซ็นต์ และยังมีการลุกลามของโรคเพิ่มขึ้น แผลเริ่มมีรอยฉ่ำน้ำ และขยายขนาดขึ้นไปบนส่วนของลำต้น (Figure 11) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (90 วันหลังทาแผล)

พบว่าผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับวันที่ 60 กล่าวคือกรรมวิธีที่ทาด้วยครีมไตรโคเดอร์มา พบเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเพียง 25 เปอร์เซ็นต์และเมื่อสังเกตถึงลักษณะแผลมีลักษณะแห้งสนิทไม่มีการลุกลามของโรคลำต้นเน่า (Figure 11) ส่วนในกรรมวิธีที่ทาด้วยสารเคมีเมทาแลกซิล และฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม แผลขยายลุกลาม แสดงอาการเน่าเพิ่มขึ้นและฉ่ำน้ำ พบเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเพิ่มขึ้นเป็น 94 และ 96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.05$) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้สารเคมีทั้ง 2 ชนิดทาแผลไม่สามารถควบคุมโรคลำต้นเน่าในทุเรียนได้ (Figure 9)

เมื่อพิจารณาการลดลงของโรคลำต้นเน่าของทุเรียนหลังจากทาครีมไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีม สารเคมีเมทาแลกซิลและฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม รักษาโรคลำต้นเน่าของทุเรียน ในการควบคุมโรคลำต้นเน่าที่ระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่ากรรมวิธีที่ทาครีมไตรโคเดอร์มา มีแนวโน้มที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมโรคลำต้นเน่าได้ดีที่สุดโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 26 – 75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรรมวิธีที่ทาด้วยสารเคมีเมทาแลกซิล การเกิดโรคลดลง 4-22 เปอร์เซ็นต์ และฟอสฟิอิล-อะลูมิเนียม การเกิดโรคลดลง 6-25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการศึกษารังนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเคมีทาแผล สามารถลดการเกิดโรคได้ในระยะแรก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปการใช้สารเคมีไม่สามารถลดอาการเกิดโรคลำต้นเน่าของต้นทุเรียนได้ (Figure 10) สอดคล้องกับงานทดลองของ Kongtragoul *et al.* (2021) รายงานว่าการใช้สารเคมีเมทาแลกซิลที่ทำให้เชื้อโรครากเน่าในทุเรียนเกิดการดื้อต่อสารเคมี นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยในต่างประเทศที่รายงานในทิศทางเดียวกัน (Vawdrey *et al.*, 2005; Chi *et al.*, 2020; Plasai *et al.*, 2021)



Figure 8 Effects of *Trichoderma* cream after treat stem rot over a period of 15 days: (a–b) *Trichoderma* growth of mycelium and conidia on the wound; (c) Extension of *Fusarium solani* pushing through the wood as a yellow-pink powder, with *Trichoderma asperellum* growing over the wound area.

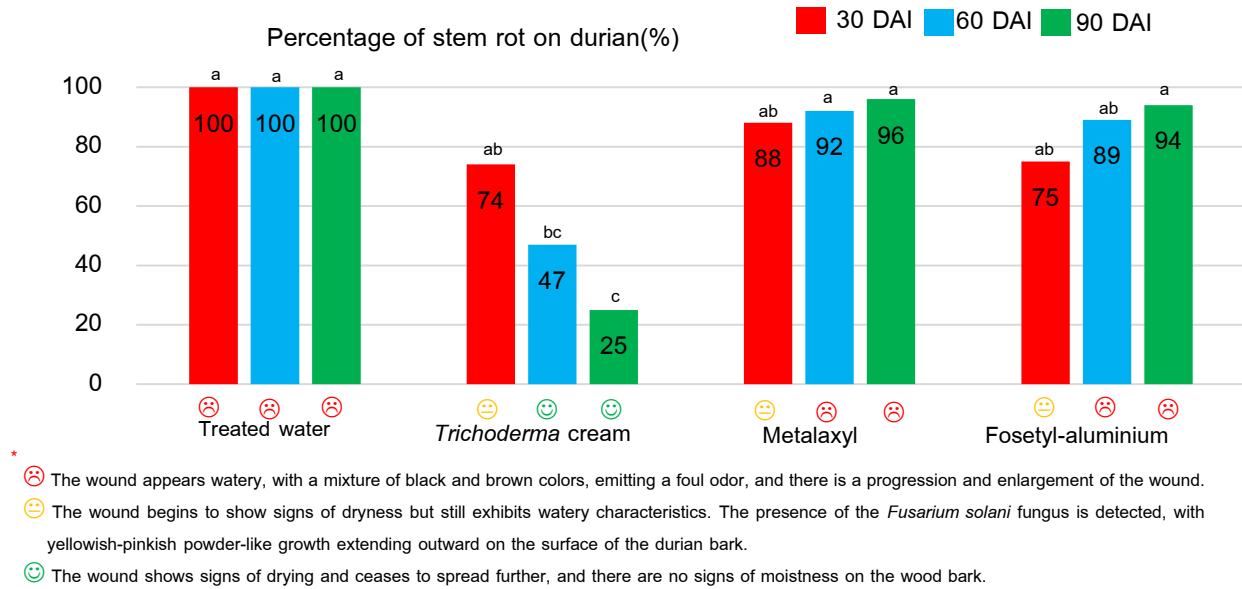


Figure 9 Percentage of stem rot on durian after applying *Trichoderma* cream, matalaxyl and fosetyl-aluminium treated durian stem rot disease at 30, 60 and 90 days after inoculation (DAI).

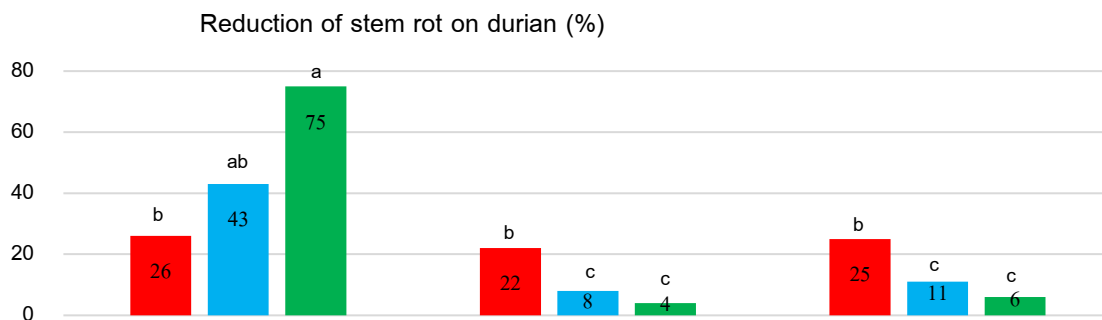


Figure 10 Percentage of reduction of stem rot on durian after applying *Trichoderma* cream, metalaxyl and fosetyl-aluminium treated durian stem rot disease at 30, 60 and 90 days after inoculation (DAI).

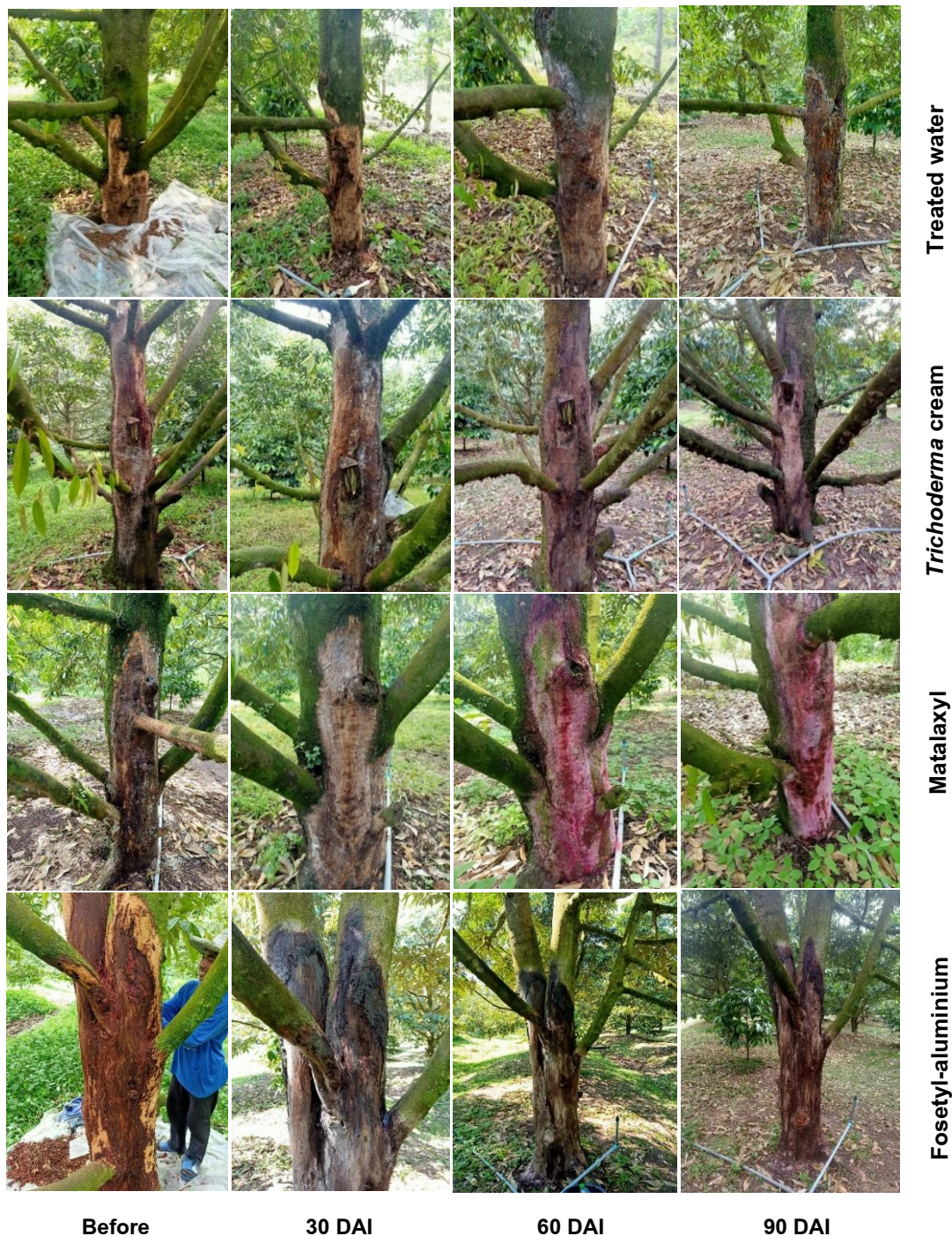


Figure 11 Appearance of durian trees after applying *Trichoderma* cream, metalaxyl and fosetyl-aluminium trees durian stem rot disease at 30, 60 and 90 days after inoculation (DAI).

4. สรุป

จากการเก็บตัวอย่างโรคลำต้นเน่าของทุเรียน มาแยกเชื้อราและจัดจำแนกทางลักษณะสัณฐานวิทยาของสาเหตุโรคพร้อมกับเชื้อราไตรโคเดอร์มา พบว่าเชื้อรา *P. palmivora* และ *F. solani* ส่วนเชื้อราไตรโคเดอร์มาจัดจำแนกโดยชีวโมเลกุล ได้เป็นเชื้อรา *T. asperellum* ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นเมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรคต่อในห้องปฏิบัติการโดยวิธี dual-culture test พบว่าเชื้อรา *T. asperellum* สามารถ

ยับยั้งการเจริญทางเส้นใยของเชื้อราทั้ง 2 ชนิด (*P. palmivora* และ *F. solani*) เท่ากับ 79.8 และ 88.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมโรคลำต้นเน่าของทุเรียนหลังจากทาครีมไตรโคเดอร์มา สารเคมีเมทาแลกซิล และฟอสอีทิล-อะลูมิเนียม รักษาโรคลำต้นเน่าของทุเรียน พบว่ากรรมวิธีที่ทำด้วยครีมไตรโคเดอร์มา พบเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อสังเกตถึงลักษณะแผลมีลักษณะแห้งสนิทไม่มีการลุกลามของโรคลำต้นเน่า ส่วนในกรรมวิธีที่ทำด้วยสารเคมีเมทาแลกซิล

และฟอสฟิอิล-อลูมิเนียม แผลลูกกลมไม่แห้ง มีการเน่าเพิ่มขึ้นและ น้ำน้ำ โดยพบเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคสูงถึง 94 และ 96 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น การพัฒนาการใช้ไตรโคเดอร์มาในรูปแบบครีมสำหรับทาแผล เพื่อรักษาโรคลำต้นเน่าทุเรียน จะเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหาการแพร่ระบาดของโรคลำต้นเน่าของทุเรียน อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีเพื่อป้องกันกำจัดโรคลำต้นเน่าทุเรียนในอนาคต จำเป็นต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสารเคมีในกลุ่มอื่น ๆ เพื่อทดแทนสารเคมีกลุ่มเดิมที่เกษตรกรนิยมใช้ เนื่องจากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพต่ำไม่สามารถควบคุมโรคได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเกษตรกรเจ้าของสวนน้ำทรัพย์ ตำบลเขาวัว พลายแหวน อำเภอกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ และห้องปฏิบัติการกีฏวิทยาและโรคพืชวิทยา ของสาขาเทคโนโลยีการผลิตพืชและภูมิทัศน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตกาฬสินธุ์ ที่สนับสนุนสถานที่ทำงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Abad, R.G. and Cruz, K.J.T. 2013. Incidence of *Phytophthora* fruit rot on four durian cultivars in Davao city, Philippines. **Acta Horticulture** 1006: 35-39.
- Anupama, C., Binu, C., Nair, T., Suma, B. and Balasudaran, M. 2009. RAPD characterization of *Corticium salmonicolor* causing pink disease of trees. **Indian Journal of Forestry** 32(4): 591-594.
- Booth, C. 1971. **The Genus Fusarium**. The Eastern Press Limited, London.
- Brasileiro, B.T.R.V., Coimbra, M.R.M., Morais, J.M.A. and Oliveira, N.T. 2004. Genetic variability within *Fusarium solani* species as revealed by PCR-fingerprinting based on PCR markers. **Brazilian Journal of Microbiology** 35(3): 205-210.
- Chacon, M.G., Caicedo, E. and Ordonez, M.E. 2022. Sensitivity to metalaxyl, mefenoxam, and cymoxanil in *Phytophthora andina* isolates collected from tree tomato (*Solanum betaceum*) in Ecuador. **Tropical Plant Pathology** 47: 786-794.
- Chantarasiri, A. and Boontanom, P. 2021. *Fusarium solani* and *Lasiodiplodia pseudotheobromae*, fungal pathogens causing stem rot disease on durian trees (*Durio zibethinus*) in Eastern Thailand. **New Disease Reports** 44(1): e12026.
- Chataisiri, K., Pongpisutta, R., Rattanakreetakul, D. and Bincader, S. 2018. *Pythium* sp. causing rot of durian and efficacy of chemical fungicides to control. **Agriculture Science Journal** 49(Suppl.): 171-174. (in Thai)
- Chi, N.M., Thu, P.Q., Nam, H.B., Quang, D.Q., Phong, L.V., Van, N.D., Trang, T.T., Kien, T.T., Tam, T.T.T. and Dell, B. 2020. Management of *Phytophthora palmivora* disease in *Citrus reticulata* with chemical fungicides. **Journal of General Plant Pathology** 86(6): 494-502.
- Deising, H.B., Reimann, S. and Pascholati, S.F. 2008. Mechanisms and significance of fungicide resistance. **Brazilian Journal of Microbiology** 39(2): 286-295.
- Dennis, C. and Webster, J. 1971. Antagonist properties of species group of *Trichoderma*; Production of volatile antibiotics. **Transactions British Mycological Society** 57(1): 25-39.
- Drenth, A. and Guest, D. 2004. **Diversity and management of *Phytophthora* in Southeast Asia**. Australian Centre for International Agricultural Research. Australian.
- Elansky, S., Apryshko, V.P., Milyutina, D.I. and Kozlovsky, B.E. 2007. Resistance of Russian strains of *Phytophthora infestans* to fungicides metalaxyl and dimethomorph. **Moscow University Biological Sciences Bulletin** 62(1): 11-14.
- Intana, W., Issarakraisila, M., Sattasakulchai, S., Yenjit, P. and Suwanno, T. 2007. Efficacy of *Trichoderma harzianum* mutant strains on mycelial growth inhibition and *Phytophthora palmivora* population reduction in durian orchard. **Kamphaengsaen Academic Journal** 5(3): 1-9. (in Thai)
- Kongtragoul, P., Ishikawa, K. and Ishii, H. 2021. Metalaxyl resistance of *Phytophthora palmivora* causing durian diseases in Thailand. **Horticulturae** 7(10): 375.
- Koohapitagtam, M. 2016. **Research Reports on characterization of morphology and pathogenicity of *Phytophthora palmivora* a causal agent of root rot and stem rot of durian in Thailand**. Burapha University. (in Thai)
- Kwangtid, P. and Sangchote, S. 2002. Management of fruit of durian (*Durio zibethinus* Murr.) caused by

- Phytophthora palmivora* (Butler) Butler. **Agriculture Science Journal** 33(6): 45-48. (in Thai)
- Nianwichai, P., Tongsri, V., Taraput, N., Srisopha, W., Sichai, K., Bussbong, N., Songkumarn, P. and Koohapitagtam, M. 2022. Macozeb resistance of *Phytophthora palmivora*, a causal agent of stem rot and leaf blight of durian in eastern Thailand. **King Mongkut's Agriculture Journal** 40(3): 225-235. (in Thai)
- Oszust, K., Pylak, M. and Frac, M. 2021. *Trichoderma*-based biopreparation with prebiotics supplementation for the naturalization of raspberry plant rhizosphere. **International Journal of Molecular Sciences** 22(12): 6356.
- Piasai, R., Chalmers, P., Piasai, O. and Khewkhom, N. 2021. Postharvest fungicide dips to control fruit rot of 'Monthong' durian (*Durio zibethinus*). **European Journal of Plant Pathology** 160: 325-336.
- Pongpisutta, R., Ratanakreetakul, C., Bincader, S., Chatchaisiri, K. and Boonruangrod, P. 2020. Detection of fungal pathogen causing durian dieback disease. **Khon Kaen Agriculture Journal** 48(4): 703-714. (in Thai)
- Prommate, A., Valyasevi, S., Arunothayanan, H., Megovern, R.J., Cheewankoon, R. and To-anun, C. 2019. Antagonistic activities of *Chaetomium* spp. on *Phytophthora palmivora* (P-05) from durian root and stem rot. **Khon Kaen Agriculture Journal** 47(6): 1251-1264. (in Thai)
- Thongbansai, P., Thongkamngam, T. and Jaenaksorn, T. 2016. Study on antagonistic activity of *Trichoderma* sp. for controlling *Curvularia lunata* the causal agent of dirty panicle in rice (*Oryza sativa* L.). **Agriculture Science Journal** 47(3): 59-62. (in Thai)
- Thongkamngam T. and Anutrakunchai, S. 2019. Survey and collection the fungal pathogen of durian in Chanthaburi province. pp.117-122. In **Proceedings of 3rd International Symposium on Agricultural Technology and 17th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology**. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok.
- Thongkamngam, T., Koohakan, P. and Jaenaksorn, T. 2013. In vitro assessment of antagonistic efficacy of *Trichoderma* isolates against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae* incitant of wilt on hydroponically grown lettuce. **King Mongkut's Agriculture Journal** 31(3): 57-67. (in Thai)
- Vawdrey, L.L., Langdon, P. and Martin, T. 2005. Incidence and pathogenicity of *Phytophthora palmivora* and *Pythium vexans* associated with durian decline in far northern Queensland. **Australasian Plant Pathology** 34(1): 127-128.
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E.L., Marra, R., Woo, S.L. and Lorito, M. 2008. *Trichoderma* plant pathogen interactions. **Soil Biology and Biochemistry** 40(1): 1-10.
- White, T.J., Bruns, T.D., Lee, S.B. and Taylor, J.W. 1990. **Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics: PCR Protocols a Guide to Methods and Applications**. Academic Press, New York.
- Zhu, G., Huang, F., Feng, L., Qin, B., Yang, Y., Hen, Y. and Lu, X. 2008. Sensitivities of *Phytophthora infestans* to metalaxyl, cymoxanil, and dimethomorph. **Agricultural Sciences in China** 7(7): 831-840.



Research Article

การปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาและการย่อยได้ของข้าวโพดสุวรรณห่มัก
ร่วมกับจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค *in vitro*

Nutrient Quality and Digestibility Improvement of Suwan Corn Ensiled
with Microorganisms by *in vitro* Technique

นัทธชัน บัญคง ชัญญา ปลื้มใจ พงศธร คงม่น ชัยภูมิ บัญชาศักดิ์ พันธดา บึงศรีสวัสดิ์
เสวก เกียรติสมภพ และ ก.ทีปลักษณ์ ระวังเหตุ *

Natchanan Boonkong, Chanya Plumejai, Phongthorn Kongmun, Chaiyapoom Banchasak, Panatda Bungsrissawat,
Savek Kiatsomphob and K.Teepalak Rangubhet *

ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-10-21

Revised: 2024-05-30

Accepted: 2024-07-23

Keywords:

corn silage;
Bacillus subtilis;
microbial activator super LDD2;
silage quality;
in vitro technique

Inoculation of *Bacillus subtilis* (BS) in corn silage improves the quality of the silage. Moreover, the microbial activator super LDD2 (LDD2) contains microorganisms that digest fiber and can produce lactic acid. Therefore, the objective is to use BS and LDD2 to ensile with corn to improve the quality of silage and its digestibility in the rumen. The experiment was designed as a 3 × 4 factorial, completely randomized design. Three Suwan corn varieties were used: 4452, 5731, and 5819 (factor 1) along with four groups of microorganism inoculations: whole plant corn, corn silage, corn silage ensiled with BS and corn silage ensiled with LDD2 (factor 2). The results showed that the corn varieties did not affect the quality and digestibility of corn silage ($P>0.05$), but did affect neutral detergent fiber and soluble carbohydrates ($P<0.05$). The interaction between corn varieties and microbial inoculation affected crude protein in corn silage ($P<0.05$). Inoculation of *Bacillus subtilis* and microbial activator super LDD2 resulted in an increase in crude protein ($P<0.05$). In addition, the digestibility of dry matter, crude protein, and neutral detergent fiber in the microbial inoculation treatments was better than the control corn silage ($P<0.05$). These treatments also resulted in a higher total bacterial count ($P<0.05$) and increased total volatile fatty acids in the rumen ($P<0.05$). Therefore, ensiling Suwan corn with BS and LDD2 can increase the quality of corn silage, affecting its nutritional value and digestibility, and can be considered an alternative option for improving roughage quality.

© 2025 Boonkong, N., Plumejai, C., Kongmun, P., Banchasak, C., Bungsrissawat, P., Kiatsomphob, S. and Rangubhet, K.T. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: kteepalak.r@ku.ac.th

Cite this article as:

Boonkong, N., Plumejai, C., Kongmun, P., Banchasak, C., Bungsrissawat, P., Kiatsomphob, S. and Rangubhet, K.T. 2025. Nutrient Quality and Digestibility Improvement of Suwan Corn Ensiled with Microorganisms by *in vitro* Technique. *Recent Science and Technology* 17(3): 261001.

บทคัดย่อ

การเสริม *Bacillus subtilis* (BS) ในข้าวโพดหมักเป็นการเพิ่มคุณภาพของอาหารหมัก นอกจากนี้สารเร่งซูปเปอร์ พด.2 ยังประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่ย่อยเยื่อและสามารถสร้างกรดแลคติกได้ ดังนั้นจึงมีวัตถุประสงค์ในการใช้ BS และสารเร่งซูปเปอร์ พด.2 หมักร่วมกับข้าวโพดเพื่อเพิ่มคุณภาพอาหารหมักและความสามารถในการย่อยได้ในกระเพาะรูเมน วางแผนการทดลองเป็น 3×4 แฟคทอเรียล แบบ สุ่มสมบูรณ์ ใช้ข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณ จำนวน 3 สายพันธุ์ คือ 4452 5731 และ 5819 (ปัจจัยที่ 1) ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ จำนวน 4 กลุ่ม คือ ข้าวโพดสด ข้าวโพดหมัก ข้าวโพดหมักร่วมกับ BS และข้าวโพดหมักร่วมกับสารเร่งซูปเปอร์ พด.2 (ปัจจัยที่ 2) ผลการทดลองพบว่าสายพันธุ์ข้าวโพดไม่ส่งผลต่อคุณภาพและความสามารถในการย่อยได้ของข้าวโพดหมัก ($P>0.05$) แต่ส่งผลให้เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางและคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ต่างกัน ($P<0.05$) อิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และการเสริมจุลินทรีย์ส่งผลต่อโปรตีนหยาบในข้าวโพดหมัก ($P<0.05$) การเสริม BS และสารเร่งซูปเปอร์ พด.2 ส่งผลให้โปรตีนหยาบเพิ่มขึ้น ($P<0.05$) นอกจากนี้ความสามารถในการย่อยได้ของวัตถุดิบ โปรตีนหยาบ และเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางของข้าวโพดหมักด้วยจุลินทรีย์ ทุกกลุ่มให้ค่าดีกว่าข้าวโพดหมักกลุ่มควบคุม ($P<0.05$) ส่งผลให้มีปริมาณแบคทีเรียรวมที่ดีขึ้น ($P<0.05$) และเพิ่มผลผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมน ($P<0.05$) ดังนั้นการหมักข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณ ร่วมกับ BS และสารเร่งซูปเปอร์ พด.2 สามารถเพิ่มคุณภาพของข้าวโพดหมัก ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาและ ความสามารถในการย่อยได้ ซึ่งนับว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพอาหารหมักสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง

คำสำคัญ: ข้าวโพดหมัก, บาซิลลัส ซับทิลิส, สารเร่งซูปเปอร์ พด.2, คุณภาพอาหารหมัก, เทคนิค in vitro

1. บทนำ

พืชหมักเป็นการถนอมอาหารสัตว์ในช่วงขาดแคลนพืชอาหารสดสำหรับเลี้ยงสัตว์ ซึ่งวิธีการถนอมพืชอาหารสัตว์ สามารถทำได้ในรูปของพืชหมัก (silage) ทำได้ในทุกฤดูกาล โดยการหมักพืชอาหารสัตว์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้อาหารสัตว์มีสภาพเป็นกรด จุลินทรีย์ก่อโทษไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จึงทำให้คุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการของพืชหมักนั้นยังคงสามารถเก็บรักษาไว้นาน (Department of Livestock Development, 2001) ข้าวโพดสายพันธุ์สุวรรณปรับปรุงพันธุ์โดยศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติไรสุวรรณ (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) เป็นการนำสายพันธุ์แท่งเกษตรศาสตร์มาผสมได้ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สายพันธุ์ลูกผสมเดี่ยว เช่น พันธุ์สุวรรณ 4452 พันธุ์สุวรรณ 5731 พันธุ์สุวรรณ 5819 เป็นต้น เพื่อใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง ลักษณะเด่น คือ ให้ผลผลิตต่อไร่สูง ลำต้นอวบ ฝักใหญ่ เมล็ดเต็ม และโปรตีนสูง เหมาะสำหรับการทำพืชอาหารหมักเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดสายพันธุ์อื่น ๆ อายุการเก็บเกี่ยวต้นข้าวโพดพร้อมฝัก 85 - 110 วัน ซึ่งมีปริมาณแป้ง 50 เปอร์เซ็นต์ (milk line 50%) ของเมล็ด ส่งผลให้มีความน่ากินสูง ย่อยได้ง่าย อุดมด้วยพลังงาน โปรตีน และวิตามิน ผลผลิตเฉลี่ย 1,430 - 1,861 กิโลกรัม/ไร่ นอกจากนี้ข้าวโพดลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณต้านทานโรคราน้ำค้างและโรคราสนิมได้ (Aekatasawan et al., 2015) ความต้องการทางโภชนาการของสัตว์เป็นปัจจัยที่เกษตรกรให้ความสำคัญ เพื่อให้สัตว์มีสุขภาพดีส่งผลต่อผลผลิตที่ได้ตามมาตรฐานและมีคุณภาพ การใช้สารเสริมชีวิต (probiotic) คือ การเสริมจุลินทรีย์โพรไบโอติกในอาหาร เพื่อให้เกิดความสมดุลของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร นอกจากจะส่งผลดีต่อสุขภาพของสัตว์แล้ว ยังมีช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อย การเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันในการต้านทานโรค และทำให้สัตว์

เจริญเติบโตมีสุขภาพดี ซึ่งถือเป็นการลดการใช้ยาต้านจุลินทรีย์ในการผลิตสัตว์ จุลินทรีย์ที่เสริมในพืชอาหารหมักสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ แบคทีเรีย เช่น *Lactobacillus acidophilus* (Rahman et al., 2013), *Bacillus subtilis* (Davis et al., 2008) เป็นต้น เชื้อรา เช่น *Aspergillus niger* (Seo et al., 2010), *Candida pintolopesii* (DaŞkiran et al., 2012) และ *Saccharomyces cerevisiae* (Bai et al., 2013) เป็นต้น สารเร่งซูปเปอร์ พด.2 เป็นผลิตภัณฑ์จากกรมพัฒนาที่ดิน (Department of Land Development, 2023) ซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์มีคุณสมบัติในการย่อยสลายองค์ประกอบของพืชที่มีลักษณะสด มีความชื้นสูง โดยดำเนินกิจกรรมทั้งในสภาพที่มีอากาศและในสภาวะไร้อากาศ ประกอบด้วยจุลินทรีย์ประเภทยีสต์ (*Pichia* sp.) แบคทีเรียผลิตกรดแลคติก (*Lactobacillus* sp.) แบคทีเรียย่อยสลายโปรตีน (*Bacillus* sp.) แบคทีเรียย่อยสลายไขมัน (*Bacillus* sp.) และแบคทีเรียย่อยสลายอินทรีย์ฟอสฟอรัส (*Burkholderia* sp.) ซึ่งจุลินทรีย์ที่ดีซึ่งจะช่วยควบคุมจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ (Fuller, 1989) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยอาหารและการดูดซึมสารอาหาร (Vieira et al., 2014) และช่วยเพิ่มระบบภูมิคุ้มกัน (Reid, 2008) ดังนั้นการหมักข้าวโพดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในปริมาณ 1×10^5 cfu/g มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนกรหมักอาหารหมัก ได้ผลผลิตเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดแลคติก กรดอะซิติก (Elferink et al., 2000; Guan et al., 2020) ซึ่งค่าความเป็นกรด - ด่างต่ำลง เป็นผลมาจากกรดแลคติกที่ผลิตขึ้นจากกระบวนการหมัก จึงทำให้คุณภาพของอาหารหมักยังคงสภาพ จึงทำการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณภาพจากการหมักข้าวโพดลูกผสมสุวรรณร่วมกับจุลินทรีย์กลุ่มโพรไบโอติกที่สร้างกรดแลคติกในอาหารหมัก และประเมินความสามารถในการย่อยได้ของโภชนาโดยใช้เทคนิคแบบ in vitro เพื่อการใช้ประโยชน์จากข้าวโพดลูกผสมสุวรรณหมักสำหรับเป็นแหล่งอาหารหมักของสัตว์เคี้ยวเอื้องต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การทำข้าวโพดหมัก

สุมตัดข้าวโพดสายพันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 4452, 5731 และ 5819 อายุ 85 - 90 วัน ณ ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตร สถานีวิจัยลพบุรี (โคกเจริญ) เพื่อจัดเก็บเป็นตัวอย่างต้นข้าวโพดสดพร้อมฝัก และนำมาทำข้าวโพดหมักโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ 1. หมักร่วมกับจุลินทรีย์โพรไบโอติก *Bacillus subtilis* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่ได้รับการสนับสนุนจากภาคเอกชน ในปริมาณ 1×10^5 cfu ต่อกรัมของข้าวโพดสด 2. หมักร่วมกับสารเร่งซูปเปอร์ พด.2 เพื่อช่วยเร่งกระบวนการหมักข้าวโพดให้ดีขึ้นทั้งด้านกายภาพ และคุณค่าทางโภชนาการ ในปริมาณ 5 กรัมต่อน้ำหนักข้าวโพดสด 1 กิโลกรัม ซึ่งสารเร่งซูปเปอร์ พด.2 มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ง่าย จึงเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ จึงส่งผลต่อประชากรของจุลินทรีย์ จะมีจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดแลคติกอยู่ 1×10^5 cfu ต่อกรัมของข้าวโพดสด เพื่อให้ข้าวโพดหมักมีปริมาณกรดแลคติกในระดับที่เหมาะสม โดยทำการหมักข้าวโพดแต่ละกลุ่มการทดลองในถังหมักขนาด 1 กิโลกรัม จำนวนกลุ่มละ 5 ถัง เป็นเวลา 21 วัน

2.2 การวางแผนทดลอง

วางแผนการทดลอง แบบ 3×4 Factorial in Completely Randomized design (CRD) จำนวน 12 กลุ่มซึ่งมีข้าวโพดสดก่อนทำการหมักเป็นชุดควบคุม 3 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ซ้ำ จำนวนรวมทั้งสิ้น 60 หน่วยทดลอง โดยมี 2 ปัจจัยในการทดลอง คือ ปัจจัยแรก คือ ศึกษاثิทธิพลของสายพันธุ์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 3 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 4452, พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5731 และ พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5819 ปัจจัยที่สอง คือ ศึกษاثิทธิพลของการใช้จุลินทรีย์ ในการหมักข้าวโพด โดยมีกลุ่มอาหารทดลองดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 อาหารชุดควบคุม (Fresh) ประกอบด้วย

1. ข้าวโพดสดก่อนหมัก พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 4452
2. ข้าวโพดสดก่อนหมัก พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5731
3. ข้าวโพดสดก่อนหมัก พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5819

กลุ่มที่ 2 อาหารหมัก (Silage) ประกอบด้วย

1. ข้าวโพดหมัก พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 4452
2. ข้าวโพดหมัก พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5731
3. ข้าวโพดหมัก พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5819

กลุ่มที่ 3 อาหารหมักร่วมกับจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* (Silage+BS) ประกอบด้วย

1. ข้าวโพด พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 4452 หมักร่วมกับ *Bacillus subtilis*
2. ข้าวโพด พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5731 ร่วมกับ *Bacillus subtilis*

3. ข้าวโพด พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5819 ร่วมกับ *Bacillus subtilis*

กลุ่มที่ 4 อาหารหมักร่วมกับ สารเร่งซูปเปอร์ พด.2 (Silage+LDD2) ประกอบด้วย

1. ข้าวโพด พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 4452 หมักร่วมกับ สารเร่งซูปเปอร์ พด.2
2. ข้าวโพด พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5731 หมักร่วมกับ สารเร่งซูปเปอร์ พด.2
3. ข้าวโพด พันธุ์ลูกผสมเดี่ยวสุวรรณ 5819 หมักร่วมกับ สารเร่งซูปเปอร์ พด.2

2.3 การประเมินคุณภาพด้านกายภาพของข้าวโพดหมัก

การประเมินคุณภาพของข้าวโพดหมักโดยจะให้คะแนนจากการประเมิน กลิ่น เนื้อพืชหมัก และสี โดยการสังเกต ตรวจวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) โดยเครื่อง pH meter ตามหลักเกณฑ์ของ Panichpol *et al.* (2004)

2.4 การประเมินคุณค่าทางเคมีของข้าวโพดหมัก

การประเมินคุณค่าทางโภชนาการของต้นข้าวโพดสด และข้าวโพดหมักที่กระบวนการหมักสมบูรณ์แล้ว 21 วัน ได้แก่ วัตถุแห้ง เถ้า โปรตีนหยาบ ไขมัน เยื่อใยหยาบ และพลังงาน ตามวิธีการวิเคราะห์ของ AOAC (1990) และ Goering and Van Soest (1970)

2.5 การประเมินความสามารถในการย่อยได้ของโภชนาการในกระเพาะรูเมน

การประเมินความสามารถในการย่อยได้ของโภชนาการในกระเพาะรูเมนของข้าวโพดหมัก โดยจำลองสภาพการหมักแบบไร้อากาศด้วยวิธี *In vitro* true digestibility โดยเครื่อง ANKOM DAISY II Incubator (Tassone *et al.*, 2020) เพื่อหาปริมาณโภชนาการที่ย่อยได้ในกระเพาะรูเมน และวิเคราะห์หาอัตราการย่อยสลายของโภชนาการด้วยเครื่อง ANKOM^{RF} Gas Production โดยใช้ตัวอย่างที่เตรียมสารเคมีร่วมกับน้ำย่อยจากกระเพาะรูเมนของโคที่เก็บจากโรงฆ่าสัตว์โคเนื้อ สหกรณ์กำแพงแสน จำกัด และสามารถคำนวณได้ ดังนี้ $IVTDMD (\%DM) = (100 - (W3 - (W1 \times C)) \times 100 / (W2 \times DM)$ เมื่อ C = น้ำหนักถุงในลอนเปล่าหลังอบ/น้ำหนักถุงเริ่มต้น W1 = น้ำหนักถุงเปล่า W2 = น้ำหนักตัวอย่าง และ W3 = น้ำหนักถุงพร้อมตัวอย่างหลังจากการย่อย NDF (Tassone *et al.*, 2020)

2.6 ตรวจนับจำนวนจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมน

ตรวจนับจำนวนจุลินทรีย์ด้วยวิธี total bacteria culture plate โดยเก็บตัวอย่างของเหลวจากการทดลองด้วยเทคนิค *in vitro* และทำการเจือจางตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นในปริมาตร 10×10^{-5} มิลลิลิตร

จากนั้นนำไปเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับ anaerobic bacteria ตามวิธีการของ Grubb and Dehority (1976) และบ่มที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียสในสภาวะไร้อากาศ เป็นเวลา 36 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำแผ่นอาหารเลี้ยงเชื้อออกมานับจำนวนโคโลนีของแบคทีเรีย การนับเซลล์โปรโตซัวจากกล้องจุลทรรศน์โดยเก็บตัวอย่างของเหลวจากการทดลองด้วยเทคนิค *in vitro* ในปริมาณ 5 มิลลิลิตร นำมาผสมกับสารละลาย methyl green formalin saline เพื่อทำการตรึงโปรโตซัว เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมานับเซลล์ของโปรโตซัวโดยใช้ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตรหยดลงบน counting chamber (0.1 ตารางมิลลิเมตร) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

2.7 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความแปรปรวนของอิทธิพลในแต่ละปัจจัยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS (SAS, 2022) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มอาหารทดลองด้วยวิธี Least significant difference (LSD) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$ โดยมีแบบจำลองทางสถิติของการทดลองดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

เมื่อ Y_{ijk} = ค่าสังเกตของหน่วยทดลองจากอิทธิพลร่วมระดับที่ i ของปัจจัย A, ระดับที่ j ของปัจจัย B ซ้ำที่ k , μ = ค่าเฉลี่ยรวมของค่าสังเกตทั้งหมดในการทดลอง, A_i = อิทธิพลของสายพันธุ์ข้าวโพด เมื่อ $i = 1, 2$, และ 3 , B_j = อิทธิพลของการหมักข้าวโพดร่วมกับจุลินทรีย์โปรไบโอติก เมื่อ $j = 1, 2, 3$, และ 4 , AB_{ij} = อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B, ε_{ijk} = ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณและข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณหมักร่วมกับจุลินทรีย์

ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านลักษณะทางกายภาพ ดังแสดงใน Table 1 พบว่าสายพันธุ์ของข้าวโพดไม่มีอิทธิพลร่วมกับการหมักด้วยจุลินทรีย์ ข้าวโพดหมักกลุ่มที่เสริมจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* หรือกลุ่มที่เสริมด้วยสารเร่งซูเปอร์ พด.2 และข้าวโพดหมักที่ไม่ได้เสริมจุลินทรีย์ ให้คุณภาพทางกายภาพในระดับดีมากโดยไม่แตกต่าง ($P > 0.05$) จากกลุ่มข้าวโพดสด ข้าวโพดหมักทั้ง 3 สายพันธุ์ กลับ เนื้อสัมผัส และค่าความเป็นกรดเป็นด่างไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) ซึ่งสายพันธุ์มีอิทธิพลต่อสีของพืชหมักและคะแนนทางกายภาพโดยรวม พบว่าข้าวโพดสุวรรณ 5819 ให้ค่าคะแนนของกลิ่นดีที่สุด 2.60 ($P < 0.05$) และให้ค่าคะแนนรวมสูงสุด 21.52 คะแนน ($P < 0.05$) และพบว่าการเสริมจุลินทรีย์ส่งผลให้คุณภาพทางกายภาพดีขึ้นในทุก ๆ ด้าน ($P < 0.05$) ค่าคะแนนรวมของข้าวโพดหมักด้วยจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* และกลุ่มที่เสริมด้วยสารเร่งซูเปอร์ พด.2 เป็น 22.29 และ 21.04 ตามลำดับ มีค่าสูงกว่า ($P < 0.05$) ข้าวโพดสด (20.08) และข้าวโพดหมักกลุ่มควบคุม (21.45) ข้าวโพดหมักทุกสายพันธุ์มีค่า pH ระหว่าง 3.5 – 4.2 เป็นค่าที่ดีที่สุดของอาหารหมัก (Panichpol *et al.*, 2004) การเสริมจุลินทรีย์ส่งผลให้มีค่า pH ลดลง เนื่องจากในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จุลินทรีย์ *Lactobacillus* sp. มีคุณสมบัติในการหมักย่อยองค์ประกอบของพืชที่มีลักษณะสด อวบน้ำ (Department of Land Development, 2023) และมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ง่าย จุลินทรีย์สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตกรดแลคติก ถ้ามีปริมาณกรดแลคติกที่มากขึ้นจะส่งผลต่อค่า pH ที่ลดต่ำลง ทำให้ข้าวโพดมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี (Lounglawan and Suksombat, 2015)

Table 1 Physical quality of Suwan corn and Suwan corn silage ensiled with microorganisms

Treatment		Smell	Texture	Color	pH	Total score ¹
Factor 1	Factor 2					
Suwan 4452	Fresh	8.20 ^c	3.90 ^a	2.10 ^d	4.91 ^a	20.11 ^d
	Silage	10.12 ^b	3.30 ^b	2.60 ^b	4.11 ^b	21.13 ^c
	Silage+BS ²	11.50 ^a	3.10 ^b	2.75 ^a	3.54 ^c	21.89 ^b
	Silage+LDD2 ³	10.55 ^b	2.90 ^b	2.45 ^c	3.97 ^b	20.87 ^c
Suwan 5731	Fresh	8.40 ^c	3.70 ^a	2.00 ^d	4.96 ^a	20.06 ^d
	Silage	10.68 ^b	3.50 ^b	2.50 ^b	3.72 ^{bc}	21.40 ^c
	Silage+BS ²	11.23 ^a	3.20 ^b	2.80 ^a	3.94 ^b	22.17 ^{ab}
	Silage+LDD2 ³	10.93 ^{ab}	2.80 ^b	2.50 ^b	3.66 ^b	20.89 ^c

Table 1 (Continuous)

Treatment		Smell	Texture	Color	pH	Total score ¹
Factor 1	Factor 2					
Suwan 5819	Fresh	8.10 ^c	3.80 ^a	2.20 ^d	4.97 ^a	20.07 ^d
	Silage	10.75 ^b	3.60 ^b	2.70 ^{ab}	3.77 ^{bc}	21.82 ^b
	Silage+BS ²	11.84 ^a	3.30 ^b	2.90 ^a	3.76 ^{bc}	22.80 ^a
	Silage+LDD2 ³	11.12 ^{ab}	3.00 ^b	2.60 ^b	3.65 ^{bc}	21.37 ^c
SEM ⁴		1.32	0.36	0.28	0.55	0.87
P-values		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
P-values (Significant effect due to corn breed)	Treatment					
	Suwan 4452	10.09	3.30	2.48 ^b	4.13	21.00 ^b
	Suwan 5731	10.31	3.30	2.45 ^b	4.07	21.13 ^a
	Suwan 5819	10.45	3.43	2.60 ^a	4.04	21.52 ^a
P-value (Significant effect due to inoculation)	Breed	0.204	0.226	<0.05	0.78	0.03
	Fresh	8.23 ^c	3.80 ^a	2.10 ^c	4.95 ^a	20.08 ^c
	Silage	10.52 ^b	3.47 ^b	2.60 ^b	3.87 ^b	21.45 ^b
	Silage+BS ²	11.52 ^a	3.20 ^b	2.82 ^a	3.75 ^b	22.29 ^a
	Silage+LDD2 ³	10.87 ^{ab}	2.90 ^c	2.52 ^b	3.76 ^b	21.04 ^b
Inoculation		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Interaction						
	Breed* Treatment	0.33	0.07	0.55	0.57	0.64

¹ Total score 20 – 25 = excellent, 15 – 19 = good, 6 – 4 = medium, and 0 – 5 = bad.

² BS = *Bacillus subtilis*, ³LDD2 = Microbial Activator Super LDD2, ⁴SEM = standard error of mean.

^{abcd} Means (n=5) with different superscripts within the same column under the same factor are significantly different among treatments (P < 0.05).

3.2 ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางเคมีของข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณและข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณหมักร่วมกับจุลินทรีย์

เมื่อวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาของข้าวโพดหมัก ให้ผลดังแสดงใน Table 2 โดยพบว่าสายพันธุ์ของข้าวโพดมีอิทธิพลร่วมกับการเสริมจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อค่าอินทรีย์วัตถุ อนินทรีย์วัตถุ และกรดแลกติก (P< 0.05) ในขณะที่อิทธิพลเดี่ยวของสายพันธุ์ข้าวโพด และการเสริมจุลินทรีย์ไม่ส่งผลต่อค่าอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุ (P>0.05) แต่สายพันธุ์ของข้าวโพดมีอิทธิพลต่อปริมาณกรดแลกติก (P<0.05) และปริมาณของโปรตีนหยาบ (P<0.05) โดยพบว่าข้าวโพดสุวรรณ 5731 และ 5819 ให้ค่ากรดแลกติก (6.01 และ 6.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) ที่สูงกว่าข้าวโพดสุวรรณ 4452 (5.57 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากต้นข้าวโพดสดที่เก็บเกี่ยวในระยะเมล็ดแก่ (85-110 วัน) จะมีค่า WSC สูงกว่าระยะเมล็ดแข็ง ซึ่งถ้าปริมาณ WSC เพียงพอจะทำให้แบคทีเรียผลิตกรดแลกติกเจริญเติบโตมีผลให้ค่า pH ลดลง และมีปริมาณของโปรตีนหยาบในข้าวโพดสุวรรณ 5731 และ 5819 (8.35 และ 7.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) สูงกว่าข้าวโพดสุวรรณ 4452 (5.57 เปอร์เซ็นต์) (P<0.05) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ (water soluble carbohydrate; WSC) ที่สูงขึ้น (P<0.05)

ในข้าวโพดสุวรรณ 5731 ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องไปยังการผลิตกรดแลกติกขึ้นในอาหารหมัก โดยกระบวนการหมักพืชอาหารสัตว์แบบใช้ออกซิเจนจะอาศัยจุลินทรีย์ประเภทยีสต์ (*Pichia* sp.) แบคทีเรียผลิตกรดแลกติก (*Lactobacillus* sp.) แบคทีเรียย่อยสลายโปรตีน (*Bacillus* sp.) แบคทีเรียย่อยสลายไขมัน (*Bacillus* sp.) และแบคทีเรียย่อยสลายอินทรีย์ฟอสฟอรัส (*Burkholderia* sp.) ซึ่งจะใช้คาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้เป็นแหล่งพลังงาน มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักอาหารหยาบ โดยจุลินทรีย์จะใช้คาร์โบไฮเดรตในส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้เป็นแหล่งพลังงาน และได้ผลผลิตเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดแลกติก กรดอะซิติก (Elferink *et al.*, 2000; Guan *et al.*, 2020) นอกจากจะเป็นจุลินทรีย์ที่ช่วยพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการหมักของพืชแล้ว ยังเป็นจุลินทรีย์สำคัญที่ทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่าง ต่ำลงซึ่งเป็นผลมาจากกรดแลกติกที่ผลิตขึ้นจากกระบวนการหมัก โดยไม่ใช้ออกซิเจนโดยการทำงานของแบคทีเรียที่มีการผลิตกรดแลกติก ซึ่งถ้าการหมักมีการผลิตกรดแลกติกมากจะส่งผลต่อค่า pH ที่ลดต่ำลง จึงทำให้คุณภาพของอาหารหมักยังคงสภาพได้ เนื่องจากในสภาวะค่าความเป็นกรด - ด่างที่ต่ำลงนั้น ทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้พืชหมักเกิดการเน่าเสีย (Lounglawan and Suksombat, 2015)

Table 2 Chemical compositions (% on DM basis) of Suwan corn and Suwan corn silage ensiled with microorganisms

Treatment		DM	Ash	OM	CP	EE	WSC	GE	Lactic acid
Factor 1	Factor 2								
Suwan 4452	Fresh	26.58 ^b	4.96	95.04	7.59 ^d	5.72	15.23 ^a	4.11	5.39 ^d
	Silage	24.53 ^c	5.05	94.95	7.10 ^e	5.52	12.25 ^b	4.08	5.25 ^d
	Silage+BS ²	24.56 ^c	7.52 ^a	92.48	7.02 ^{ef}	5.33	12.10 ^b	4.07	6.78 ^b
	Silage+LDD2 ³	25.52 ^b	7.26 ^a	92.74	8.56 ^b	5.40	11.52 ^c	4.26	5.85 ^{cd}
Suwan 5731	Fresh	27.76 ^a	4.51	95.49	8.53 ^b	5.08	15.56 ^a	4.01	5.09 ^e
	Silage	24.22 ^c	5.31	94.69	7.94 ^c	5.30	12.55 ^b	4.03	5.39 ^d
	Silage+BS ²	24.47 ^c	7.04 ^b	92.96	7.99 ^c	5.78	12.37 ^c	4.05	7.31 ^a
	Silage+LDD2 ³	25.76 ^b	7.21 ^a	92.79	8.94 ^a	5.35	12.52 ^b	4.05	6.23 ^c
Suwan 5819	Fresh	27.30 ^a	5.99	94.01	7.86 ^c	5.76	15.26 ^a	4.06	5.85 ^{cd}
	Silage	24.49 ^c	5.07	92.93	7.52 ^d	5.43	12.47 ^b	4.01	6.12 ^c
	Silage+BS ²	24.54 ^c	6.40	93.60	6.85 ^f	5.19	12.24 ^c	4.04	7.29 ^a
	Silage+LDD2 ³	25.85 ^b	6.58	93.42	8.93 ^a	5.70	12.49 ^b	4.24	7.53 ^a
SEM ⁴		1.21	1.04	1.04	0.72	0.23	1.42	0.08	0.99
P- values	Treatment	< 0.05	0.13	0.13	< 0.05	0.98	< 0.05	0.06	< 0.05
P-values (Significant effect due to corn breed)	Suwan 4452	25.30	6.20	93.80	7.57 ^b	5.49	12.78	4.13	5.57 ^b
	Suwan 5731	25.55	6.02	93.98	8.35 ^a	5.38	13.25	4.04	6.01 ^a
	Suwan 5819	25.55	6.01	93.49	7.79 ^b	5.52	13.12	4.09	6.70 ^a
	Breed	0.51	0.67	0.67	0.02	0.78	0.06	0.11	< 0.05
P-value (Significant effect due to inoculation)	Fresh	27.21 ^a	5.15	94.85	7.99 ^b	5.52	15.35 ^a	4.06	5.11 ^b
	Silage	24.41 ^c	5.14	94.19	7.52 ^{b c}	5.42	12.42 ^b	4.04	5.59 ^b
	Silage+BS ²	24.52 ^c	6.99	93.01	7.29 ^c	5.43	12.24 ^b	4.05	7.13 ^a
	Silage+LDD2 ³	25.71 ^b	7.02	92.98	8.81 ^a	5.48	12.18 ^b	4.18	6.54 ^a
	Treatment	< 0.05	0.06	0.06	< 0.05	0.97	< 0.05	0.06	< 0.05
Interaction	Breed* Treatment	0.97	0.02	0.02	0.79	0.48	0.57	0.46	0.01

¹ DM = dry matter, OM = organic matter, CP = crude protein, EE = ether extract, WSC = water soluble carbohydrate, GE= gross energy (kcal/g).

² BS = *Bacillus subtilis*, ³LDD2 = Microbial Activator Super LDD2, ⁴SEM = standard error of mean.

^{abodef} Means (n=5) with different superscripts within the same column under the same factor are significantly different among treatments (P < 0.05).

3.3 ผลการวิเคราะห์เยื่อใยและคาร์โบไฮเดรตของข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณ และข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณหมักร่วมกับจุลินทรีย์

องค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้าง (neutral detergent fiber; NDF, acid detergent fiber; ADF, acid detergent lignin; ADL) และองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่เป็นโครงสร้าง (non fiber carbohydrate; NFC) รวมทั้งองค์ประกอบที่เป็นเยื่อใยเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสในอาหารสัตว์ ดังแสดงใน Table 3 โดยพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์ของข้าวโพดและการเสริมจุลินทรีย์ในอาหารหมักไม่ส่งผลต่อโครงสร้างคาร์โบไฮเดรต แต่มีแนวโน้มต่อการเปลี่ยนแปลงเยื่อใยที่ละลายได้

ในสารละลายที่เป็นกรด (ADF) และลิกนิน (ADL) (P = 0.08 และ P = 0.06 ตามลำดับ) สายพันธุ์ของข้าวโพดส่งผลต่อเยื่อใยที่ละลายได้ในสารละลายที่เป็นกลาง (NDF) เยื่อใยที่ละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด (ADF) และเยื่อใยเซลลูโลส โดยพบว่าข้าวโพดสุวรรณ 5731 และ 5819 มีปริมาณ NDF ADF และเซลลูโลส น้อยกว่าข้าวโพดสุวรรณ 4452 (P<0.05) อาจเป็นสาเหตุจากระยะเวลาการตัดต้นข้าวโพดแต่ละสายพันธุ์ที่มีความแตกต่างกันจึงส่งผลต่อปริมาณ NDF ADF และเซลลูโลส การเสริมจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* และกลุ่มที่เสริมด้วยสารเร่งซูเปอร์ พด.2 มีคุณสมบัติในการหมักย่อย และมีส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ง่าย จุลินทรีย์สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงาน ส่งผลต่อโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต โดยทำให้มีปริมาณของ NDF ADF ADL และ

เซลลูโลส ลดลง ($P < 0.05$) ส่งผลต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่โครงสร้างคือ NFC เพิ่มมากขึ้น ($P < 0.05$) เนื่องจากกลุ่มที่มีเยื่อใยในปริมาณมากจะทำให้คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่เยื่อใยลดลง ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบทางโปรตีนหยาบ ร่วมกับการลดลงของเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางและคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ เนื่องจากในกระบวนการหมักพืชอาหารสัตว์ที่สมบูรณ์แล้วในระยะเวลา 21 วัน ทำให้มีปริมาณของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (Elferink *et al.*, 2000) นอกจากนี้ยังมีการย่อยสลายเซลลูโลสและมีการใช้ประโยชน์จากแป้งและน้ำตาลในกระบวนการหมักในสภาวะไร้อากาศให้เป็นกรดแลคติก (Zhang *et al.*, 2015) ทั้งนี้ผลการ

ทดลองพบว่าค่า NDF และ WSC ที่ลดลงในข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 4452 มีความสอดคล้องกับค่า pH ที่ลดลง โดยค่า pH ที่ลดลงอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากปริมาณกรดแลคติกที่ถูกผลิตขึ้นจากการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ นอกจากนี้ ข้าวโพดสายพันธุ์สุวรรณ 5731 และ 5819 ได้ถูกปรับปรุงสายพันธุ์ให้มีคุณลักษณะของข้าวโพดอาหารสัตว์โดยมีพื้นฐานมาจากข้าวโพดสายพันธุ์ 4452 โดยปรับปรุงให้มีคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวโพดที่ดีขึ้น (Aekatasanawan *et al.*, 2015) จึงส่งผลให้มีค่า NDF ที่น้อยลงและมีค่า WSC เพิ่มขึ้น

Table 3 Structure and non - structure carbohydrate compositions (% on DM basis) of Suwan corn and Suwan corn silage ensiled with microorganisms

Treatment		NDF	ADF	ADL	Hemicellulose	Cellulose	NFC
Factor 1	Factor 2						
Suwan 4452	Fresh	66.75 ^a	34.94 ^a	5.59 ^b	31.81	29.35 ^a	15.28 ^{de}
	Silage	56.48 ^c	31.43 ^b	5.23 ^c	25.05	26.20 ^{ab}	25.85 ^b
	Silage+BS ²	56.92 ^c	28.00 ^{cd}	4.57 ^d	28.92	23.43 ^b	23.21 ^c
	Silage+LDD2 ³	66.20 ^a	26.25 ^{de}	5.06 ^e	32.48	27.75 ^a	12.58 ^e
Suwan 5731	Fresh	65.45 ^a	32.63 ^{ab}	6.29 ^a	32.82	26.34 ^{ab}	16.03 ^d
	Silage	58.79 ^b	29.11 ^c	5.64 ^b	29.68	23.47 ^b	22.66 ^c
	Silage+BS ²	59.73 ^b	27.39 ^d	5.57 ^b	32.34	21.82 ^c	19.46 ^d
	Silage+LDD2 ³	66.62 ^a	25.20 ^e	5.60 ^b	24.05	26.68 ^{ab}	11.88 ^e
Suwan 5819	Fresh	67.86 ^a	31.48 ^b	5.71 ^b	36.38	25.77 ^b	12.53 ^e
	Silage	55.60 ^d	24.12 ^a	4.69 ^d	31.48	19.43 ^d	24.38 ^{bc}
	Silage+BS ²	54.24 ^d	23.03 ^f	4.35 ^d	31.21	18.68 ^d	27.32 ^a
	Silage+LDD2 ³	60.74 ^b	23.26 ^f	4.54 ^d	28.06	19.17 ^d	17.85 ^d
SEM ⁴		5.01	3.91	0.60	3.45	3.58	4.71
P- values	Treatment	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.37	< 0.05	0.02
P-values (Significant effect due to corn breed)	Suwan 4452	61.59	30.16 ^b	5.11 ^a	29.57	26.68 ^b	19.23
	Suwan 5731	62.65	28.58 ^b	5.78 ^b	29.72	24.58 ^b	17.51
	Suwan 5819	59.61	25.47 ^a	4.82 ^a	31.78	20.76 ^a	20.52
	Breed	0.19	< 0.05	< 0.05	0.58	< 0.05	0.50
P-value (Significant effect due to inoculation)	Fresh	66.69 ^a	33.02 ^a	5.86 ^a	33.67	27.15 ^a	14.61 ^b
	Silage	56.96 ^b	28.22 ^b	5.19 ^b	28.74	23.03 ^{a b}	24.30 ^a
	Silage+BS ²	56.96 ^b	26.14 ^{b c}	4.83 ^b	30.82	21.31 ^b	23.33 ^a
	Silage+LDD2 ³	64.52 ^a	24.90 ^c	5.07 ^b	28.20	24.53 ^{a b}	14.10 ^b
Treatment		< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.25	0.02	< 0.05
Interaction	Breed* Treatment	0.95	0.08	0.06	0.68	0.18	0.73

¹ NDF = neutral detergent fiber, ADF = acid detergent fiber, ADL = acid detergent lignin, NFC = non fiber carbohydrate.

² BS = *Bacillus subtilis*, ³LDD2 = Microbial Activator Super LDD2, ⁴SEM = standard error of mean.

^{abdef} Means (n=5) with different superscripts within the same column under the same factor are significantly different among treatments ($P < 0.05$).

3.4 ผลการประเมินความสามารถในการย่อยได้ของโภชนะในกระเพาะรูเมนด้วยเทคนิค *in vitro* ของข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณและข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณหมักร่วมกับจุลินทรีย์

ความสามารถในการย่อยได้ของโภชนะดังแสดงใน Table 4 โดยพบว่าข้าวโพดหมักทุกกลุ่มการทดลองให้ค่าความสามารถในการย่อยได้ของวัตถุแห้ง โปรตีนหยาบ และเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลาง แตกต่างกันอย่างสถิติ ($P < 0.05$) โดยความสามารถในการย่อยได้ของวัตถุแห้งเป็นผลสืบเนื่องมาจากทั้งสายพันธุ์ของข้าวโพดการเติมสารเร่งซูเปอร์ พด.2 และอิทธิพลที่เกิดร่วมกันทั้งสองปัจจัย ในขณะที่ความสามารถในการย่อยได้ของโปรตีนหยาบและเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางเป็นผลมาจากอิทธิพลของการเสริมจุลินทรีย์ในข้าวโพดหมัก ($P < 0.05$)

พบว่า เมื่อเติมจุลินทรีย์ในอาหารหมัก จะทำให้มีการย่อยได้ที่ดีขึ้น นอกจากนี้สายพันธุ์ของข้าวโพดไม่มีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของโปรตีนหยาบและเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลาง การใช้จุลินทรีย์กลุ่ม *Bacillus subtilis* หมักร่วมกับข้าวโพดจะทำให้การย่อยสลายของเยื่อใยในส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินดีขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถผลิตน้ำย่อยเซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลสจึงทำให้เยื่อใยบางส่วนใน NDF ถูกย่อยสลายไปในกระบวนการหมัก จึงส่งผลให้มีการย่อยได้ของ NDF ดีขึ้น (Fugita *et al.*, 2012) เอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดแลกติกมีผลต่อผนังเซลล์ของพืชรวมถึงการใช้ประโยชน์ได้ของสารประกอบที่ละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาความสามารถในการย่อยได้ของพืชหมัก (Chang *et al.*, 2021)

Table 4 *In vitro* rumen digestibility (% on DM basis) of Suwan corn and Suwan corn silage ensiled with microorganisms

Treatment		DMD	OMD	CPD	NDFD	DE
Factor 1	Factor 2					
Suwan 4452	Fresh	43.34 ^d	43.36 ^d	71.70 ^c	39.32 ^c	43.22 ^d
	Silage	48.56 ^c	48.55 ^c	74.75 ^{ab}	43.88 ^b	48.55 ^c
	Silage+BS ²	51.32 ^b	50.00 ^b	75.71 ^a	44.05 ^b	50.09 ^b
	Silage+LDD2 ³	49.66 ^{bc}	48.98 ^c	70.55 ^c	46.84 ^a	50.84 ^b
Suwan 5731	Fresh	42.46 ^d	40.95 ^e	73.33 ^b	38.71 ^c	48.30 ^c
	Silage	50.87 ^{bc}	52.73 ^b	76.41 ^a	43.89 ^b	51.23 ^{ab}
	Silage+BS ²	53.62 ^b	54.63 ^a	80.83 ^a	45.82 ^{ab}	53.81 ^a
	Silage+LDD2 ³	56.10 ^a	55.23 ^a	72.31 ^{bc}	48.38 ^a	55.37 ^a
Suwan 5819	Fresh	53.20 ^b	52.01 ^b	71.70 ^c	39.32 ^c	43.39 ^d
	Silage	54.20 ^b	53.65 ^b	74.75 ^{ab}	43.88 ^b	48.55 ^c
	Silage+BS ²	57.60 ^a	56.54 ^a	75.71 ^a	44.05 ^b	50.09 ^b
	Silage+LDD2 ³	57.75 ^a	56.58 ^a	73.15 ^b	47.78 ^a	50.27 ^b
SEM		4.98	4.99	2.78	3.25	3.56
P- values	Treatment	< 0.05	0.02	0.02	< 0.05	< 0.05
P-values (Significant effect due to corn breed)	Suwan 4452	48.22 ^a	47.72 ^b	73.18	43.52	48.18 ^a
	Suwan 5731	50.76 ^a	50.89 ^a	75.72	44.20	52.18 ^b
	Suwan 5819	55.69 ^b	54.70 ^a	73.83	43.76	48.08 ^a
	Breed	< 0.05	0.03	0.08	0.39	< 0.05
P-value (Significant effect due to inoculation)	Fresh	46.33 ^b	45.44 ^b	72.24 ^b	39.12 ^c	44.97 ^c
	Silage	51.21 ^{a b}	51.64 ^{a b}	75.30 ^{a b}	43.88 ^b	49.44 ^b
	Silage+BS ²	54.18 ^a	53.72 ^a	77.42 ^a	44.64 ^b	51.33 ^a
	Silage+LDD2 ³	54.50 ^a	53.60 ^a	72.00 ^b	47.67 ^a	52.16 ^a
	Treatment	0.02	0.02	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Interaction	Breed* Treatment	0.04	0.13	0.87	0.27	0.07

¹ DMD = dry matter digestibility, OMD = organic matter digestibility, CPD = crude protein digestibility, NDFD = neutral detergent fiber digestibility, DE = digestible energy.

² BS = *Bacillus subtilis*, ³ LDD 2 = Microbial Activator Super LDD 2, ⁴ SEM = standard error of mean.

^{abcdef} Means (n=5) with different superscripts within the same column under the same factor are significantly different among treatments ($P < 0.05$).

3.5 ผลการตรวจนับจุลินทรีย์และปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมน ของข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณ และข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณหมักร่วมกับจุลินทรีย์

ผลของปริมาณจุลินทรีย์และปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนจากการทดลองของข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมสุวรรณหมักร่วมกับจุลินทรีย์ดังแสดงใน Table 5 อิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์ของข้าวโพดและการเสริมจุลินทรีย์ข้าวโพดหมักพบว่าสามารถส่งผลต่อปริมาณแบคทีเรียและโปรโตซัวรวมทั้งหมดในกระเพาะรูเมน รวมทั้งมีอิทธิพลต่อปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่ถูกผลิตขึ้นในกระเพาะรูเมนระหว่างกระบวนการหมักย่อยสายพันธุ์ของข้าวโพดส่งผลโดยตรงต่อปริมาณแบคทีเรียในกระเพาะรูเมน ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยพบว่า ข้าวโพดสุวรรณ 5819 มีจำนวนแบคทีเรียในกระเพาะรูเมนมากที่สุด คือ 2.43×10^6 cfu ต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 5731 ให้ผลไม่แตกต่างกับข้าวโพดสุวรรณ 4452 โดยมีค่า 2.18×10^6 และ 2.21×10^6 cfu ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยที่สายพันธุ์ของข้าวโพดไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณโปรโตซัวในกระเพาะรูเมน ในขณะที่ปริมาณกรดไขมันระเหยได้โดยรวม ให้ค่าสอดคล้องกับปริมาณแบคทีเรียโดยรวมในกระเพาะรูเมน ซึ่งพบว่า ข้าวโพด

พันธุ์ สุวรรณ 5819 มีปริมาณแบคทีเรียในกระเพาะรูเมนมากที่สุดและส่งผลให้มีการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายโดยรวมมากที่สุด ($P<0.05$) เมื่อมีการเสริมจุลินทรีย์ลงในข้าวโพดหมัก พบว่า ทำให้ปริมาณของแบคทีเรีย ในกระเพาะรูเมนเพิ่มมากขึ้นโดยการเสริมจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* และสารเร่งชูเปอร์ พด.2 ให้ค่าปริมาณของจุลินทรีย์มากกว่า ข้าวโพดสดและข้าวโพดหมักกลุ่มควบคุม ($P<0.05$) ทั้งนี้การเสริมจุลินทรีย์ลงในข้าวโพดหมักไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณโปรโตซัว ในกระเพาะรูเมน ในระหว่างกระบวนการหมักย่อย แต่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายโดยพบว่า เมื่อเสริมจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* และสารเร่งชูเปอร์ พด.2 ทำให้มีปริมาณกรดไขมันที่ระเหยง่ายโดยรวมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้ ค่ากรดไขมันที่เพิ่มขึ้นมีความสอดคล้องกับค่าการย่อยได้ของ NDF ที่เพิ่มขึ้น โดยเป็นส่วนหนึ่งของกิจกรรมของจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียที่ย่อยเยื่อใย (Fugita *et al.*, 2012) นอกจากนี้โปรโตซัวที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นยังเป็นผลสืบเนื่องจากปริมาณของ NFC ที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมจุลินทรีย์ในอาหารหมัก ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Chang *et al.*, 2021)

Table 5 Rumen of microorganisms and total volatile fatty acid (VFA) production of Suwan corn and Suwan corn silage ensiled with microorganisms

Treatment		Total bacteria	Protozoa	Total VFA
Factor 1	Factor 2	(10^6 cfu/ml)	(10^5 cell/ml)	(%)
Suwan 4452	Fresh	2.11 ^d	2.10	55.32 ^b
	Silage	2.15 ^c	2.04	58.32 ^b
	Silage+BS ¹	2.23 ^b	1.95	61.24 ^a
	Silage+LDD2 ²	2.35 ^{ab}	1.83	61.58 ^a
Suwan 5731	Fresh	2.03 ^d	1.81	57.49 ^b
	Silage	2.14 ^c	1.98	60.24 ^{ab}
	Silage+BS ¹	2.31 ^{ab}	2.15	62.71 ^a
	Silage+LDD2 ²	2.25 ^b	2.19	62.35 ^a
Suwan 5819	Fresh	2.31 ^{ab}	2.37	59.32 ^{ab}
	Silage	2.45 ^a	2.16	60.23 ^{ab}
	Silage+BS ¹	2.48 ^a	1.92	63.04 ^a
	Silage+LDD2 ²	2.47 ^a	1.85	63.08 ^a
SEM		0.15	0.17	2.43
P- values		< 0.05	0.94	< 0.05

Table 5 (Continuous)

Treatment		Total bacteria	Protozoa		Total VFA
Factor 1	Factor 2	(10 ⁶ cfu/ml)	(10 ⁵ cell/ml)		(%)
SEM			0.15	0.17	2.43
P- values		Treatment	< 0.05	0.94	< 0.05
P-values (Significant effect due to corn breed)		Suwan 4452	2.21 ^b	1.98	59.12 ^b
		Suwan 5731	2.18 ^b	2.03	60.70 ^a
		Suwan 5819	2.43 ^a	2.08	61.42 ^a
		Breed	< 0.05	0.82	< 0.05
P-value (Significant effect due to inoculation)		Fresh	2.15 ^b	2.09	57.38 ^c
		Silage	2.25 ^{a b}	2.06	59.60 ^b
		Silage+BS ¹	2.34 ^a	2.01	62.33 ^a
		Silage+LDD2 ²	2.36 ^a	1.96	62.34 ^a
		Treatment	< 0.05	0.86	< 0.05
Interaction		Breed* Treatment	< 0.05	0.02	0.05

¹ BS = *Bacillus subtilis*, ²LDD2 = Microbial Activator Super LDD2, ⁴SEM = standard error of mean.

^{abc} Means (n=5) with different superscripts within the same column under the same factor are significantly different among treatments (P < 0.05).

4. สรุป

ข้าวโพดพืชอาหารสัตว์สายพันธุ์สุวรรณทั้ง 3 สายพันธุ์ให้ผลการหมักที่ไม่แตกต่างกัน การเสริมสารเร่งจุลินทรีย์ พด.2 ให้คุณค่าทางโภชนาการดีกว่าการเสริมจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* แต่การเสริมทั้ง 2 ชนิด จะช่วยเร่งกระบวนการหมัก พัฒนาคุณภาพข้าวโพดหมักให้ดีขึ้นทั้งด้านกายภาพ และคุณค่าทางโภชนาการ ส่งผลโดยตรงต่อจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนโดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศในการหายใจ ได้แก่ *Lactobacillus* sp. ซึ่งใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้าง และกลุ่มโปรโตซัวที่ใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่โครงสร้างหรือคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ ทำให้มีความสามารถในการย่อยได้ของเยื่อใยในข้าวโพดหมักได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเสริมจุลินทรีย์ในข้าวโพดหมักยังมีค่า pH ลดต่ำลง ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้หญ้าหมักเกิดการเน่าเสีย จึงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาอาหารหยาบสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนวิจัยเพื่อพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่จากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถานีวิจัยลพบุรี (โคกเจริญ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนต้นข้าวโพดสด และสหกรณ์โคเนื้อกำแพงแสนที่ให้การสนับสนุนน้ำย่อยจากกระเพาะรูเมนโคในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

Aekatasanawan, C., Aekatasanawan, C., Changsaluk, S., Chaiwong, U. and Thala, P. 2015. **Grain and Seed Production Technology of Single Cross Hybrid Suwan 4452 breed**. National Corn and Sorghum Research Center. Available Source: https://www.thai-explore.net/file_upload/submitter/file_doc/c33ce970f2be31209818e46c611fc55e.pdf, January 25, 2024. (in Thai)

AOAC. 1990. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemistry** (15thed). AOAC., Washington, D.C.

Bai, S.P., Wu, A.M., Ding, X.M., Lei, Y., Bai, J., Zhang, K.Y. and Chio, J.S. 2013. Effects of probiotic-supplemented diets on growth performance and intestinal immune characteristics of broiler chickens. **Poultry science** 92(3): 663-670.

Chang, M., Ma, F., Wei, J., Liu, J., Nan, X. and Sun, P. 2021. Live *Bacillus subtilis* natto promotes rumen fermentation by modulating rumen microbiota *in vitro*. **Animals (Basel)** 11(6): 1519.

Daşkıran, M., Öno, A.G., Cengiz, Ö., Ünsal, H., Türkylmaz, S., Tatlı, O. and Sevim, Ö. 2012. Influence of dietary

- probiotic inclusion on growth performance, blood parameters, and intestinal microflora of male broiler chickens exposed to posthatch holding time. **Journal of Applied Poultry Research** 21(3): 612-622.
- Davis, M.E., Parrott, T., Brown, D.C., De Rodas, B.Z., Johnson, Z.B., Maxwell, C.V. and Rehberger, T. 2008. Effect of a *Bacillus*-based direct-fed microbial feed supplement on growth performance and pen cleaning characteristics of growing-finishing pigs. **Journal of animal science** 86(6): 1459-1467.
- Department of Livestock Development. 2001. **Silage**. Agricultural Cooperatives Association of Thailand Printing Company Limited, Bangkok.
- Department of Land Development. 2023. **Production of Bio-Fermented solution by Microbial Activator PD.2**. Department of Land Development. Available Source: https://www.ldd.Source:nu_5wonder/ PDF/PD2. pdf, March 20, 2023. (in Thai)
- Elferink, S.J.W.H.O., Driehuis, F., Gottschal, J.C. and Spoelstra, S.F. 2000. **Silage fermentation processes and their manipulation**. FAO Plant Production and Protection Papers.
- Fugita, C.A., Prado, I.N.D., Jobim, C.C., Zawadzki, F., Valero, M.V., Pires, M.C.D.O. and Franozo, M.C. 2012. Corn silage with and without enzyme-bacteria inoculants on performance, carcass characteristics and meat quality in feedlot finished crossbred bulls. **Revista Brasileira de Zootecnia** 41: 154-163.
- Fuller, R. 1989. Probiotics in man and animals. **Journal of Applied Bacteriology** 66: 365-378.
- Goering, H.K. and Van Soest, P.J. 1970. **Forage fiber analyses**. Agri Handbook, Washington.
- Grubb, J. and Dehority B. 1976. Variation in colony counts of total viable anaerobic rumen bacteria as influenced by media and cultural methods. **Applied and Environmental Microbiology** 31(2): 262-267.
- Guan, H., Shuai, Y., Yan, Y., Ran, Q., Wang, X., Li, D. and Zhang, X. 2020. Microbial community and fermentation dynamics of corn silage prepared with heat-resistant lactic acid bacteria in a hot environment. **Microorganisms** 8(5): 719.
- Lounglawan, P. and Suksombat, W. 2015. **Effect of *Lactobacillus spp.* on Silage Fermentation**. Research reports, Suranaree University. Available Source: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/5809/1/Fulltext.pdf>, January 25, 2024. (in Thai)
- Panichpol, V., Phaikaew, C., Phomma, S., Chinvaroj, S., Arananant, J. and Ritreuchai, V. 2004. **Silage Standard** (1sted). Department of Livestock Development, Agricultural Cooperatives Association of Thailand Printing Company Limited, Bangkok. (in Thai)
- Rahman, M.S., Mustari, A., Salauddin, M. and Rahman, M.M. 2013. Effects of probiotics and enzymes on growth performance and haematobiochemical parameters in broilers. **Journal of the Bangladesh Agricultural University** 11(1): 111-118.
- Reid, G. 2008. Review: probiotics and prebiotics – progress and challenges. **International Dairy Journal** 18: 969-975.
- SAS. 2022. **SAS®University Edition software**. In. SAS Institute Inc.
- Seo, J.K., Kim, S.W., Kim, M.H., Upadhaya, S.D., Kam, D.K. and Ha, J.K. 2010. Direct-fed microbials for ruminant animals. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences** 23(12): 1657-1667.
- Tassone, S., Fortina, R. and Peiretti, P.G. 2020. *In vitro* techniques using the Daisy^{II} incubator for the assessment of digestibility : A review. **Animals** 10(5): 775.
- Van Soest, P.J., Robertson, J.B. and Lewis, B.A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science** 74: 3583-3597
- Vieira, V.A., Sforcini, M.P., Endo, V., Magioni, G.C. and Oliveira, M.D.S. 2014. Influence of probiotics on dairy cows' diet. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 8(7): 786-789.
- Wang, M., Yang, C., Jia, L. and Yu, K. 2014. Effect of *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* on the fermentation characteristics and aerobic stability of whip grass silage in laboratory silos. **Japanese Journal of Grassland Science** 60: 233-239.
- Zhang, Q., Yu, Z. and Wang, X. 2015. Isolating and evaluating lactic acid bacteria strains with or without sucrose for effectiveness of silage fermentation. **Grassland science** 61(3): 167-176.

Research Article

ผลของสารประกอบแคลเซียมบางชนิดและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช
ต่อคุณภาพผลมะเดื่อฝรั่ง พันธุ์แบล็คจีโน่

Effects of Some Calcium Compounds and Plant Growth Regulators
on the Fruit Quality of *Ficus carica* L. cv. Black Genoa

รวีพล ต่ายคง^{a*}, ไชยยา วงศ์สาสุข^b, วรากร รามะวุธ^a และ ณัฐทวี มาบางครุ^a

Rawipon Taikhong^{a*}, Chaiya Wongsasuk^b, Warakorn Rammawut^a and Natthawee Mabangkhu^a

^a สถานีเกษตรหลวงปางดะ อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ 50250

^a The Royal Agricultural Station Pang Da, Samoeng, Chiangmai 50250, Thailand.

^b คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100

^b Faculty of Agricultural Technology, Lampang Rajabhat University, Maung, Lampang 52100, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-14

Revised: 2024-08-22

Accepted: 2024-09-02

Keywords:

fig;
fruit qualities;
calcium nitrate;
calcium chloride;
plant growth regulator

The objective of this experimental was to study the effects of certain calcium compounds and plant growth regulators on the quality of fig fruit. The experiment was conducted at the Royal Agricultural Station Pang Da, Chiang Mai Thailand. A completely randomized design (CRD) with a 3×4 factorial arrangement was used, with treatments applied by spraying the fruits at 7 weeks after fruiting. Two types of calcium compounds (Factor 1) were used: Ca(NO₃)₂ at 200 mg/L and CaCl₂ at 200 mg/L. Three types of plant growth regulators (Factor 2) were used: GA₃ at 50 mg/L, NAA at 50 mg/L, and CPPU at 10 mg/L. The result showed that spraying with 0 mg/L of calcium resulted in the highest total soluble solids (TSS) and TSS/TA ratio, at 16.20 °Brix and 111.61, respectively. For the plant growth regulator factor, fruits sprayed with CPPU had the greatest fruit diameter and fruit weight, at 48.42 cm and 62.51 g/fruit, respectively. On the other hand, spraying with GA₃ resulted in the highest TSS, at 16.63 °Brix. The combination of Ca(NO₃)₂ at 200 mg/L with CPPU at 10 mg/L produced better fruit quality compared to the control.

© 2025 Taikhong, R., Wongsasuk, C., Rammawut, W. and Mabangkhu, N. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: pangda.rpf@gmail.com

Cite this article as:

Taikhong, R., Wongsasuk, C., Rammawut, W. and Mabangkhu, N. 2025. Effects of Some Calcium Compound and Plant Growth Regulators on Fruit Qualities of *Ficus carica* L. cv. Black Genoa. *Recent Science and Technology* 17(3): 261838.

บทคัดย่อ

การศึกษาทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของสารประกอบแคลเซียมบางชนิดและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อคุณภาพของผลมะเดื่อฝรั่ง ทำการทดลองที่สถานีเกษตรหลวงปางดะ อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ 3×4 factorial in CRD ประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด (ปัจจัยที่ 1) ได้แก่ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 200 mg/l และ CaCl_2 200 mg/l และสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช 3 ชนิด (ปัจจัยที่ 2) ได้แก่ GA_3 50 mg/l NAA 50 mg/l และ CPPU 10 mg/l ฉีดพ่นผลมะเดื่อฝรั่งมีอายุ 7 สัปดาห์ หลังการติดผล พบว่า ในด้านปัจจัยสารประกอบแคลเซียม การไม่ใช้สารประกอบแคลเซียมทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และอัตราส่วนของของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้มากที่สุดที่ 16.20 ปริกซ์ และ 111.61 ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 95% สำหรับปัจจัยด้านสารควบคุมการเจริญเติบโต พบว่า การใช้ CPPU ทำให้มีค่าความกว้างผลและน้ำหนักสดมากที่สุดที่ 48.42 ซม. และ 62.51 กรัม ตามลำดับ ส่วนการใช้ GA_3 ทำให้มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มากที่สุดที่ 16.63 ปริกซ์ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 95 และ 99% ตามลำดับ จากการทดลองเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมกัน พบว่า การฉีดพ่นด้วยสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 200 mg/l ร่วมกับ CPPU 10 mg/l ทำให้มีค่าแนวโน้มที่ดีขึ้นในด้านคุณภาพ ความกว้างผล ความยาวผล น้ำหนักสดและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

คำสำคัญ: มะเดื่อฝรั่ง, คุณภาพผล, แคลเซียมไนเตรด, แคลเซียมคลอไรด์, สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช

1. บทนำ

มะเดื่อฝรั่ง (Fig) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ficus carica* L. อยู่ในวงศ์ Moraceae เป็นพืชกึ่งร้อนเขตร้อนที่พบมากเป็นผลไม้ที่รู้จักในทวีปยุโรป เช่น ประเทศตุรกี กรีซ อิตาลี สเปน ใน พ.ศ. 2566 พบว่ามีการปลูกมะเดื่อฝรั่งทั่วโลกประมาณ 1.88 ล้านไร่ ซึ่งสามารถผลิตได้ประมาณ 1.1 ล้านตันต่อปี โดยปลูกเป็นการค้าในที่ราบลุ่มน้ำแถบเมดิเตอร์เรเนียน ซึ่งเป็นที่นิยมรับประทานได้ทั้งผลสดและแห้ง มะเดื่อฝรั่งเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ผลโตใบ ใบเป็นใบเดี่ยวค่อนข้างหนา เป็นพืชที่ชอบแสงแดดตลอดทั้งวัน มะเดื่อฝรั่งมีถิ่นกำเนิดและแพร่กระจายในประเทศเขตร้อนในทุกทวีป โดยเฉพาะประเทศในแถบทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย และเวียดนาม เนื่องจากมีสภาพอากาศร้อนชื้นจึงทำให้ต้นมะเดื่อฝรั่งติดผลได้ตลอดทั้งปี อีกทั้งยังเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและยังสามารถสร้างผลตอบแทนให้แก่เกษตรกรได้ในระดับที่ดี (Posawang, 2020) มะเดื่อฝรั่งเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานทั้งผลสดและแห้ง อีกทั้งสามารถนำไปแปรรูปได้หลายอย่าง เป็นไม้ผลชนิดหนึ่งที่มีมูลนิธิโครงการหลวงมีการศึกษาวิจัย ทดสอบ เพื่อใช้ส่งเสริมแก่เกษตรกรบนพื้นที่สูง

สำหรับการปลูกมะเดื่อฝรั่งในประเทศไทย พบว่าพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้น เพราะมะเดื่อฝรั่งเป็นที่รู้จักมากขึ้น ทั้งนี้หน่วยงานภาครัฐให้การสนับสนุนความรู้แก่เกษตรกรและผู้สนใจ เช่น มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมูลนิธิโครงการหลวง ถือเป็นหนึ่งในโครงการสวนพระองค์ ซึ่งมีการทดสอบ วิจัยพืชที่มีศักยภาพที่สามารถปลูกบนพื้นที่สูงได้ จากการทดสอบดังกล่าว พบว่า มะเดื่อฝรั่งเป็นพืชที่มีศักยภาพในการผลิต จึงมีการศึกษาในด้านสายพันธุ์ และสามารถพัฒนาสู่การส่งเสริมเกษตรกรบนพื้นที่สูงได้ (Pimpila et al., 2020; Posawang, 2020) ดังนั้น จึงมีการปลูกมะเดื่อฝรั่งเพิ่มมากขึ้นและกว้างขวางในประเทศไทย โดยมะเดื่อฝรั่งเป็นพืชที่สามารถให้ผลผลิตค่อนข้างสูง ติดผลดกในทุกข้อใบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

ปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น อายุของต้น การตัดแต่งกิ่ง และการจัดทรงต้น เป็นต้น โดยมะเดื่อฝรั่ง 1 ต้น สามารถให้ผลผลิตในรอบการผลิตได้ตั้งแต่ 1-3 กิโลกรัมต่อต้น

ในด้านการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวตามหลักการของมูลนิธิโครงการหลวง เกษตรกรจะทำการตัดแต่งกิ่งใหม่เมื่อหมดรุ่นของผลผลิต เพื่อกระตุ้นให้แตกกิ่งใหม่ เนื่องจากมะเดื่อฝรั่งจะไม่ออกดอกซ้ำในบริเวณข้อปล้องเดิม และเมื่อมีการติดผลจะสามารถเริ่มเก็บผลผลิตได้ เมื่อมีการเปลี่ยนสีของผลจากสีเขียวเป็นสีแดงดำ ซึ่งมะเดื่อฝรั่งเป็นไม้ผลที่เมื่อสุกแล้วมีผิวบางและอ่อนนุ่ม โดยมักก่อให้เกิดปัญหาในด้านการขนส่งและอายุการเก็บรักษาที่สั้นลงจากการศึกษาข้อมูล Panchai et al. (2021) พบว่า มีการใช้สารประกอบแคลเซียมและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชบางชนิดที่สามารถช่วยเพิ่มคุณภาพของผลมะเดื่อฝรั่งให้ดีขึ้น จึงทำให้เกิดแนวคิดในการทำงานครั้งนี้

จากการรายงานของ Panchai et al. (2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชที่มีผลต่อคุณภาพผลมะเดื่อฝรั่ง โดยพ่นสาร 4 ชนิด ทำการพ่นผลมะเดื่อฝรั่งอายุ 7 สัปดาห์ ได้แก่ น้ำเปล่า CPPU 20 mg/l Brassinosteroids 1 mg/l และ 3,5,6-TPA 30 mg/l ทำการวิเคราะห์คุณภาพผลหลังการเก็บเกี่ยว พบว่า Brassinosteroids ทำให้น้ำหนักผลมากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยมีน้ำหนักผล 68.13 กรัม มีความกว้างผลเท่ากับ 52.38 มิลลิเมตร และความยาวผลเท่ากับ 56.10 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังมีผลให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มีค่า 17.12 องศาปริกซ์ ปริมาณแอนโทไซยานิน 19.46 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักสด และปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 936.26 ไมโครกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัม น้ำหนักสด ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกรรมวิธี ส่วนการใช้ 3,5,6-TPA ทำให้มีความแน่นเนื้อผลสูงที่สุดเท่ากับ 85.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 123.83 และ

เช่นเดียวกับ Na Chiangmai and Boonplod (2019) ที่ทำการศึกษาการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในมัลเบอร์รี่ โดยระบุว่าการใช้สาร 3,5,6-TPA ในมัลเบอร์รี่ทำให้มีค่าของแข็งละลายน้ำมากที่สุด ทางด้าน Peawdang and Naphrom (2018) ได้ศึกษาผลของสารประกอบแคลเซียมและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อคุณภาพผลสตรอว์เบอร์รี่พันธุ์พระราชทาน 80 โดยชนิดสารประกอบแคลเซียม 3 ชนิด ได้แก่ CaCl_2 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ และ Ca^{2+} chelated และชนิดสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช 3 ชนิด ได้แก่ GA_3 CPPU และ NAA พบว่า การพ่น Ca^{2+} chelated ร่วมกับ NAA ทำให้น้ำหนักและขนาดของผลมากกว่ากรรมวิธีควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีแนวโน้มของน้ำหนักผล ขนาดผลมากกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ และการพ่นสารประกอบแคลเซียมทุกชนิดร่วมกับ CPPU และ NAA ทำให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มากกว่ากรรมวิธีควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ

จากปัญหาด้านคุณภาพผล ซึ่งผิวผลมีความอ่อนนุ่มทำให้เกิดความเสียหายในกระบวนการขนส่ง จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลประกอบแคลเซียมบางชนิดและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อคุณภาพผลมะเดื่อฝรั่ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการผลิตมะเดื่อฝรั่งต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขอบเขตการดำเนินการวิจัย

ทำการทดสอบภายในพื้นที่แปลงรวบรวมพันธุ์มะเดื่อฝรั่งของสถานีเกษตรหลวงปางดะ เลขที่ 192 หมู่ 10 ตำบลสะเมิงใต้ อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 690 เมตร โดยทดสอบในมะเดื่อฝรั่ง พันธุ์แบล็คจันัว และใช้สารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด ได้แก่ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ และ CaCl_2 และสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช 3 ชนิด ได้แก่ GA_3 NAA และ CPPU

2.2 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) แบบ 3×4 Factorial in CRD โดยมี 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 สารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด และปัจจัยที่ 2 ชนิดของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ ๆ ละ 3 ผล โดยมีกรรมวิธีดังต่อไปนี้

กรรมวิธีที่ 1 ไม่ฉีดพ่นสารประกอบแคลเซียม ไม่ผสมสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช

กรรมวิธีที่ 2 ไม่ฉีดพ่นสารประกอบแคลเซียม ผสม CPPU 10 mg/l

กรรมวิธีที่ 3 ไม่ฉีดพ่นสารประกอบแคลเซียม ผสม GA_3 50 mg/l

กรรมวิธีที่ 4 ไม่ฉีดพ่นสารประกอบแคลเซียม ผสม NAA 50 mg/l

กรรมวิธีที่ 5 ฉีดพ่นสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 200 mg/l ไม่ผสมสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช

กรรมวิธีที่ 6 ฉีดพ่นสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 200 mg/l ผสม CPPU 10 mg/l

กรรมวิธีที่ 7 ฉีดพ่นสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 200 mg/l ผสม GA_3 50 mg/l

กรรมวิธีที่ 8 ฉีดพ่นสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 200 mg/l ผสม NAA 50 mg/l

กรรมวิธีที่ 9 ฉีดพ่นสารละลาย CaCl_2 200 mg/l ไม่ผสมสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช

กรรมวิธีที่ 10 ฉีดพ่นสารละลาย CaCl_2 200 mg/l ผสม CPPU 10 mg/l

กรรมวิธีที่ 11 ฉีดพ่นสารละลาย CaCl_2 200 mg/l ผสม GA_3 50 mg/l

กรรมวิธีที่ 12 ฉีดพ่นสารละลาย CaCl_2 200 mg/l ผสม NAA 50 mg/l

2.3 การคัดเลือกผลมะเดื่อฝรั่ง

ทำการคัดเลือกผลมะเดื่อฝรั่งที่มีอายุ 7 สัปดาห์ หลังติดผล เนื่องจากระยะนี้เป็นช่วงที่ต้องการสารควบคุมการเจริญเติบโตที่เพียงพอต่อการขยายขนาดผลที่อยู่ในระยะ Log phase โดยมีความกว้างและความยาวผลที่ 27 ± 2 และ 49 ± 2 มิลลิเมตรตามลำดับตามวิธีการของ Panchai *et al.* (2021) จากนั้นฉีดพ่นด้วยสารละลาย จำนวน 12 ชนิด ปริมาตร 4-5 มิลลิลิตร/ผล โดยทำการเตรียมสารละลายเข้มข้น จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายจากสารละลายเข้มข้นตามสมการ

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

V_1 คือ ปริมาตรของสารตั้งต้น

C_2 คือ ความเข้มข้นของสารที่ต้องการ

V_2 คือ ปริมาตรของสารที่ต้องการ

2.4 การเก็บผลมะเดื่อฝรั่ง

ผลมะเดื่อฝรั่งอายุ 12 สัปดาห์ โดยผลจะเริ่มมีการเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นม่วงแดง ประมาณร้อยละ 60-70 ทำการเก็บผลมะเดื่อฝรั่งเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลต่อไป

2.5 การเก็บข้อมูลผลมะเดื่อฝรั่ง

ทำการเก็บข้อมูลผลมะเดื่อฝรั่ง ได้แก่ น้ำหนักสด (กรัม/ผล) น้ำหนักแห้ง (กรัม/ผล) ความกว้างผล (มิลลิเมตร) ความยาวผล (มิลลิเมตร) ปริมาณของของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS ;°Brix) ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (TA ;%) อัตราส่วนของ TSS/TA และอายุการเก็บรักษา (วัน)

ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้แสดงเป็นปริมาณกรดซิตริก โดยคำนวณจากสมการ

$$\%TA = \frac{N \text{ of NaOH} \times \text{ml. of NaOH} \times \text{mea.wt.}}{\text{ml. of sample}} \times 100$$

เมื่อ %TA คือ ปริมาณกรดทั้งหมด
N of NaOH คือ ความเข้มข้นของ NaOH
ml. of NaOH คือ ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้
mea.wt คือ ค่าคงที่ของกรด
ml. of sample คือ ปริมาตรของน้ำคั้นตัวอย่าง

เมื่อเก็บผลมะเดื่อฝรั่งมาแล้ว วางไว้ใน Petri dish โดยมีอุณหภูมิ 28 ± 3 องศาเซลเซียส สิ้นสุดการเก็บข้อมูลเมื่อเห็นว่าผลมะเดื่อฝรั่งมีของเหลวไหลออกจากผล หรือผิวผลเหี่ยวมากกว่าร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับผลปกติ ซึ่งในระยะนี้จะไม่สามารถวางจำหน่ายต่อไปได้



Figure 1 Harvesting process of fig fruits at the Royal Agricultural Station Pang Da

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) คัดแยกความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ขนาดผล

ผลการศึกษาขนาดผลมะเดื่อฝรั่ง พบว่า เมื่อมะเดื่อฝรั่งสุก ปัจจัยด้านสารควบคุมการเจริญเติบโตส่งผลต่อความกว้างผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยกรรมวิธีที่ผสม CPPU 10 mg/l ทำให้ค่าความกว้างผลเฉลี่ยมากที่สุดที่ 48.42 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาารวมกันทั้ง 2 ปัจจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยความกว้างผลและความยาวผลมีแนวโน้มที่มากที่สุดในการรวมวิธีที่ผสม CPPU 10 mg/l (Table 1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูลในแต่ละสัปดาห์หลังจากการฉีดพ่นสารละลาย พบว่า แนวโน้มที่ทำให้มีค่าความกว้างและความยาวผลเพิ่มเร็วที่สุดในช่วงสัปดาห์ที่ 1-3 หลังการฉีดพ่น ทั้งนี้เนื่องจากสาร CPPU เป็นสารในกลุ่ม Cytokinin ซึ่งเป็นกลุ่มที่ควบคุมการแบ่งเซลล์ การขยายตัวของเซลล์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับ Quan Yu *et al.* (2001) ที่ระบุว่า CPPU สามารถปรับปรุงการติดผลและการยืดขยายของผล และทำให้มีขนาดของผลที่ใหญ่มากขึ้น อีกทั้งทำให้เซลล์มีขนาดที่ใหญ่กว่ากรรมวิธีควบคุม รวมไปถึงช่วยให้มีการพัฒนาของผลที่ดีมากยิ่งขึ้น (Lewis *et al.*, 1996)

Table 1 Width, length, fresh and dry weight of fig fruits.

Factors	Width (mm) ¹	Length (mm) ¹	Fresh weight (g/fruit) ¹	Dry weight (g/fruit) ¹
Factor A, Calcium compound				
-Ca 0 mg/l	45.44	60.88	54.49	8.40
+Ca(NO ₃) ₂ 200 mg/l	46.60	60.55	55.67	7.06
+CaCl ₂ 200 mg/l	45.80	58.00	49.77	7.24
F-test	ns	ns	ns	ns
Factor B, Plant growth regulators				
-PGRs (without PGRs)	46.58 AB	58.99	52.84 B	7.26
+CPPU 10 mg/l	48.42 A	61.23	62.51 A	7.81
+GA ₃ 50 mg/l	43.80 B	60.79	47.52 B	7.49
+NAA 50 mg/l	44.98 AB	58.22	50.37 B	7.72
F-test	**	ns	**	ns

Table 1 (Continuous)

Factors	Width (mm) ¹	Length (mm) ¹	Fresh weight (g/fruit) ¹	Dry weight (g/fruit) ¹
Factor A×B (12 treatment combinations)				
-Ca -PGRs	43.76 BC	59.30 ABC	56.16 ABCD	8.91
-Ca +CPPU	47.53 AB	66.37 A	58.18 ABC	7.53
-Ca +GA ₃	46.37 ABC	58.85 ABC	54.95 BCD	7.92
-Ca +NAA	44.09 BC	59.01 ABC	48.67 BCD	9.23
+Ca(NO ₃) ₂ -PGRs	50.67 A	66.49 A	60.41 AB	5.45
+Ca(NO ₃) ₂ +CPPU	47.22 AB	59.30 ABC	70.66 A	9.17
+Ca(NO ₃) ₂ +GA ₃	42.50 C	60.49 AB	44.65 CD	7.32
+Ca(NO ₃) ₂ +NAA	46.01 ABC	55.90 BC	46.93 BCD	6.30
+CaCl ₂ -PGRs	45.32 BC	51.18 C	41.96 D	7.42
+CaCl ₂ +CPPU	50.51 A	58.03 ABC	58.69 ABC	6.71
+CaCl ₂ +GA ₃	42.51 C	63.02 AB	42.95 D	7.22
+CaCl ₂ +NAA	44.85 BC	59.75 ABC	55.50 ABCD	7.61
F-test	**	**	**	ns
CV (%)	10.53	12.04	22.02	22.16

¹ Means within the same column followed by the same letters indicate no significant difference among treatments.

** Indicates significant difference at the 0.01 probability level.

ns not significant

3.2 น้ำหนักผล

น้ำหนักผลหลังการเก็บเกี่ยว พบว่า ปัจจัยของสารควบคุมการเจริญเติบโตที่ใช้สาร CPPU ทำให้มีค่าน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุดที่ 62.51 กรัม/ผล (Table 1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) และเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาาร่วมกันพบว่าการใช้ Ca(NO₃)₂ ร่วมกับ CPPU ทำให้มีน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุดที่ 70.66 กรัมต่อผล ($p < 0.01$) (Table 1) ทั้งนี้จากคุณสมบัติของสาร CPPU ทำให้ขนาดผลใหญ่ขึ้น นั่นจึงทำให้น้ำหนักผลแปรผันตรงกับขนาดของผลไปด้วย ตามรายงานของ Quan Yu *et al.* (2001) โดยมีความสอดคล้องกับ Kim *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาปริมาณของสาร CPPU ในกีวี พบว่า การใช้ที่ความเข้มข้น 5-10 mg/l สามารถเพิ่มน้ำหนักของกีวีได้มากขึ้น และเมื่อนำตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง พบว่า ค่าน้ำหนักแห้งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในทุกปัจจัย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ามีจำนวนเซลล์ที่เท่ากัน แต่ปริมาณน้ำในเซลล์ไม่เท่ากัน เนื่องจากคุณสมบัติของสารในกลุ่ม Gibberellic acid และ Cytokinin ทำให้เซลล์ยืดขยายส่งผลให้มีความชื้นหรือปริมาณน้ำในเซลล์สูง เมื่ออบแห้งไล่ความชื้นจึงทำให้ได้ค่าที่ไม่แตกต่างกัน

3.3 ปริมาณของของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้

ปริมาณของของแข็งที่ละลายน้ำได้ ในปัจจัยสารเคลือบ พบว่า การไม่ใช้สารเคลือบทำให้มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดที่ 16.20 °Brix ปัจจัยสารควบคุมการเจริญเติบโต พบว่า การใช้ GA₃ ทำให้มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดที่ 16.63 °Brix (Table 2) และเมื่อพิจารณาาร่วมกัน พบว่าการไม่พ่นสารเคลือบร่วมกับการใช้ NAA ทำให้มีค่าเฉลี่ยของของแข็งที่ละลายน้ำมากที่สุดที่ 18.34 °Brix เช่นเดียวกับ Peawdang and Naphrom (2018) ทำการฉีดพ่นสาร CPPU และ NAA ในสตรอว์เบอร์รี พบว่า ทำให้มีค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้มากกว่ากรรมวิธีควบคุมที่พ่นด้วยน้ำเปล่าและมีแนวโน้มที่ทำให้มีค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้มากกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ และสอดคล้องกับ Mahajan (2022) พบว่า ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ในมะม่วงที่ฉีดพ่นด้วย NAA มีแนวโน้มมากกว่าการฉีดพ่นด้วย GA₃ ตลอดจน ระบุว่าสารในกลุ่ม Auxin มีคุณสมบัติในการเร่งการเจริญเติบโต เพิ่มการขยายขนาดของเซลล์ ในด้านของของแข็งที่ละลายน้ำได้ พบว่า การใช้สารกลุ่ม Auxin ทำให้มีค่าของของแข็งที่ละลายน้ำได้มากที่สุด ซึ่งสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มออกซิน ทำให้เกิดการขยายตัวไปพร้อมกับการสร้างและสะสมน้ำตาลในเซลล์ (Singh *et al.*, 2005)

ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.12-0.23% ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ทั้งนี้จากรายงานของ Panchaiand and Boonplod (2020) ได้ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงของกรดในมะเดื่อฝรั่งที่ปลูกในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ไว้ว่า ในช่วงของการพัฒนาของผลมะเดื่อฝรั่งจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในช่วงการพัฒนาของผลและลดลงในช่วงการสุกของผล โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0.23-0.30% ทั้งนี้เนื่องจากกรดอินทรีย์ภายในผลจะถูกใช้ในกระบวนการหายใจและการย่อยสลายของเอมไซม์ (Hatami *et al.*, 2012) และเมื่อดูปริมาณของกรด พบว่า ปริมาณกรดทั้งหมดมีมากขึ้นเมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโต ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสาร NAA และ CPPU เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่ช่วยชะลอกระบวนการสุกของผลไม้ จึงส่งผลให้ปริมาณกรดภายในมีการเสื่อมสลายที่ช้ากว่าปกติ (Boonklam *et al.*, 2019)

3.4 อายุการเก็บรักษา

อายุการเก็บรักษาเมื่อวางไว้ใน Petri dish โดยมีอุณหภูมิ 28±3 องศาเซลเซียส พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (Table 2) แต่มีแนวโน้มอายุการเก็บรักษาที่นานเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ร่วมกับ CPPU อาจเป็นเพราะว่าพืชสามารถนำเอาสารประกอบแคลเซียม (Ca^{2+}) และไนเตรต (NO_3^-) ไปใช้ ซึ่งสารดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบภายในเซลล์ที่ใช้ในกระบวนการแบ่งเซลล์และการสังเคราะห์แสง และแนวโน้มอายุการเก็บรักษามีค่าลดลงและน้อยที่สุดที่การใช้ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ร่วมกับ GA_3 ทั้งนี้อาจเกิดมาจากอิทธิพลของสารกลุ่ม Gibberellic Acid ที่ทำให้เซลล์ยืดขยายทำให้มีความชื้นในเซลล์สูง อีกทั้งสารประกอบไนเตรตทำให้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ลดลง โดยส่งผลให้มีอัตราการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุได้ดีกว่า (Chaiyarak and Ratanacherdchai, 2022) ซึ่งทำให้เกิดการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ และ Rousk and Bååth (2007) ที่ระบุว่า เมื่อค่า C/N ratio ลดลงทำให้เกิดการเข้าทำลายของเชื้อราได้เร็วขึ้น ซึ่งตรงกับผลการทดลองนี้ พบว่า กลุ่มการใช้ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ร่วมกับ GA_3 หรือการใช้ GA_3 เพียงอย่างเดียว มักมีอาการเน่าเสียที่มีลักษณะของเหลวไหลออกมาจากผล ซึ่งเมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่นจะพบเพียงการเหี่ยวของผลเท่านั้น และเมื่อหา

ค่าความชื้นในผลมะเดื่อฝรั่งโดยการคำนวณ พบว่า ค่าปริมาณความชื้นของผลมะเดื่อฝรั่งมีค่าระหว่างร้อยละ 80-90 ซึ่งจากการศึกษาของ Bowonsupakijkul (2021) พบว่า ค่าความชื้นมีความสัมพันธ์กับค่า Water Activity (aw) ซึ่งค่า aw จะมากขึ้นเมื่อค่าความชื้นมีค่ามากขึ้น โดยค่า aw จะเป็นตัวกำหนดการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ โดยค่า aw ที่มากกว่า 0.80 จะทำให้เกิดการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี ทั้งนี้จากข้อมูลพบว่า ผักและผลไม้มีค่า aw มากกว่า 0.90

มะเดื่อฝรั่งเป็นไม้ผลที่มีอัตราการหายใจสูง จัดเป็นประเภท Climacteric fruit ซึ่งมีการสร้างเอทิลีนสูง (Sozzi *et al.*, 2005; Kou *et al.*, 2021) เมื่อทำการเก็บเกี่ยวแล้วควรเก็บไว้ในอุณหภูมิ 0-4 องศาเซลเซียส ซึ่งการเก็บในที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถช่วยชะลอกระบวนการหายใจและอัตราการสร้างเอทิลีนให้ช้าลง และควรมีวัสดุที่ช่วยดูดซับเอทิลีนอยู่ภายในตู้เก็บด้วย (Poolap, 2023) จากการทดลอง ข้อมูลด้านอายุการเก็บรักษาสั้นกว่าปกติ เป็นเพราะอุณหภูมิในการเก็บรักษามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงทำให้เกิดการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ได้เร็วกว่าปกติ

อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ ได้ค้นคว้าหาข้อมูลในด้านความเป็นพิษของสารแล้ว พบว่า ความเป็นพิษและปริมาณตกค้างของสารที่ใช้ในส่วนของการแคลเซียมไนเตรต จาก Supelco (2023) พบว่าแคลเซียมไนเตรตเป็นสารที่พิจารณาแล้วว่าไม่มีองค์ประกอบเป็นอันตราย และสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ที่ระดับ 1,000 mg/l หรือมากกว่า ซึ่งความเข้มข้นที่ใช้เพียง 200 mg/l โดยมีค่าน้อยกว่าค่ากำหนดประมาณ 5 เท่า และมีค่า LD_{50} ของสาร $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ อยู่ที่ 3,900 mg/kg (Nasi, 2013) ในส่วนของสาร CPPU จากการศึกษาค่าครึ่งชีวิต พบว่ามีค่าครึ่งชีวิตที่ 5 วัน และมีค่า LOQ และ PHI ที่ 33 วัน ที่จะไม่สามารถตรวจจับได้ด้วยวิธี HPLC และ CGMS/MS อีกทั้งจากการศึกษาความเป็นพิษในหนูตั้งครบก พบว่า ระดับความเข้มข้นที่ให้ในหนูทดลองในระดับ 0-100 ppm/วัน ติดต่อกัน 4 สัปดาห์ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบทางคลินิก ยกเว้นที่ระดับความเข้มข้นที่มากกว่า 300 ppm/วันเท่านั้น (Ugare *et al.*, 2013) โดยมีค่า LD_{50} ของสาร CPPU อยู่ที่ระหว่าง 1,568-2,787 mg/kg (Gold Biotechnology, 2022)

Table 2 Total soluble solid (TSS), total titratable acidity (TA), TSS/TA and shelf life of fig fruits.

Factors	TSS ("Brix") ¹	TA (%) ¹	TSS/TA ¹	Shelf life (day) ¹
Factor A, Calcium compound				
-Ca 0 mg/l	16.20 A	0.15	111.61 A	2.21
+Ca(NO ₃) ₂ 200 mg/l	13.83 B	0.19	80.27 B	2.13
+CaCl ₂ 200 mg/l	14.08 B	0.16	102.43 AB	2.08
F-test	*	ns	*	ns

Table 2 (Continuous)

Factors	TSS (°Brix) ¹	TA (%) ¹	TSS/TA ¹	Shelf life (day) ¹
Factor B, Plant growth regulators				
-PGRs (without PGRs)	13.94 B	0.16	108.52	2.08
+CPPU 10 mg/l	11.16 B	0.18	77.68	2.58
+GA ₃ 50 mg/l	16.63 A	0.19	103.82	1.83
+NAA 50 mg/l	15.09 AB	0.15	102.4	2.00
F-test	**	ns	ns	ns
Factor A×B (12 treatment combinations)				
-Ca -PGRs	15.94 ABC	0.15	117.61	2.00
-Ca +CPPU	12.93 BC	0.15	92.70	2.75
-Ca +GA ₃	17.61 AB	0.15	128.28	2.08
-Ca +NAA	18.34 A	0.17	107.87	2.00
+Ca(NO ₃) ₂ -PGRs	10.77 C	0.17	67.55	2.25
+Ca(NO ₃) ₂ +CPPU	15.15 ABC	0.23	65.66	2.42
+Ca(NO ₃) ₂ +GA ₃	17.00 AB	0.23	97.89	1.42
+Ca(NO ₃) ₂ +NAA	12.39 C	0.15	90.00	2.08
+CaCl ₂ -PGRs	15.09 ABC	0.12	140.41	2.00
+CaCl ₂ +CPPU	11.40 C	0.15	74.67	2.25
+CaCl ₂ +GA ₃	15.29 ABC	0.22	85.31	2.00
+CaCl ₂ +NAA	14.53 ABC	0.16	109.34	2.08
F-test	**	ns	ns	ns
CV (%)	17.12	33.01	35.5	33.39

¹ Means within the same column followed by the same letters indicate no significant difference among treatments.

* Significantly different at 0.05 probability level

** Significantly different at 0.01 probability level

ns not significant



Figure 2 Fig fruits at 12 weeks after fruiting

Tr. 1-12 (1: -Ca-PGRs 2: -Ca+CPPU 3: -Ca+GA₃ 4: -Ca+NAA 5: +Ca(NO₃)₂-PGRs 6: +Ca(NO₃)₂+CPPU
7: +Ca(NO₃)₂+GA₃ 8: +Ca(NO₃)₂+NAA 9: +CaCl₂-PGRs 10: +CaCl₂+CPPU 11: +CaCl₂+GA₃ and 12: +CaCl₂+NAA)

Research Article

ผลของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินต่อการเจริญเติบโตของมิซุনা (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) ในระบบไฮโดรโปนิิกส์

Effect of Vermicompost Liquid on Growth of Mizuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) in a Hydroponic System

รุ่งโรจน์ ไกรสิทธิ์พานิชย์^{a,*} อาห์รุ ตันโซ^{b,c,d} วสิน เจริญตันธนกุล^e ศุภธิดา อำทอง^d และ วรภัสร์ นนท์ทิ^b
Rungroj Kraisittipanit^{a,*}, Arnat Tancho^{b,c,d}, Wasin Charerntantanakul^e, Suphathida Aumtong^d
and Waraphas Nontati^b

^a ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพพรีคลินิก คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพมหานคร เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10170

^a Health Science Preclinic Center, Faculty of Medicine, Bangkokthonburi University, Thawi Watthana, Bangkok 10170, Thailand.

^b ศูนย์วิจัยและพัฒนาเกษตรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

^b Natural Agriculture Research and Development Center, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290, Thailand.

^c ภาควิชาชีววิทยา สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

^c Fellow Member of the Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Dusit, Bangkok 10300, Thailand.

^d คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

^d Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290, Thailand.

^e สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

^e Department of Biotechnology, Faculty of Science, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-25

Revised: 2024-08-09

Accepted: 2024-09-02

Keywords:

vermicomposting liquid;

hydroponic;

Perionyx sp.1;

IAA;

GA3;

Mizuna

Vermicomposting liquid contains microorganisms and plant hormones that can enhance plant growth. This research aimed to examine the amount of IAA and GA3 in vermicomposting liquid and in selected microorganisms isolated from it. The effect of vermicomposting liquid on the growth of Mizuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) in a hydroponic system was also investigated. The study revealed the highest amount of IAA (123.31 µg/ml) and GA3 (123.78 µg/ml) were produced by *Penicillium menonorum* and *P. toxicarium*, respectively, while the vermicomposting liquid contained 0.09 µg/ml of IAA and 0.56 µg/ml of GA3. Spraying vermicomposting liquid on Mizuna plants grown under hydroponics resulted in greater plant height, leaf number, leaf fresh weight, left width and root length compared to the control. The leaf number of vermicomposting liquid treated plant was higher than that of 25 ppm and 250 ppm synthetic IAA as well as 50 ppm and 500 ppm GA3. The study concluded that vermicomposting liquid can effectively promote the growth of Mizuna.

© 2025 Kraisittipanit, R., Tancho, A., Charemtantanakul, W., Aumtong, S. and Nontati, W. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: rungroj.kra@bkkthon.ac.th

Cite this article as:

Kraisittipanit, R., Tancho, A., Charemtantanakul, W., Aumtong, S. and Nontati, W. 2025. Effect of Vermicompost Liquid on Growth of Mizuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) in a Hydroponic System. *Recent Science and Technology* 17(3): 261967.

บทคัดย่อ

น้ำหมักมูลไส้เดือนดินประกอบด้วยจุลินทรีย์และฮอร์โมนพืชบางชนิดเป็นส่วนประกอบและสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้หลายชนิด งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณฮอร์โมน IAA และ GA3 จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดินและจากจุลินทรีย์บางชนิดที่คัดแยกได้จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน รวมถึงศึกษาผลของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินต่อการเจริญเติบโตของมิชุนา (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) ในระบบไฮโดรโปนิกส์ ผลการศึกษาพบว่า เชื้อรา *Penicillium menonorum* ผลิต IAA ในปริมาณมากที่สุด (123.31 µg/ml) และเชื้อรา *P. toxicarium* ผลิต GA3 ในปริมาณมากที่สุด (123.78 µg/ml) ส่วนในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมีฮอร์โมน IAA และ GA3 เท่ากับ 0.09 µg/ml และ 0.56 µg/ml ตามลำดับ เมื่อนำน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมาสเปรย์บนต้นมิชุนาที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ พบว่า น้ำหมักมูลไส้เดือนดินสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของต้นมิชุนาดีกว่าชุดควบคุม โดยเพิ่มความสูง จำนวนใบ น้ำหนักสด ความกว้างทรงพุ่ม รวมถึงเพิ่มความยาวราก เมื่อเปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตกับฮอร์โมน IAA และ GA3 สังเคราะห์ พบว่า น้ำหมักมูลไส้เดือนดินส่งผลให้ต้นมิชุนามีจำนวนใบมากกว่า IAA ความเข้มข้น 25ppm, 250 ppm และ GA3 ความเข้มข้น 50 ppm และ 500 ppm ผลการศึกษานี้สรุปได้ว่า น้ำหมักมูลไส้เดือนดินสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นมิชุนาได้

คำสำคัญ: น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน, ไฮโดรโปนิกส์, *Perionyx* sp.1, IAA, GA3, มิชุนา

1. บทนำ

ไส้เดือนดินเป็นสัตว์ที่มีความสำคัญกับการเกษตรทั่วโลก เนื่องจากช่วยปรับปรุงคุณภาพดินทั้งทางตรงและทางอ้อม สำหรับประเทศไทยมีการเพาะเลี้ยงไส้เดือนดินเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์ อาทิ สายพันธุ์ African Night Crawler (*Eudrilus eugeniae*) หรือ AF สายพันธุ์ซีตาแร่ (*Perionyx* sp.1) สายพันธุ์ไทเกอร์เป็นต้น ผลผลิตจากการกินขยะของไส้เดือนดินจะถ่ายเป็นมูลออกมาเรียกว่า ปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนดิน (vermicompost) ซึ่งมูลจะมีธาตุอาหารและจุลินทรีย์จำนวนมากที่มีประโยชน์ต่อพืช (Kraisittapanit and Charemtantanakul, 2018) ไส้เดือนดินบางสายพันธุ์ขณะที่กำจัดขยะแล้วเกิดมูล จะมีกระบวนการหมักต่อเนื่องจนได้ของเหลวที่ออกมาจากการขับถ่ายทางช่องเปิดรูทวาร ซึ่งจะไปรวมกับของเหลวที่เกิดจากเน่าสลายของพืชที่เป็นอาหาร กลายเป็นน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน (Vermicomposting liquid) (Tancho, 2009) โดย Arraktham *et al.* (2016) ได้ศึกษาคุณสมบัติของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินที่เก็บรักษาในเวลาที่แตกต่างกันพบว่า ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมมีจำนวนลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ตรงข้ามกับปริมาณสารอาหารจำพวกธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยฮอร์โมนพืชทั้ง indole acetic acid (IAA), gibberellic acid (GA3) และไซโทไคนิน (cytokinin) ก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาที่หมักนานขึ้น แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ไส้เดือนดินที่ถ่ายมูลออกมายังคงมีกิจกรรมเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ในที่สุดเมื่อระยะเวลาการหมักผ่านไปมากกว่า 6 เดือน นอกจากนี้มีการทดลองผลของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินในการเพิ่มผลผลิตของพืชหลายชนิด โดยสามารถกระตุ้นการออกช่อดอกของกัญชา กระตุ้นการออกดอกของฟิทุเนีย และเพิ่มผลผลิตของข้าวในนาข้าวและสลัดบางชนิด (Kongkaew, 2018) อย่างไรก็ตามยังมีความจำเป็นต้องศึกษาผลของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินในพืชเศรษฐกิจชนิดต่าง ๆ เช่น พืชผักตระกูลผักกาดหอมหรือผักสลัด ซึ่งหลายชนิดสามารถเจริญเติบโต

ได้ดีในสภาพอากาศค่อนข้างเย็น การใช้น้ำหมักมูลไส้เดือนดินที่ได้มาจากการหมักกากน้ำตาลได้มีรายงานไว้บ้างแล้วแต่เป็นการปลูกในดิน โดยน้ำหมักมูลไส้เดือนดินสามารถกระตุ้นและส่งเสริมให้กรีนโอ๊คเจริญเติบโตได้ดี เพิ่มน้ำหนักสด และขนาดของใบ ซึ่งมีทั้งใช้น้ำหมักมูลไส้เดือนดินเพียงอย่างเดียวหรือนำไปผสมกับน้ำหมักชนิดอื่น ๆ (Jitae and Noommesri, 2022) ผักสลัดนับได้ว่าเป็นพืชที่กลุ่มคนรักสุขภาพนิยมนำมารับประทาน โดยมีมิชุนา (Mizuna) ซึ่งมีถิ่นกำเนิดจากประเทศในเขตหนาวเป็นหนึ่งในพืชตระกูลสลัดที่น่าสนใจและกำลังเป็นที่นิยมอีกชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติเป็นที่ชื่นชอบของนักผู้บริโภคสายสุขภาพ เนื่องจากมีรสชาติ กลิ่น และเนื้อสัมผัสคล้ายกับการรับประทานวาซาบิ แต่ที่ผ่านมามีมิชุนามักประสบปัญหาคือ ต้องนำมาปลูกในพื้นที่ที่ค่อนข้างเย็นจึงจะเจริญเติบโตได้ดีและมีรสชาติที่ดี ทำให้ราคามิชุนาในตลาดมีราคาแพงโดยเฉพาะฤดูร้อนมักประสบปัญหาเกี่ยวกับต้นเหี่ยวและเติบโตช้าหรือตายไป (Soluch, 2023) ดังนั้นการศึกษากการปลูกมิชุนาในระบบไฮโดรโปนิกส์จะช่วยให้ควบคุมปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น แร่ธาตุ ได้ดี อีกทั้งมีสะดวกมากกว่าวิธีปลูกลงดินและสามารถใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินได้ง่าย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ IAA และ GA3 จากจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน และศึกษาผลของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินเปรียบเทียบกับฮอร์โมนพืชสังเคราะห์ต่อการเจริญเติบโตของมิชุนาในระบบไฮโดรโปนิกส์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การคัดแยกเชื้อและวัดปริมาณ IAA และ GA3 จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดินด้วยวิธี colorimetric assay

2.1.1 การคัดแยกเชื้อ

นำน้ำหมักมูลไส้เดือนดินจากบ่อเก็บศูนย์วิจัยและพัฒนาเกษตรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (Figure 1) มาทำการเจือจางลำดับส่วนให้ได้ 10^{-3} ถึง 10^{-5} จากนั้นนำมาเกลี่ยลงบนอาหารเลี้ยง

เชื้อ (spread plate) 2 ชนิด ได้แก่ อาหาร Potato dextrose agar (PDA) ที่เติม rose bengal (30 mg/ml) และเติมยาปฏิชีวนะ คลอแรมฟินิคอลสำหรับแยกเชื้อรา กับอาหาร Nutrient agar (NA) ที่เติม Nystatin (100,000 units/mL) สำหรับแยกเชื้อแบคทีเรีย

ในการแยกเชื้อแบคทีเรียบ่มเชื้อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน โดยแยกใส่โกลูญญากาศกับบ่มแบบมีอากาศ จากนั้นแยกโคโลนีที่แตกต่างมาเลี้ยงบนอาหารใหม่ (NA) เลี้ยงเชื้อต่อไปที่อุณหภูมิห้องอีก 2 วัน ก่อนทำการเชยเชื้อซ้ำ (re streak) บนอาหาร NA ในการแยกเชื้อรา บ่มเชื้อในกล่องพลาสติก 3 ถึง 7 วัน เชยแยกโคโลนีที่แตกต่างมาเลี้ยงบนอาหาร PDA จากนั้น 3 วัน แยกเก็บเส้นใยราออกมาเก็บไว้ในหลอดเก็บเชื้อ

แบ่งเชื้อแบคทีเรียและเส้นใยราที่เก็บออกเป็นสองส่วน โดยเส้นใยเชื้อราส่วนแรกนำมาเลี้ยงในอาหารเหลว Potato dextrose broth (PDB) ส่วนเชื้อแบคทีเรียนำส่วนแรกมาเลี้ยงในอาหารเหลว Nutrient broth (NB) ก่อนนำไปเขย่าเป็นเวลา 1 วัน สำหรับเชื้อราเขย่าเป็นเวลา 3 วัน อีกส่วนนำมาเก็บในหลอดรักษาสภาพในสารละลายกลีเซอรอลความเข้มข้น 10 % เก็บไว้ในตู้ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้สกัดดีเอ็นเอจากชุดสกัด Genomic DNA Isolation Kit นำดีเอ็นเอที่ได้มาตรวจสอบคุณภาพด้วย nanodrop และเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอเชื้อราทุกไอโซเลตด้วยชุดเพิ่มปริมาณสำเร็จรูป (BIO HELIX) จากยีนบริเวณ ITS1 และ ITS4 และยีนบริเวณ 16S rRNA สำหรับแบคทีเรียด้วยเครื่อง thermocycler จากนั้นตรวจผลผลิต PCR ใน 2.0% เจลอะกาโรส ให้เคลื่อนผ่านเครื่อง electrophoresis ตามด้วยทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ PCR ด้วย PCR purify (BIO HELIX) แล้วส่งหาลำดับเบสด้วยวิธี Sanger sequencing ที่บริษัท MacroGen ประเทศเกาหลี นำข้อมูลลำดับเบสมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล NCBI



Figure 1 Earthworm vermicomposting house (A) and vermicomposting liquid (B)

2.1.2 ปริมาณ IAA และ GA3 จากเชื้อรา แบคทีเรีย และ น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน

ในการวัดปริมาณ IAA ด้วยวิธี colorimetric assay โดยประยุกต์จาก Elena *et al.* (2007) โดยนำน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน และน้ำเลี้ยงเชื้อ PDB และ NB ที่เลี้ยงโดยเติม 0.4% L-tryptophan ที่ผ่านการกรองแล้วมา 10 ml นำน้ำหมักมูลไส้เดือนดินและน้ำเลี้ยงเชื้อที่กรองไว้แล้วทุกไอโซเลตมาทดสอบด้วยสารละลาย

Salkowski เพื่อตรวจหาปริมาณฮอร์โมน IAA ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 แล้วบ่มไว้ในที่มืด 30 นาที จากนั้นดูดสารละลายมาตรวจวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 nm นำค่าที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมได้จาก IAA บริสุทธิ์ โดยใช้ blank เป็นน้ำกลั่นที่เติมสารละลาย Salkowski ทำซ้ำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย ในการทดสอบปริมาณ GA3 ด้วยวิธี colorimetric assay ทำได้โดยนำน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน และน้ำเลี้ยงเชื้อทุกไอโซเลตมาหาปริมาณ GA3 โดยดูดตัวอย่างปริมาตร 1 ml มาเติมด้วยสารละลาย Zinc acetate ปริมาตร 1 ml ทิ้งไว้ 2 นาที ก่อนเติม Potassium ferrocyanate ตั้งทิ้งไว้ก่อนนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที ก่อนดูดส่วนใสๆ ปริมาตร 5 ml ออกมาใส่หลอดใหม่เติม 30% (v/v) HCl ปริมาตร 5 ml ลงไปเป็นลำดับสุดท้าย และรอจนสารละลายเปลี่ยนจากสีขาวใสเป็นสีเขียว จึงนำสารละลายที่เปลี่ยนสีมาตรวจวัดการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่น UV ที่ 254 nm นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมได้จากกรดจิบเบอเรลลินบริสุทธิ์โดยการทดลองให้ blank เป็นน้ำกลั่นที่เติม Zinc acetate เติม Potassium ferrocyanate และเติม 30% (v/v) HCl ทำซ้ำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

2.2 ผลของน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน, IAA และ GA3 สังกะสีต่อการเจริญเติบโตของมิยูน่า

เพาะเมล็ดมิยูน่าในช่องฟองน้ำลูกบาศก์ขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร ทำการบ่มในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นย้ายออกมาในที่ร่มที่มีแสงอีกเป็นระยะเวลานาน 25 วัน โดยต้นที่นำไปทดลองไปเลี้ยงเริ่มเหี่ยวแล้ว ทำการเตรียมระบบไฮโดรโปนิคส์แบบสารละลายไม่หมุนเวียนเดิมออกซิเจน และใช้กระบะพลาสติกกลมเป็นที่ใส่สารละลาย โดยทำการผสมสารละลายปุ๋ยไฮโดรโปนิคส์สูตร A และสูตร B ของโครงการหลวงในสัดส่วน 1 ต่อ 1 และเติมน้ำสะอาด 120 ส่วน จะได้ค่า E.C 1.3 mS/cm แล้วปรับค่า E.C ให้ได้ 0.8 mS/cm ตามคำแนะนำที่ฉลาก ย้ายต้นกล้าสลัดอายุ 26 วัน ปลูกในแผ่นโฟมที่เจาะรูและวางลงบนกระบะพลาสติกกลม ปลูกมิยูน่า 5 ต้น แล้วจัดระบบให้ออกซิเจน ทุกกะละมั่ง วางแผนการทดลองเป็น Randomized Completely Block Design จำนวน 3 บล็อก 6 ทรีตเมนต์ ได้แก่ น้ำกลั่น, IAA ความเข้มข้น 3.25 ppm, 25 ppm, 250 ppm, GA3 ความเข้มข้น 0.56 ppm, 50 ppm, 500 ppm และน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน (vermicomposting liquid: VCL) หลังจากเตรียมระบบแล้ว 2 วัน นำต้นกล้ามาวางในระบบเดิมออกซิเจนเพื่อให้พืชปรับตัว และพ่นสิ่งทดสอบทั้งหมดในวันถัดมา (วันที่ 3 หลังเตรียมระบบ) โดยสเปรย์สารห่างจากต้นกล้า 30 เซนติเมตร จำนวน 2 ครั้ง ห่างกันครั้งละ 7 วัน จากนั้นทิ้งไว้ 7 วัน ก่อนทำการเก็บตัวอย่างมาวัดการเจริญเติบโตในวันที่ 21 ของการทดสอบนับจากวันแรกที่พ่นสารครั้งแรก ได้แก่ จำนวนใบ ความสูงของต้น น้ำหนักสด ทรงพุ่ม

ความกว้างของใบ ความยาวของใบ และความยาวราก บันทึกผลการศึกษา แล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ปริมาณ IAA และ GA3 จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน

ผลการศึกษาพบว่า IAA และ GA3 ในตัวอย่างเชื้อราและแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมีปริมาณ IAA และ GA3 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Table 1) โดยน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมีปริมาณ IAA เท่ากับ 3.25 µg/ml และ GA3 เฉลี่ย 0.56 µg/ml ส่วนเชื้อราและแบคทีเรียที่คัดแยกมาเลี้ยงพบว่า เชื้อรา *Penicillium menonorum* และเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus cereus* สามารถผลิต IAA ได้สูงสุด 123.31 µg/ml และ 32.45 µg/ml ตามลำดับ นอกจากนี้เชื้อรา *P. toxicarium* และแบคทีเรีย *Aeromonas media* สามารถผลิต GA3 ได้สูงสุด 123.78 µg/ml และ 2.36 µg/ml ตามลำดับ (Table 1) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arraktham *et al.* (2016) พบว่า แบคทีเรียสกุล *Bacillus* ที่คัดแยกได้จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดินสามารถผลิต IAA ได้เฉลี่ย 131.39 µg/ml แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินสามารถผลิตฮอร์โมนพืชได้ อย่างไรก็ตามจากการตรวจวัดในครั้งนี้จะเห็นได้ว่า จุลินทรีย์ในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินผลิต IAA และ GA3 ได้ในปริมาณไม่มาก อาจเนื่องจากในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมีสารอาหารที่ผ่านการหมักมาจากไส้เดือนดินที่จำกัด ทำให้

สารอาหารที่จำเป็นมีปริมาณไม่สูง แต่มีจุลินทรีย์จำนวนมากหลายชนิดเฉพาะเชื้อราและแบคทีเรียรวมกันสูงกว่า 127 ชนิด (Kraisittapanit *et al.*, 2021; Kraisittapanit, 2022) ส่งผลให้เกิดภาวะการแข่งขันและความคุ้มกันเองเพื่อนำสารอาหารไปใช้ และส่งผลให้ผลิตสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิที่ไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเลี้ยงเชื้อชนิดเดียวในสภาวะหลอดทดลอง

3.2 ผลของน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน, IAA และ GA3 สังเคราะห์ต่อการเจริญเติบโตของมิชุนา

การใช้น้ำหมักมูลไส้เดือนดินฉีดพ่นสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของมิชุนาได้ โดยพบว่า มีความสูงลำต้น จำนวนใบ น้ำหนักต้น ความกว้างใบ ความยาวใบ ความยาวราก และความกว้างทรงพุ่ม สูงกว่าค่าดังกล่าวของต้นที่ได้รับน้ำกลั่น (Table 2, Figure 2) เมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นมิชุนาที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน, IAA และ GA3 สังเคราะห์พบว่า ต้นที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมีความสูงของต้น 21.28 เซนติเมตร ซึ่งไม่แตกต่างจากต้นที่ได้รับ IAA ทุกความเข้มข้นและ GA3 ความเข้มข้น 0.56 ppm อย่างไรก็ตาม GA3 ความเข้มข้น 50 และ 500 ppm ส่งผลให้มิชุนามีความสูงต้นดีที่สุด (29.11 และ 26.90 เซนติเมตร ตามลำดับ) นอกจากนี้ต้นที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมีจำนวนใบไม่แตกต่างจาก IAA และ GA3 ทุกความเข้มข้น

Table 1 The amount of IAA and GA3 from fungal and bacterial isolates, and vermicompost liquid

Type	Species/samples	IAA (µg/ml ± SD)	GA3 (µg/ml ± SD)	Accession number	% similarity
F	<i>Fusarium oxysporum</i>	86.71±0.45b	112.31±0.75a	JN400678.1	99.70
F	<i>Penicillium</i> sp.	77.52±0.25bc	102.71±0.26a	KY9783481.1	98.27
F	<i>P. menonorum</i>	123.31±0.13a	45.17±0.74b	NR137063.1	100.00
F	<i>Humicola</i> sp.	41.32±0.47c	87.96±0.44ab	JX077016.1	98.37
F	<i>P. toxicarium</i>	11.74±0.12d	123.78±0.55a	KM278040.1	100.00
B	<i>Bacillus aerophilus</i>	12.97±0.16d	0.87±0.78d	AJ831844	99.00
B	<i>B. siamensis</i>	5.41±0.27e	1.12±0.07cd	AJVF01000043	100.00
B	<i>B. kochii</i>	0.82±0.23f	3.78±0.12c	FN995265]	99.00
B	<i>B. megaterium</i>	3.55±0.13ef	0.13±0.36f	D16273	99.75
B	<i>B. cereus</i>	32.45±0.82c	0.74±0.74d	AE016877	100.00
B	<i>Aeromonas media</i>	8.15±0.13de	2.36±0.89c	X74679	98.75
S	Vermicomposting liquid	3.25±0.31ef	0.56±0.11e	-	-
	%CV	12.17	9.08	-	-
	F test	**	**	-	-

F = fungal species, B = bacterial species, S = Sample, ** = statistic difference at $P \leq 0.01$

ส่วนน้ำหนักต้น พบว่า ต้นที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน มีน้ำหนักต้น 25.21 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติกับน้ำหนักต้นที่ได้รับ IAA ทุกความเข้มข้น และที่ได้รับ GA3 ความเข้มข้น 0.56 และ 500 ppm อย่างไรก็ตาม ต้นที่ได้รับ GA3 ความเข้มข้น 50 ppm มีน้ำหนักต้นสูงสุดเท่ากับ 37.29 กรัม ความกว้างทรงพุ่ม พบว่า ต้นที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมีความกว้างทรงพุ่ม 23.92 เซนติเมตร ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าดังกล่าวของต้นที่ได้รับ IAA ความเข้มข้น 3.25 และ 250 ppm, GA3 ทุกความเข้มข้น ยกเว้นต้นที่ได้รับ IAA ความเข้มข้น 25 ppm มีความกว้างทรงพุ่มสูงสุดเท่ากับ 29.61 เซนติเมตร

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ชนิดและความเข้มข้นของฮอร์โมนที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเจริญเติบโตของมิซุนา โดย IAA ที่พบในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินช่วยเพิ่มปริมาณของรากทั้งจำนวนและขนาด (Kraisittipanit *et al.*, 2021) ทำให้รากของต้นที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนดินที่มี IAA และได้รับ IAA สังเคราะห์มีความยาวของรากสูงกว่าชุดควบคุม ส่วนความสูงของลำต้นเป็นผลโดยตรงมาจากอิทธิพลของจิบเบอเรลลินที่ทำให้เกิดการขยายขนาดเซลล์บริเวณข้อ พืชจึงยืดยาวขึ้น มีลำต้นสูงขึ้น (Miceli *et al.*, 2019) ส่งผลให้ต้นที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนดินและ GA3 ทุกความเข้มข้นมีความสูงของลำต้นมากกว่าชุดควบคุม สำหรับน้ำหนักรากเป็นผลจากผลจากการเพิ่มขนาดของราก ลำต้นและใบรวมกัน อย่างไรก็ตาม ในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินไม่เพียงพบแต่ GA และ IAA ยังพบ

ฮอริโมนไซโทไคนิน และสารอื่น ๆ อาทิ ไซเตอรโรฟอร ส่งผลให้เกิดการสร้างคลอโรฟิลล์มากขึ้น พืชสังเคราะห์ได้ดีขึ้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตได้ (Kraisittipanit *et al.*, 2022) เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาอื่นๆ ของต้นมิชุนาบางชี้ว่าเป็นผลมาจากไซโทไคนิน เช่น ความกว้างทรงพุ่ม เนื่องจากเกิดการพัฒนาของตาข้าง ช่วยทำให้เกิดการแตกเป็นใบใหม่ และลบล้างอิทธิพล apical dominance จากออกซิน (auxin) (Iram and Vikas, 2021) ทำให้น้ำหมักมูลของไส้เดือนดินสามารถเพิ่มความกว้างของทรงพุ่มต้นได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kongkeaw (2018) ที่อธิบายว่า น้ำหมักมูลของไส้เดือนดินช่วยให้เรดโอ๊คมีผลผลิตสูง และดีกว่าน้ำเปล่า แต่ให้ผลไม่ดีเท่าปุ๋ยเคมี เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ Jitae and Noommeesri (2022) พบว่า น้ำหมักมูลไส้เดือนดินช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของกรีนโอ๊คได้เป็นอย่างดี จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า น้ำหมักมูลไส้เดือนดินสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นมิชุนาเมื่อปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ได้ เนื่องจากในหมักมูลไส้เดือนดินมี IAA และ GA3 ที่ผลิตมาจากเชื้อราและแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์จากน้ำหมักมูลไส้เดือนดินยังให้ผลไม่ชัดเจน เนื่องจากการเจริญเติบโตของต้นสตั๊ดอาจมาจากอิทธิพลของธาตุอาหารในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินก็ได้ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมระหว่างอิทธิพลของธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในน้ำหมักมูลไส้เดือนดินเพิ่มเติม

Table 2 The shoot height, shoot weight, shoot width, leaf number, leaf width and root length of Mizuna plants after treated sterile water, vermicomposting liquid, IAA and GA3 at different concentrations in hydroponic system

Treatments	Shoot height (cm) ± SD	Shoot weight (g) ± SD	Plant width (cm) ± SD	Leaf number ± SD	Leaf width (cm) ± SD	Leaf length (cm) ± SD	Root length (cm) ± SD
SW	17.60 ± 1.76d	10.85 ± 4.65e	20.96 ± 0.85c	12.26 ± 2.65bc	7.46 ± 1.26d	16.85 ± 1.65e	26.67 ± 3.65c
Vermicomposting liquid	21.28 ± 0.56c	25.21 ± 2.02bcd	23.92 ± 1.12bc	18.30 ± 1.16a	8.89 ± 0.98c	19.73 ± 1.05cd	31.58 ± 2.96bc
IAA 3.25 ppm	20.87 ± 0.86c	27.21 ± 2.72abc	25.12 ± 0.92abc	18.11 ± 1.16a	8.71 ± 1.18c	18.23 ± 1.15cde	35.87 ± 0.86ab
IAA 25 ppm	23.96 ± 0.89bc	31.34 ± 2.25ab	29.61 ± 0.96a	17.76 ± 3.12a	9.96 ± 1.68bc	22.52 ± 1.32bc	34.88 ± 1.93ab
IAA 250 ppm	21.46 ± 1.14c	21.30 ± 2.65cd	22.36 ± 0.98c	12.80 ± 2.68abc	9.30 ± 1.79bc	20.50 ± 1.52cd	38.58 ± 2.36a
GA3 0.56 ppm	20.87 ± 0.76c	30.11 ± 2.72abc	24.17 ± 1.02bc	16.30 ± 2.16abc	9.10 ± 1.91c	20.16 ± 1.45cd	30.18 ± 3.16bc
GA3 50 ppm	29.11 ± 1.65a	37.29 ± 2.76a	28.76 ± 1.23ab	17.69 ± 3.14ab	12.30 ± 2.03ab	27.65 ± 1.36a	35.25 ± 4.35ab

Table 2 (Continuous)

Treatments	Shoot height (cm) ± SD	Shoot weight (g) ± SD	Plant width (cm) ± SD	Leaf number ± SD	Leaf width (cm) ± SD	Leaf length (cm) ± SD	Root length (cm) ± SD
GA3 500 ppm	26.90 ± 0.99ab	30.26 ± 2.98abc	27.46 ± 1.11ab	16.53 ± 2.78abc	10.96 ± 2.31b	25.03 ± 1.64ab	34.56 ± 2.26abc
%CV	9.75	13.21	10.89	14.03	10.96	10.56	17.73
Block	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F-test	**	**	**	**	**	**	**

Note: SW = sterile water, ns = non statistic difference, * = statistic difference at $P \leq 0.05$, ** = statistic difference at $P \leq 0.01$

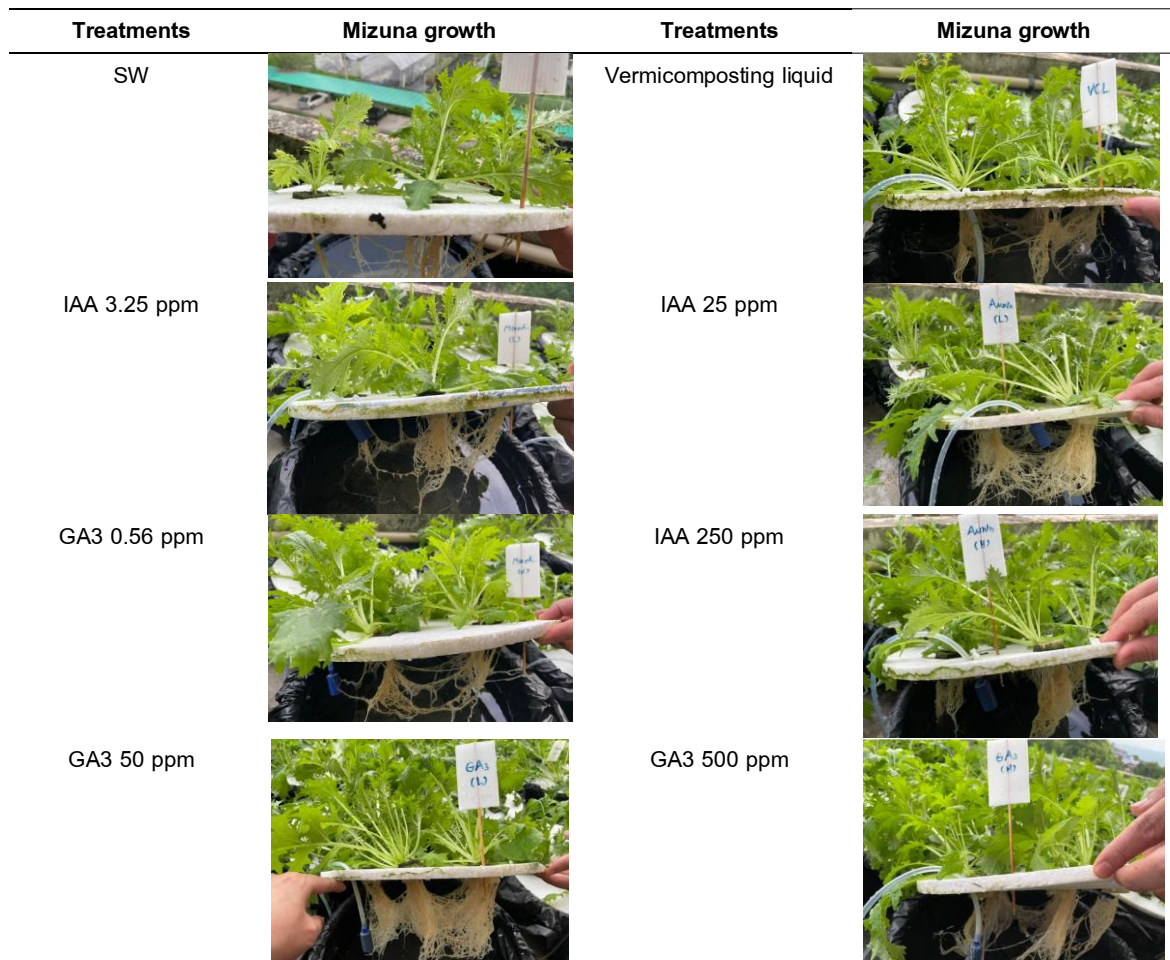


Figure 2 The Mizuna plant growth after treated with sterile water, vermicomposting liquid, IAA and GA3 at different concentrations in hydroponic system

4. สรุป

น้ำหมักมูลไส้เดือนดินมี IAA ในปริมาณ 3.25 µg/ml และ GA3 เท่ากับ 0.56 µg/ml สามารถนำน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมาใช้ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นมิชุนาเมื่อปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ได้ผลดีกว่าจากไส้เดือนดินนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อใช้ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในกลุ่มนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาเกษตรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้การอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำหมักมูลไส้เดือนดินจากสายพันธุ์ที่ดำไว้สำหรับการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Arraktham, A., Tancho, A., Niamsup, P. and Rattanawaree, P. 2016. The potential of bacteria isolated from earthworm intestines, vermicompost and liquid vermicompost to produce indole-3-acetic acid (IAA). **International Journal of Agricultural Technology** 12(2): 229-239.
- Elena, A.T., Cherdyntseva, T.A., Botinaand. S.G. and Netrusov, I.A. 2007. Bacteria associated with orchid roots and microbial production of auxin. **Microbiological research** 162(1): 69-76.
- Iram, S. and Vikas, Y. 2021. **Propagation and Genetic Manipulation of Plants**. Springer, Singapore.
- Jitae, S. and Noommesri, A. 2022. The effect of vermicomposting liquid for reen salad. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 14(1): 229-237. (in Thai)
- Kongkeaw, P. 2018. **Research Report on Development technology Applications using Utilization of Extracted juice from Vermicompost for Soiless Culture with Hydroponic System**. Rajabhat Maha Sarakham University. (in Thai)
- Kraisittipanit, R. 2022. Fungi diversity from earthworm and agricultural application. Doctor of Philosophy Program in Biotechnology, Maejo University.
- Kraisittipanit, R. and Charemtantanakul, W. 2018. Microorganism from earthworm and agricultural application. **Maejo Patitad** 19(4): 35-39. (in Thai)
- Kraisittipanit, R., Tancho, A., Aumtong, S., Niamsup, P., Klayraung, S. and Charemtantanakul, W. 2022. The study of fungal metagenomics and potential to produce secondary metabolites fungus isolated from *Perionyx* sp.1 gut. **Khon Kaen Agriculture Journal** 50(3): 843-855.
- Kraisittipanit, R., Tancho, A., Aumtong, S., Niamsup, P. and Charemtantanakul, W. 2021. The potential of fungi collected from earthworm gut and vermicompost producing auxin under tryptophan and non-tryptophan culture. **International Journal of Agricultural Technology** 17(3): 921-928.
- Miceli, A., Moncada, A., Sabatino, L. and Vetrano, F. 2019. Effect of gibberellic acid on growth, yield, and quality of leaf lettuce and rocket grown in a floating system. **Agronomy** 9(7): 382.
- Soluch, A. 2023. The effect of development time on phytochemical characteristics of red mizuna (*Brassica rapa* L. var. nipposinica) sprouts. **Polish Journal of Agronomy** 52: 44-53.
- Tancho, A. 2009. **Vermicompost produce processing from organic waste**. Natural Agriculture Research and Development Center, Thailand. (in Thai)

4. สรุป

จากการศึกษาผลของสารประกอบแคลเซียมบางชนิดและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อคุณภาพของผลผลิตมะเดื่อฝรั่งพันธุ์แบล็คจินัวในครั้งนี้ สรุปได้ว่า ปัจจัยที่ 1 การใช้สารประกอบแคลเซียม พบว่าการใช้ และไม่ใช้สารประกอบแคลเซียม ทำให้ปริมาณของของแข็งที่ละลายน้ำได้ และอัตราส่วนของของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัยที่ 2 สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช พบว่าการใช้ สาร CPPU และ NAA ทำให้ความกว้างผล น้ำหนักสด และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาทั้งสองปัจจัยร่วมกัน พบว่า การฉีดพ่นด้วยสาร $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ความเข้มข้น 200 mg/l ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 10 mg/l จะทำให้คุณภาพและอายุการเก็บรักษาที่มีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

5. ข้อเสนอแนะ

สำหรับการประยุกต์ใช้จากผลการทดลอง ให้เริ่มฉีดพ่นสารละลายหลังจากการตัดแต่งกิ่งไปแล้วในช่วงสัปดาห์ที่ 12-14 และจะสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในสัปดาห์ที่ 20-22 ทั้งนี้ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับสภาพอากาศด้วย

ทั้งนี้หากมีการศึกษาในครั้งต่อไป ควรตรวจเนื้อเยื่อหาปริมาณสารตกค้างในผลผลิต เพื่อให้ผู้บริโภคมีความมั่นใจในผลผลิต ซึ่งปัจจุบันผู้คนหันมาใส่ใจสุขภาพกันมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถานี่เกษตรหลวงปางตะ มูลนิธิโครงการหลวงที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุพันธุ์พืช และอุปกรณ์ในการทดลองครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Boonklam, T., Abdullakassim, S., Havananda, T. and Saradhuldhath, P. 2019. The use of forchlorfenuron and naphthalenacetic acid on fruit size in off-season dragon fruit. **Journal of Science and Technology** 8(1): 1-11. (in Thai)
- Bowonsupakijkul, S. 2021. **The Relationship between Water Activity and Moisture Content in Commercial Aquatic Feeds**. Technical Paper No.1/2021, Aquatic Animal Feed Research and Development Division, Ministry of Agriculture and Cooperatives. (in Thai)
- Chaiyarak, T. and Ratanacherdchai, K. 2022. Efficiency of various catalysts on compost decomposition to reduce the use of farm yard manure to produce organic fertilizer. **Rajabhat Agriculture Journal** 21(2): 1-11. (in Thai)
- Gold Biotechnology. 2022. **Safety Data Sheet**. Goldbio. Available Source: <https://goldbio.com/documents/5872/C-145.pdf>, December 22, 2023.
- Hatami, M., Kalantariand, S. and Delshad, M. 2012. Responses of different maturity stages of tomato fruit to different storage conditions. **VII International Postharvest Symposium** 1012: 857-864.
- Kim, J.G., Takami, Y., Mizugami, T., Beppu, K., Fukuda, T. and Kataoka, I. 2006. CPPU application on size and quality of hardy kiwifruit. **Scientia Horticulturae** 110(2): 219-222.
- Kou, X., Feng, Y., Yuan, S., Zhao, X., Wu, C., Wang, C. and Xue, Z. 2021. Different regulatory mechanisms of plant hormones in the ripening of climacteric and non-climacteric fruits: a review. **Plant Molecular Biology** 107: 477-497.
- Lewis, D.H., Burge, G.K., Hopping, M.E. and Jameson, P.E. 1996. Cytokinins and fruit development in the kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). II. Effects of reduced pollination and CPPU application. **Physiologia Plantarum** 98(1): 187-195.
- Mahajan, S. 2022. Effect of different concentration of nutrient and PGRs on physico-chemical quality and yield of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Amrapalli under valley conditions of Garhwal hill. **The Pharma Innovation Journal** 11(5): 2194-2197.
- Na Chiangmai, P. and Boonplod, N. 2019. Effect of plant growth regulators on fruit quality of mulberry. **Burapha Science Journal** 24(1): 233-240. (in Thai)
- Nasi. 2013. **Material Safety Data Sheet**. Plant products. Available Source: https://www.plantproducts.com/ca/images/Calcium_Nitrate_Liquid_8-0-0-11_Amm_Free_Alpine_MSDS_EXP2016-01-30.pdf, December 22, 2023.
- Panchai, W., Boonplod, N. and Naphrom, D. 2021. Effect of plant growth regulators on fruit quality of fig (*Ficus carica* L.). **Journal of Agricultural Production** 3(3): 27-41. (in Thai)
- Panchaiand, W. and Boonplod, N. 2020. Growth and development of fig fruit cv. black genoa grown in

- Chiang Mai. **Journal of Agricultural Production** 38(1): 1-11. (in Thai)
- Peawdang, C. and Naphrom, D. 2018. Effects of calcium compounds and plant growth regulators on fruit qualities of strawberry cv. praratchatan 80. **Journal of Agriculture** 35(2): 183-192. (in Thai)
- Pimpila, K., Rienglard, P. and Chaemchamrat, S. 2020. Effects of pruning on canopy growth and yield of 'black jack' fig. **Journal of Agriculture** 39(2): 209-217. (in Thai)
- Poollap, P. 2023. **Precooling to prolong fruits and vegetables shelf life** (3rded). Chiang Mai University, Chiangmai. (in Thai)
- Posawang, S. 2020. Testing of fig varieties on highland. **Journal of Agricultural Production** 2(2): 31-38.
- Quan Yu, J., Li, Y., Qian, Y.R., and Zhu, Z.J. 2001. Cell division and cell enlargement in fruit of *Lagenaria leucantha* as influenced by pollination and plant growth substances. **Plant Growth Regulation** 33: 117-122.
- Rousk, J. and Bååth, E. 2007. Fungal and bacterial growth in soil with plant materials of different C/N ratios. **FEMS microbiology ecology** 62(3): 258-267.
- Singh, N.P., Malhi, C.S. and Sharma RC. 2005. Effect of plant bioregulators on flowering, fruit yield and quality in Mango cv. Dashehari. **The Horticulture Journal** 18(10): 10-12.
- Sozzi, G.O., Abraján-Villaseñor, M.A., Trinchero, G.D. and Fraschina, A.A. 2005. Postharvest response of 'brown turkey' figs (*Ficus carica* L.) to the inhibition of ethylene perception. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 85(14): 2503-2508.
- Supelco. 2023. **Safety Data Sheet**. Merck Millipore. Available Source: https://www.merckmillipore.com/Web-MY-Site/en_US/-/USD/ShowDocument-File?ProductSKU=MDA_CHEM-102120&DocumentType=MSD&DocumentId=102120_SDS_TH_TH.PDF&DocumentUID=316492&Language=TH&Country=TH&Origin=null, December 22, 2023. (in Thai)
- Ugare, B., Banerjee, K., Ramteke, S.D., Pradhan, S., Oulkar, D.P., Utture, S.C. and Adsule, P.G. 2013. Dissipation kinetics of forchlorfenuron, 6-benzyl aminopurine, gibberellic acid and ethephon residues in table grapes (*Vitis vinifera*). **Food chemistry** 141(4): 4208-4214.

Research Article

การเปรียบเทียบวัสดุปลูกสูตรผสมและปุ๋ยเคมี (15-15-15) ต่อปริมาณฟอสฟอรัส
ในใบที่มีผลต่อจำนวนช่อดอก และการติดผลของมะม่วง

Comparision of Mixed Formula Planting Materials and Chemical Fertilizer (15-15-15) on
Leaf Phosphorus Content Affecting Inflorescence Quantity
and Fruit Set in Mango

ณัฏฐพงษ์ เพชรอำไพ * และ ศิริกาญจนา ศิริรินทร์

Natthapong Pechampai * and Sirikanjana Sirinon

ศูนย์ห้องปฏิบัติการหน่วยวิจัย เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตนครสวรรค์ อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์ 60130
MUNA Lab Center and Research Unit, Mahidol University, Nakhonsawan Campus, Phayuha Khiri, Nakhon Sawan 60130, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-19

Revised: 2024-08-20

Accepted: 2024-09-02

Keywords:

chemical fertilizer;

mixed formula planting materials;

phosphorus

The objective of this study was to study the influence of mixed planting materials and chemical fertilizers on the amount of leaf phosphorus content that affects the number of inflorescences and fruit set in mangoes. The results showed that, before the experiment, the chemical fertilizer (15-15-15) had the highest phosphorus content. Among the mixed planting materials, PM3 contained the highest phosphorus content. Soil analysis revealed that phosphorus levels were highest in the T4(PM3), T3(PM2), T2(PM1), T1(15-15-15), and T0(Control) treatments, respectively, with significantly difference ($p < 0.05$). An analysis of phosphorus in mango leaves revealed that T4 (PM3) had the highest content at 0.18%. Moreover, T4 (PM3) produced the highest number of inflorescences per plant (421) and the highest fruit yield per plant (532.25 fruits). Therefore, it can be concluded that the mixed planting materials result in higher phosphorus content in mango leaves and a greater number of inflorescences and fruit set compared to chemical fertilizers, with the difference being statistically significant at the 0.05 level.

* Corresponding author.

E-mail address: natth1977@gmail.com

Cite this article as:

Pechampai, N. and Sirinon, S. 2025. Comparative of Mixed Formula Planting Materials and Chemical Fertilizer (15-15-15) that Affect Phosphorus Content in Leaves and the Addition of Inflorescences and the Number of Mango Fruits. *Recent Science and Technology* 17(3): 261906.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวัสดุปลูกสูตรผสม และปุ๋ยเคมีต่อปริมาณฟอสฟอรัสในใบที่มีผลต่อจำนวนช่อดอก และการติดผลของมะม่วง ผลการศึกษาพบว่า ก่อนทำการทดลองปุ๋ยเคมี (15-15-15) มีธาตุฟอสฟอรัสสูงสุด และเมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มของวัสดุปลูกสูตรผสม พบว่า ธาตุฟอสฟอรัสมีปริมาณสูงสุดใน วัสดุปลูกสูตรผสม PM3 หลังทำการทดลองวิเคราะห์ดินพบว่า ดินมีธาตุฟอสฟอรัสสูงที่สุดในกรรมวิธี T4(PM3), T3(PM2), T2(PM1), T1(15-15-15) และ T0(Control) ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) วิเคราะห์ธาตุฟอสฟอรัสในใบพืชพบว่า กรรมวิธีที่มีปริมาณธาตุฟอสฟอรัสสูงสุดได้แก่ T4(PM3) มีปริมาณเท่ากับ 0.18% และมีจำนวนช่อดอกและการติดผลของมะม่วงสูงสุด เท่ากับ 421 ช่อ และ 532.25 ผล ตามลำดับ พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (T0) มีจำนวนช่อดอกเท่ากับ 229.50 ช่อ และการติดผลมะม่วง เท่ากับ 331.75 ผล จึงสรุปได้ว่าวัสดุปลูกสูตรผสมนั้นทำให้ใบพืชมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง มีจำนวนช่อดอก และการติดผลของมะม่วงสูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี

คำสำคัญ: ปุ๋ยเคมี, วัสดุปลูกสูตรผสม, ฟอสฟอรัส

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการปลูกมะม่วงจำนวนมาก มีการรวมกลุ่มผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองส่งออกไปประเทศญี่ปุ่นอย่างเป็นระบบ นอกจากทำชื่อเสียงให้กับประเทศแล้ว ยังนำรายได้เข้าสู่ประเทศจำนวนมาก และผลผลิตมะม่วงเหล่านี้มีขายตลอดทั้งปี โดยสามารถผลิตเพื่อการส่งออกทั้งในรูปแบบสด และแปรรูปทำรายได้ให้กับเกษตรกรเป็นมูลค่า 20,220 บาทต่อไร่ (Office of Agricultural Economics, 2017) โดยกระบวนการผลิตมะม่วง เกษตรกรส่วนใหญ่มีการใช้ปุ๋ยเคมีจำนวนมาก เพื่อการผลิตมะม่วงทั้งในฤดูกาลและนอกฤดูกาล โดยเฉพาะปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ซึ่งนิยมใส่ในระยะบำรุงต้นเพื่อเติมปริมาณธาตุอาหารให้กับดินโดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัสที่มีในปุ๋ยเคมีสูตรต่าง ๆ มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์แสง สร้างแป้งและน้ำตาล เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่สำคัญหลายชนิด เสริมสร้างส่วนที่เป็นดอก การผสมเกสร ตลอดจนการติดเมล็ดและออกผล ซึ่งเกษตรกรนิยมใช้คือปุ๋ยสูตร 15-15-15 โดยใช้เพื่อทดแทนปุ๋ยสูตรอื่นในทุกระยะเนื่องจากมีราคาถูกกว่าแต่ต้องใส่เพิ่มในปริมาณที่มากขึ้น (Osodsapa, 2015) โดยจะใส่ทดแทนปุ๋ยเคมีสูตร 12-24-12 เพื่อสร้างตาดอกและใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 13-13-21 เพื่อพัฒนาคุณภาพผล และเพื่อลดต้นทุนจึงทำให้เกษตรกรมีการใช้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ทดแทนทุกระยะทั้งระยะการเจริญเติบโตของกิ่งก้านใบ ติดดอกออกผล เพื่อเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของผลผลิต ทำให้เกษตรกรมีการใช้ปุ๋ยเคมีซ้ำแบบเดิมสูงมากในกระบวนการปลูกมะม่วง ซึ่งทำให้ดินเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ระบบการผลิตไม่ยั่งยืน ผู้วิจัยจึงมีการทดสอบพัฒนาวัสดุปลูกสูตรผสม นวัตกรรมใหม่ด้านวัสดุปลูกที่ให้ธาตุอาหารพืชที่มีประสิทธิภาพ ช่วยปรับสภาพดินให้มีความร่วนซุย ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของดินให้เป็นกลาง และเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินให้เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช และเติมเติมธาตุอาหารให้ดินในทุกระยะของพืชรวมถึงเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในระยะติดดอก วัสดุปลูกในงานวิจัยนี้จึงหมายถึง วัสดุต่าง ๆ ที่เป็นทั้งอินทรีย์วัตถุหรืออินทรีย์วัตถุที่ใส่ลงไปในดินที่ปลูกพืชแล้วทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี สามารถเป็นแหล่งสำรองธาตุอาหารของพืชได้ ใช้ทดแทนปุ๋ยเคมีที่เกษตรกร

นิยมใช้กันได้และยังสามารถปรับปรุงดินให้มีประสิทธิภาพเหมาะกับการเจริญเติบโตของพืชจนออกดอกออกผลได้ และเนื่องจากวัสดุปลูกที่มีการนำมาใช้ในการปลูกพืชโดยทั่วไป มีธาตุอาหารที่ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตตามลักษณะชนิดและพันธุ์ของพืช เช่น เวอร์มิคูไลต์ ซีธาไกลบ และกาบมะพร้าวสับ เป็นต้น ผู้วิจัยจึงพัฒนานวัตกรรมวัสดุปลูกสูตรผสมใหม่มาใช้ทดสอบกับมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุปลูกสูตรผสม และปุ๋ยเคมีต่อปริมาณฟอสฟอรัส (Panyaying *et al.*, 2017) ในใบที่มีผลต่อจำนวนช่อดอก และการติดผลของมะม่วง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 พัฒนาวัสดุปลูกสูตรผสม

ตามวิธีการผลิตเป็นสูตรเฉพาะพืชที่มีสัดส่วนของธาตุอาหารตามความต้องการของพืช ประกอบด้วย ปุ๋ยเคมีที่มีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นของพืชและธาตุฟอสฟอรัสที่จำเป็นต่อการออกดอกติดผล, ผงปุ๋ยหมักที่มีธาตุอาหารสูง, ปุ๋ยหมักจากพืชสารสกัดสมุนไพร, ปุ๋ยชีวภาพผสม EM, ฮอร์โมนชีวภาพ และสารปรับปรุงดิน (Intanon, 2013) โดยทำการทดลองในแปลงมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ที่ให้ผลผลิตแล้วอายุต้น 10 ปี ระยะปลูก 8x8 เมตร ระยะเวลาในการทดลอง 1 ฤดูกาลในการออกดอกติดผลของมะม่วง ในพื้นที่ ต.บ้านกลาง อ.วังทอง จ.พิษณุโลก โดยมีส่วนผสมของวัสดุปลูกทั้ง 3 สูตรดังนี้

A= ปุ๋ยเคมีที่มีองค์ประกอบของธาตุอาหารหลัก (ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส, โพแทสเซียม) ธาตุอาหารรอง (แคลเซียม, แมกนีเซียม, กำมะถัน) และธาตุอาหารเสริม (เหล็ก, ทองแดง, สังกะสี, แมงกานีส, โบรอน) ในอัตราส่วนร้อยละของปุ๋ยเคมี 70: 20: 10

B= ผงปุ๋ยหมักที่มีธาตุอาหารสูง (Powder of compost with high nutrients) ประกอบด้วยธาตุอาหารหลัก, ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม

C= สารปรับปรุงดิน (Soil amendment) โดโลไมท์ (Dolomite; $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) เป็นปูนชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบของธาตุแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) โดโลไมท์ มีลักษณะทาง

เคมีเป็นต่าง จึงใช้ในการปรับสภาพดินที่เป็นกรดให้มีความเป็นต่างเพิ่มขึ้น

D= ปุ๋ยหมักจากพืชสารสกัดสมุนไพร (Compost of herb plant mixed with herbal extract liquid) ประกอบด้วย น้ำกากถั่วเหลือง 86 เปอร์เซ็นต์, สารสกัดสะเดา 1.34 เปอร์เซ็นต์, สับปะรด 5 เปอร์เซ็นต์, ตะไคร้หอม 5 เปอร์เซ็นต์, ปุ๋ยแคลเซียมไนเตรท 2.5 เปอร์เซ็นต์, ปุ๋ยแมกนีเซียมซัลเฟต 0.05 เปอร์เซ็นต์, ปุ๋ยยูนิเลท 0.01 เปอร์เซ็นต์, ปูนขาว 0.1 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วนร้อยละของส่วนผสม โดยนำส่วนผสมทั้งหมดหมักรวมกันทิ้งไว้ ประมาณ 3 เดือน

E= ฮอโมนชีวภาพ (Bio-liquid hormones) ใช้ยอดพืช เช่น มะม่วง ขนุน และ ชมพู เป็นต้น 5 กิโลกรัม, จุลินทรีย์ EM 250 มิลลิลิตร, กากน้ำตาล 250 มิลลิลิตร, น้ำ 20 ลิตร โดยนำส่วนผสมทั้งหมดหมักรวมกันทิ้งไว้ ประมาณ 3 เดือน

F= ปุ๋ยชีวภาพผสม EM (Bio-liquid fertilizer with EM) เศษใบไม้แห้ง เศษผัก เศษผลไม้ เปลือกไข่ กากกาแฟ เปลือกผลไม้ 2 กิโลกรัม, ปุ๋ยคอก 1 กิโลกรัม, แกลบดิบ 2 กิโลกรัม, แกลบดำ 2 กิโลกรัม, รำละเอียด 1 กิโลกรัม, กากน้ำตาล 1 ลิตร, จุลินทรีย์ EM 1 ลิตร, น้ำ 10 ลิตร โดยนำส่วนผสมทั้งหมดหมักรวมกันทิ้งไว้ ประมาณ 3 เดือน

2.2 ผลิตัวสดปลูกสูตรผสม

ผลิตัวสดปลูกสูตรผสม (Mixed planting materials ;PM) จำนวน 3 สูตร ที่ระดับความเข้มข้นของสารแตกต่างกัน 3 ระดับคือ PM1, PM2 และ PM3 ตามลำดับ ความเข้มข้นของสารโดยอัตราส่วนปริมาณส่วนผสมของวัสดุที่ผสมลงไปร้อยละที่แตกต่างกันในแต่ละสูตรตามสัดส่วนตามตาราง (Table 1) เพื่อเร่งการ

เจริญเติบโต กิ่ง ยอด ใบ ออกดอกติดผล ขยายขนาดของผล และเพิ่มผลผลิตเพื่อใช้กับทุกกรรมวิธี ซึ่งวัสดุปลูกสูตรผสมนวัตกรรมใหม่ผลิตเพื่อเป็นสูตรเฉพาะพืชโดยการคำนวณธาตุอาหารที่จำเป็นมาผสมกับจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ (EM) สารสกัดสมุนไพร สารปรับสภาพดิน สารเสริมภูมิคุ้มกันโรคพืชแล้วนำมาบั่นเป็นเม็ด และควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร จึงเป็นสารที่ละลายช้า (Intanon, 2010) โดยมีขั้นตอนการผลิตดังนี้

วิเคราะห์ดินเพื่อหาระดับธาตุอาหารหลัก (N, P, K) เบื้องต้นที่มีในแปลงปลูกและพิจารณาปริมาณธาตุอาหารหลักที่ต้องเพิ่มเข้าไปให้เพียงพอกับความต้องการของพืช จากนั้นจึงวัตถุดิบตามสัดส่วนโดยน้ำหนัก (Table 1) โดยนำปุ๋ยเคมีที่มีองค์ประกอบของธาตุอาหารหลัก, ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมที่ผสมไว้แล้วในอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นจึงเติมผงปุ๋ยหมักลงไปเพื่อเพิ่มเติมธาตุอาหารเหล่านั้นให้มากขึ้น แล้วจึงนำปุ๋ยหมักจากพืช สารสกัดสมุนไพร และปุ๋ยชีวภาพผสมจุลินทรีย์ EM ซึ่งเป็นสารเสริมภูมิคุ้มกันโรคพืชมาผสมเข้าด้วยกันผึ่งให้แห้งแล้วบดเป็นผงละเอียด แล้วนำมาขึ้นงานปั้นพ่นเคลือบด้วยฮอโมนชีวภาพเสร็จแล้วจึงนำไปผึ่งลมให้แห้ง แล้วนำวัสดุปลูกสูตรผสมที่ได้มาพรมด้วยฮอโมนชีวภาพ อีกครั้ง แล้วบั่นขึ้นเม็ดเพื่อเสริมธาตุอาหารรอง ธาตุอาหารเสริม แล้วเติมสารปรับปรุงดิน (Dolomite; $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ตามสัดส่วนโดยน้ำหนัก (Table 1) แล้วบั่นขึ้นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร แล้วเคลือบด้วยสารควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร (Polymer Coating) บนงานปั้น โดยใช้ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราส่วนผสมทั้งหมด แล้วปล่อยให้เม็ดกลิ้งไประยะหนึ่งเพื่อให้เม็ดแน่นและคงรูบั้งขึ้น เสร็จแล้วนำไปผึ่งลมให้แห้ง เรียกว่า “วัสดุปลูกสูตรผสม (PM)”

Table 1 Materials and components of planting materials (by weight %)

Planting materials	Raw materials and components of planting materials (% weight)						Total 100%
	A	B	C	D	E	F	
PM1	15	35	10	20	10	10	100
PM2	25	25	10	15	10	15	100
PM3	35	15	10	10	10	20	100

A=The ratio between major nutrients (70%) to secondary nutrients (20%) to micronutrients (10%) by chemical fertilizers, B=Powder of compost with high nutrients, C=Soil amendment, D=Compost of herb plant mixed with herbal extract liquid, E=Bio-liquid hormones, F=Bio-liquid fertilizer with EM

2.3 ทำการทดสอบปุ๋ยสูตรผสมแต่ละสูตร

วางแผนทดลองแบบ RCBD จำนวน 4 บล็อก บล็อกละ 5 ต้น ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี ๆ ละ 4 ซ้ำ รวม 4 ต้นต่อกรรมวิธี หรือทั้งหมด 20 ต้น ดังนี้ T0 ไม่ใส่วัสดุปลูกสูตรผสม (Control), T1 ใส่ปุ๋ยเคมี 15-15-15, T2 ใส่วัสดุปลูกสูตรผสม PM1, T3 ใส่วัสดุปลูกสูตรผสม PM2, T4 ใส่วัสดุปลูกสูตรผสม PM3 แบ่งใส่ 3 ครั้ง ในทุกกรรมวิธีเหมือนกัน โดยใส่ปุ๋ยโรยรอบโคนต้นแล้วพรวนดิน กลบ ดังนี้ ครั้งที่ 1 ภายหลังการตัดแต่งกิ่งใส่ 2 กิโลกรัมต่อต้น ครั้งที่ 2 เมื่อมะม่วงเป็นใบเฟสลาด (Fan leaves) ใส่ 2 กิโลกรัมต่อต้น ครั้งที่ 3 หลังออกดอกแล้ว และติดผลเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลประมาณ 2.5 เซนติเมตรโดย ใส่ 1 กิโลกรัมต่อต้น โดยทำการทดลองในระยะตัดแต่งกิ่งจนถึงติดผลเป็นระยะเวลา 1 ปี หรือ 1 ฤดูกาลให้ผลผลิตของมะม่วง ทำการบันทึกข้อมูลดังนี้ 1. รวบรวมข้อมูลสภาพแวดล้อมได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝน 2. วิเคราะห์ปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในวัสดุปลูกสูตรผสม (PM) 3. วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในดินโดยสุ่มกระจายเก็บตัวอย่างดินบริเวณหน้าดิน 4 จุด รอบโคนต้นปริมาณจุดละ 0.5 กิโลกรัม ผึ่งในที่ร่มให้แห้งประมาณ 1-2 สัปดาห์ 4. วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในใบพืช โดยทำการสุ่มเก็บในระยะใบเฟสลาด 5 จุด รอบทรงพุ่มปริมาณจุดละ 5 ใบ อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 5. จำนวนช่อดอก และจำนวนผลต่อต้น ซึ่งในการวิเคราะห์หาธาตุฟอสฟอรัสโดยใช้เทคนิค Vanadomolybdate (Hesse, 1971) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติโดยใช้วิธี Analysis of Variance (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 สภาพภูมิอากาศ

ขณะทำการทดลองสภาพภูมิอากาศระหว่าง เดือน พฤษภาคม 2565 ถึง เดือนพฤษภาคม 2566 มีอุณหภูมิ, ปริมาณน้ำฝนและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย โดยรวบรวมข้อมูลจากสถานีศูนย์อุทกวิทยา และบริหารน้ำภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดพิษณุโลก และกรมอุตุนิยมวิทยา กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ที่วิจัยพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 33.8 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด 23.4 องศาเซลเซียส, ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 109.7 มิลลิเมตร และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 73.8-78.8 เปอร์เซ็นต์ สิ่งแวดล้อมอยู่ในสภาพปกติไม่เป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตของต้นมะม่วง ซึ่งโดยปกติแล้วมะม่วงเป็นพืชที่เติบโตโดยกำเนิดอยู่ในเขตร้อนสภาพอุณหภูมิที่อบอุ่นสม่ำเสมอตั้งแต่ 20-38 องศาเซลเซียส

3.2 ผลการวิเคราะห์วัสดุปลูกสูตรผสม PM

พบว่า ธาตุฟอสฟอรัสสูงสุดได้แก่ วัสดุปลูกสูตรผสม PM3, PM2 และ PM1 ตามลำดับ โดยมีธาตุฟอสฟอรัส ระหว่าง 1.44-1.85% (Table 2) ทั้งนี้เป็นผลมาจากวัสดุผสมสูตรที่หลากหลายมีการเติมธาตุอาหารที่จำเป็นกับมะม่วงโดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัสที่มีส่วนสำคัญทำให้มะม่วงติดดอกออกผล รวมถึงส่วนผสมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ (EM) สารสกัดสมุนไพร สารปรับสภาพดิน สารเสริมภูมิคุ้มกันโรคพืช สารควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของมะม่วง ซึ่งเป็นเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาสูตรสำหรับการปลูกมะม่วง (Intanon *et al.*, 2011)

Table 2 Analysis of phosphorus in planting materials used in this experiment

Properties	unit	Planting materials			
		15-15-15	PM1	PM2	PM3
Phosphorus	%P	15.00	1.44	1.75	1.85
Organic matter	%OM	-	1.13	1.44	1.51
pH (1:1)	-	-	6.43	7.35	7.68
EC (1:5)	EC (µs/cm)	-	67.31	63.44	61.12

Table 3 Analysis of the soil after the experiment in fan leaves stage

Properties	unit	T0	T1	T2	T3	T4
		Control	15-15-15	PM1	PM2	PM3
Phosphorus	P%	0.42	0.45	0.49	0.58	0.74
Organic matter	OM%	1.53	1.96	2.17	2.31	3.03
pH (1:1)	-	8.57	8.28	7.62	7.46	7.21
EC (1:5)	EC (µs/cm)	70.83	70.16	67.14	63.16	62.23

3.3 ผลการวิเคราะห์ดิน

พบว่าดินก่อนการทดสอบมี pH 8.57 มีความเป็นด่างอ่อน อินทรีย์วัตถุ (OM) 1.53% อยู่ในระดับต่ำ ความเค็มของดิน (EC 1:5) 70.83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ อยู่ในระดับต่ำมาก ภายหลังการทดลองพบว่า กรรมวิธีที่ใช้วัสดุปลูกสูตรผสม PM ดินมี pH เป็นกลาง อินทรีย์วัตถุ (OM) อยู่ในระดับปานกลางจนถึง สูงปานกลาง ความเค็มของดิน อยู่ในระดับต่ำมาก (Table 3) ธาตุฟอสฟอรัสสูงสุดในกรรมวิธี T4(PM3), T3(PM2), T2(PM1), T1(15-15-15) และ T0(Control) มีค่าเท่ากับ 0.74, 0.58, 0.49, 0.45 และ 0.42 ตามลำดับ (Table 4) นั้นแสดงให้เห็นว่าในกรรมวิธี T4(PM3), T3(PM2), T2(PM1) กลุ่มวัสดุปลูกสูตรผสม PM ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ เป็นดินที่ทำให้พืชเจริญเติบโต และดูดซึมฟอสฟอรัสได้ดี ส่วนกรรมวิธี T1 ที่ใส่ปุ๋ยเคมีลงไปนั้นไม่สามารถช่วยในดินดูดซับฟอสฟอรัสได้ ฟอสฟอรัสได้ถูกชะล้างไปตามสภาพแวดล้อม ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เหลือมีปริมาณน้อย (Intanon, 2013)

3.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุฟอสฟอรัสในใบพืช

พบว่า ใบพืชในระยะเพลสดามีธาตุฟอสฟอรัสรวมสูงสุด ได้แก่ กรรมวิธี T4(PM3) 0.18% (Table 5) เมื่อพิจารณาผลการ

วิเคราะห์พบว่า กรรมวิธีในกลุ่มวัสดุปลูกสูตรผสม PM (T4, T3, T2) แสดงให้เห็นว่าธาตุฟอสฟอรัส มีการสะสมในใบพืชสูงกว่าในกรรมวิธีที่ใช้ปุ๋ยเคมีเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในดินมีผลในการเพิ่มการสะสมฟอสฟอรัสในใบพืช (Aranyakanon, 2015)

3.5 ผลการวิเคราะห์จำนวนช่อดอก และการติดผลของมะม่วง

พบว่า มะม่วงมีจำนวนช่อดอกต่อต้นสูงสุดได้แก่ กรรมวิธี T4(PM3) 421 ช่อ จำนวนติดผลต่อต้นสูงสุดได้แก่ กรรมวิธี T4(PM3) 532.25 ผล รองลงมา คือ T2(PM1) 348.25 ช่อ 399.75 ผล, T3(PM2) 327.25 ช่อ 396.75 ผล และ T1(15-15-15) 280 ช่อ 359 ผล ตามลำดับ แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับชุดควบคุมเพียงอย่างเดียว แต่ไม่ได้แตกต่างทางสถิติ เมื่อเทียบกับ T3(PM2), T2(PM1) และ T1(15-15-15) (Table 6) แสดงให้เห็นว่าธาตุฟอสฟอรัสที่มีผลต่อจำนวนช่อดอก และการติดผลของมะม่วง (Figure 2) เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่พืชดูดซึมเข้าไป ช่วยในการสังเคราะห์แสง สร้างแป้ง และน้ำตาล เสริมสร้างส่วนที่เป็นดอก การผสมเกสร ตลอดจนการติดเมล็ดและออกผล ในกรรมวิธีที่ใช้วัสดุปลูกสูตรผสม PM ได้สูงกว่าในกรรมวิธีที่ใช้ปุ๋ยเคมี (Panyaying *et al.*, 2017)

Table 4 Analysis of phosphorus content in the soil after the experiment in fan leaves stage

Treatments	Phosphorus content (%Total)
T0 (Control)	0.42 ^c ±0.015
T1 (15-15-15)	0.45 ^c ±0.009
T2 (PM1)	0.49 ^c ±0.013
T3 (PM2)	0.58 ^b ±0.012
T4 (PM3)	0.74 ^a ±0.011
F-Test	*
% CV	2.24

* = Significant difference at probability level 0.05

Table 5 Analysis of phosphorus content in the leaves

Treatments	Phosphorus content (%Total)
T0 (Control)	0.13 ^d ±0.009
T1 (15-15-15)	0.13 ^d ±0.007
T2 (PM1)	0.15 ^c ±0.008
T3 (PM2)	0.17 ^b ±0.012
T4 (PM3)	0.18 ^a ±0.011
F-Test	*
% CV	6.16

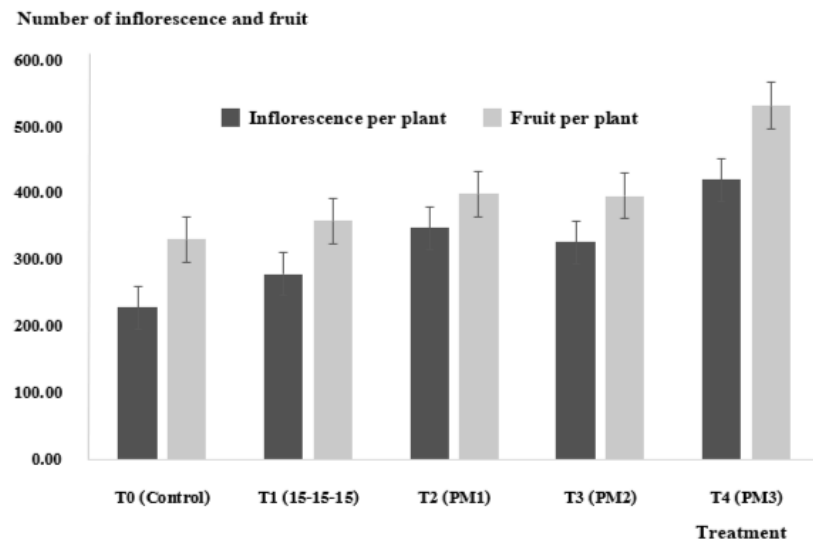


Figure 2 Analysis of Inflorescence and fruit per plant of mango

Table 6 Quantity of Inflorescence and fruit per plant of mango after the experiment

Treatments	Inflorescence per plant	Fruit per plant
T0 (Control)	229.50 ^b ±8.51	331.75 ^b ±4.65
T1 (15-15-15)	280.00 ^{ab} ±7.32	359.00 ^{ab} ±7.63
T2 (PM1)	348.25 ^{ab} ±8.91	399.75 ^{ab} ±9.35
T3 (PM2)	327.25 ^{ab} ±5.23	396.75 ^{ab} ±9.94
T4 (PM3)	421.00 ^a ±8.93	532.25 ^a ±5.83
F-Test	*	*
%CV	14.49	2.10

* = Significant difference at probability level 0.05

4. สรุป

ปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในใบพืชมีค่าสูงสุดในกรรมวิธี T4(PM3) เท่ากับ 0.18% นอกจากนี้ยังพบว่า กรรมวิธี T4(PM3) มีจำนวนช่อดอกต่อต้นสูงสุด เท่ากับ 421 ช่อ และจำนวนติดผลต่อต้นสูงสุด เท่ากับ 532.25 ผล แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Control) ซึ่งมีจำนวนช่อดอกต่อต้นเท่ากับ 229.50 ช่อ และการติดผลต่อต้น เท่ากับ 331.75 ผล แสดงให้เห็นว่าวัสดุปลูกสูตรผสม PM มีการเติมธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของมะม่วง มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในดิน โดยเฉพาะในสูตรจะมีธาตุฟอสฟอรัสที่มะม่วงใช้ในการออกดอกติดผล ทำให้มีผลในการเพิ่มการสะสมฟอสฟอรัสในใบพืช มีผลต่อการการสังเคราะห์แสง สร้างเอนไซม์ที่ช่วยเสริมสร้างส่วนที่เป็นดอก การผสมเกสรติดดอกออกผล นอกจากนี้ในวัสดุปลูกสูตรผสม PM ยังมีส่วนผสมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ (EM) สารสกัดสมุนไพร สารปรับสภาพดิน สารเสริมภูมิคุ้มกันโรคพืช สารควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร จึงเป็นสารที่ละลายช้าทำให้มะม่วงได้ธาตุอาหารอย่างเต็มประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตนครสวรรค์ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ธาตุอาหารพืช

6. เอกสารอ้างอิง

- Aranyakanon, S. 2015. Comparison of Soil Nutrient Content and Yield components in Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) Chiang Mai 60 and SJ.5 Cultivars under Different levels of Atmospheric Temperature. Bachelor of Science (Natural Resources and Environment), Naresuan University. (in Thai)
- Hesse, P.R. 1971. Phosphorus, pp. 255-300. In Tinker, P.B., Tinsley, S.J. and Parsons, J.W., eds. **A text book of soil chemical analysis**. John Murray, London.

- Intanon, P. 2010. **Advanced Fertilizer Technology**. Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok. (in Thai)
- Intanon, P. 2013. The influence of different types of fertilizer on productivity and quality of maize in the area of Kwaew Noi Bamrungdan dam, Phitsanulok province, Thailand. **International Journal of Engineering Research and Development** 4(2): 15-20.
- Intanon, P. Sawamichai, R. and Kluayngern, B. 2011. Development of compound granular organic fertilizer for lower cost of rice production. **Naresuan University Journal** 19(3): 60-70. (in Thai)
- Office of Agricultural Economics. 2017. **Economic analysis of important agricultural products in Phitsanulok Province**. Office of Agricultural Economics. Available Source: <https://oaezone.oae.go.th>, December 16, 2023. (in Thai)
- Osodsapa, Y. 2015. **Plant nutrition** (4th ed). Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Panyaying, C., Kanna, M. and Somnam, S. 2017. The determination of available phosphorus in soils using an economic hydrodynamic sequential injection system. **Thai Science and Technology Journal** 25(1): 124-136. (in Thai)

Research Article

การเพิ่มประสิทธิภาพการขยายพันธุ์ขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 ในหลอดทดลอง

Optimization of *In Vitro* Propagation of *Curcuma longa* Linn. var. Trang 1

สกุลรัตน์ หายศึก *, พรศิลป์ สีเผือก และ ปิติพัฒน์ บุตรโครต

Sakulrat Hansuek *, Pornsil Seephueak and Pitipat Bootkote

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110

Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thung Song, Nakhon Si Thammarat 80110, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-06-04

Revised: 2024-08-27

Accepted: 2024-09-06

Keywords:

turmeric;
tissue culture;
acclimatization

Trang 1 turmeric, commonly known as golden turmeric, is grown extensively in Nakhon Si Thammarat province due to its high live weight of 2.23 tons per rai. It is resistant to bacterial wilt disease and contains an average of 10.62% curcuminoids and 7.99% essential oils, making it quite popular. As a result, output is insufficient to satisfy market demand, and there is a shortage of good-quality plants for cultivation. Therefore, the objective of this study is to propagate the turmeric cv. Trang 1 *in vitro* to produce large numbers in a short time. Apical shoot induction was studied using bud fragments from turmeric rhizomes. The experimental design was a completely randomized design (CRD). Shoots were surface sterilized and cultured on Murashige and Skoog (MS) with benzyladenine (BA) concentrations of 1, 2, 3, 4, and 5 mg/L for 3 months. It was found that turmeric shoots cultured on MS medium supplemented with 1 mg/L of BA produced the highest number of shoots at 7.60 shoots per explant, shoot height at 6.00 cm, and 4.80 leaves per plant. For root induction, apical shoots were cultured on medium for 3 months. The experimental design was a 7x2 factorial CRD with 2 factors: factor A was naphthylacetic acid (NAA) concentration (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 mg/L) and factor B was with or without 0.2% of activated charcoal. It was found that MS medium supplemented with 2 mg/L NAA produced the maximum root number at 11.80 roots per plantlet and a root length of 7.40 cm. Turmeric plantlets with healthy roots were transplanted to a nursery in greenhouses with approximately 50% light penetration for one month. The results showed that the turmeric plants had an 80% survival rate and could rapidly grow into vigorous plants. As a result, turmeric propagation by tissue culture is another way to increase the quantity of turmeric plants commercially to obtain large quantities that are consistent and sufficient to meet demand.

* Corresponding author.

E-mail address: Sakulrat.s@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Hansuek, S., Seephueak, P. and Bootkote, P. 2025. Optimization of *In Vitro* Propagation of *Curcuma longa* Linn. var. Trang 1. **Recent Science and Technology** 17(3): 261510.

บทคัดย่อ

ขมิ้นชันสายพันธุ์จริง 1 หรือที่รู้จักกันคือ ขมิ้นทอง เป็นขมิ้นที่มีการปลูกกันอย่างแพร่หลายในจังหวัดนครราชสีมา เนื่องจากให้น้ำหนักสดสูงถึง 2.23 ตันต่อไร่ ทนทานต่อโรคเหี่ยวที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย ให้สารสำคัญเคอร์คูมินอยด์เฉลี่ย 10.62 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันหอมระเหยเฉลี่ย 7.99 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้ผลผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด และขาดแคลนต้นพันธุ์คุณภาพดีที่จะนำมาปลูก ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อขยายพันธุ์ขมิ้นชันสายพันธุ์จริง 1 เพื่อให้ได้ปริมาณมากภายในระยะเวลาอันสั้นจากการเพาะเลี้ยงในหลอดทดลอง การศึกษาการชักนำยอดจากการเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนหน่อจากเหง้าขมิ้นชัน วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยนำหน่อมาฟอกฆ่าเชื้อ และวางเลี้ยงบนอาหารสูตร Murashige and Skoog (MS) เติมน้ำมันเบนซิลอะดิวซีน (BA) ความเข้มข้น 1 2 3 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 เดือน พบว่า การวางเลี้ยงหน่อขมิ้นชันบนอาหารสูตร MS เติมน้ำมันเบนซิลอะดิวซีน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมในการชักนำยอด โดยให้จำนวนยอดสูงสุด 7.60 ยอดต่อชิ้นส่วน ความสูงยอด 6.00 เซนติเมตร และจำนวนใบ 4.80 ใบต่อต้น สำหรับการชักนำราก นำชิ้นส่วนยอดมาเพาะเลี้ยงบนอาหาร เป็นเวลา 3 เดือน โดยวางแผนการทดลองแบบ 7x2 Factorial in CRD มี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A ระดับความเข้มข้นของ Naphthylacetic acid (NAA) (0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ ปัจจัย B การเติมหรือไม่เติมผงถ่าน ความเข้มข้น 0.2% พบว่า อาหารสูตร MS เติมน้ำมันเบนซิลอะดิวซีน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสูตรที่เหมาะสมในการชักนำราก โดยให้จำนวนรากสูงสุด 11.80 รากต่อต้น และความยาวรากสูงสุด 7.40 เซนติเมตร ต้นกล้าขมิ้นชันที่มีรากสมบูรณ์แข็งแรงย้ายไปอนุบาลในโรงเรือนพรางแสง 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 เดือน พบว่า ต้นขมิ้นชันมีอัตราการรอดชีวิต 80 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเจริญเติบโตเป็นต้นที่สมบูรณ์และแข็งแรงได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการขยายพันธุ์ขมิ้นชันด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจึงเป็นอีกแนวทางในการเพิ่มปริมาณต้นพันธุ์ขมิ้นชันในเชิงการค้าเพื่อให้ได้ปริมาณมาก มีความสม่ำเสมอ และเพียงพอต่อความต้องการ

คำสำคัญ: ขมิ้นชัน, การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ, การอนุบาล

1. บทนำ

ขมิ้นชัน เป็นพืชดั้งเดิมในแถบประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ปลูกกันมากในประเทศมาเลเซีย อินเดีย ศรีลังกา ปากีสถาน และประเทศไทย จัดอยู่ในวงศ์ Zingiberaceae ชื่อวิทยาศาสตร์ *Curcuma longa* Linn. ชื่อสามัญ turmeric เป็นพืชมีอายุหลายปี มีเหง้าใต้ดินสีเหลืองอมส้ม มีกลิ่นเฉพาะ สายพันธุ์ขมิ้นชันที่นิยมปลูกในภาคใต้ เช่น ขมิ้นชันตาขุน (สุราษฎร์ธานี) ขมิ้นดวง (นครศรีธรรมราช) ขมิ้นชันสายพันธุ์จริง 1 และจริง 2 (Department of Agriculture, 2011) คนไทยนิยมใช้ขมิ้นชันในการปรุงอาหาร รวมถึงใช้แต่งอาหารให้มีสีเหลือง (Sukontharat, 2015) นอกจากนี้ยังใช้เป็นสมุนไพรแก้ท้องอืด ท้องเฟ้อ แก้อาการท้องเสีย ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Helicobacter pylori* ในกระเพาะอาหาร (Praditsin and Punnipa, 2011; Prucksunand, 2001) รักษาแผลเปื่อยในกระเพาะและลำไส้ (Daow Rattanachai, 2002) ลดการอักเสบชนิดเฉียบพลัน และยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา (Sincharoenpokai et al., 2009; Anis et al., 2003; Singh et al., 2002; Cikrikci et al., 2008; Subramoniam et al., 2013) มีฤทธิ์ต้านมะเร็งผิวหนัง แก้อาการคัน รักษาแผลพุพอง แก้อาการแพ้เนื่องจากแมลงกัดต่อย ใช้ในการสมานแผล การดูแลผิวพรรณ (Soonthornvipat, 2022) ด้านการเกษตร ใช้กำจัดหัดกระโดด กำจัดเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคพืช (Attanon, 2015) และออกฤทธิ์โดยอ้อมในการยับยั้งเชื้อไวรัสไข้หวัดนก (Kongkathip et al., 2006) ภาคใต้นิยมนำขมิ้นชันมาใช้ในการประกอบอาหารจนกลายเป็นวิถีพื้นบ้าน โดยเฉพาะจังหวัดนครศรีธรรมราชซึ่งขึ้นชื่อในเรื่องของเครื่องแกง โดยขมิ้นชันเป็นวัตถุดิบหนึ่งที่สำคัญในการผลิต อีกทั้งในปัจจุบันมีการใช้สมุนไพร

ในการกระตุ้นภูมิคุ้มกัน เพื่อป้องกันเชื้อไวรัสโควิด 19 ทำให้ราคาขมิ้นพุ่งสูงขึ้น ส่งผลให้ขมิ้นชันที่ผลิตได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด

กระบวนการผลิตขมิ้นชันในพื้นที่ภาคใต้นั้นมักประสบปัญหาที่สำคัญคือ โรคเหี่ยวหรือเหง้าเน่าจากเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ซึ่งเป็นเชื้อสาเหตุก่อโรคพืชในดิน และส่งผลให้เหง้าพันธุ์ดีเสียหาย สภาพอากาศร้อนชื้น ฝนตกชุกและต่อเนื่องเป็นสภาพที่เอื้อต่อการระบาดของโรคและสร้างความเสียหายทั่วทั้งแปลงปลูก หากระบาดรุนแรงจะไม่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ โดยทั่วไปเกษตรกรมักขยายพันธุ์ขมิ้นชันจากชิ้นส่วนเหง้าและแง่ง ซึ่งใช้ระยะเวลาในการปลูก 10-12 เดือน ซึ่งจะได้เพียงปีละหนึ่งครั้งเท่านั้น ให้ผลผลิตอยู่ที่ 1,950-2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ปริมาณขมิ้นชันพันธุ์ดีไม่เพียงพอต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม อีกทั้งขมิ้นชันมีโรคที่สำคัญคือ โรคหัวเน่า โรคเหง้า และรากเน่า ซึ่งเกิดจากเชื้อแบคทีเรีย โรคใบจุดเกิดจากเชื้อรา โรคที่พบนี้มักจะติดมากับเหง้าพันธุ์ เมื่อนำไปปลูกจะทำให้เกิดโรคระบาดก่อให้เกิดความสูญเสียของผลผลิต นอกจากนี้ยังทำให้คุณภาพของสรรพคุณทางยาลดลงอีกด้วย

ปัจจุบันมีการนำเทคนิคการขยายพันธุ์ด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชมาใช้อย่างกว้างขวาง เพราะสามารถผลิตต้นพันธุ์ที่ปลอดโรคได้จำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น (Nuanbunruang et al., 2019) มีรายงานการขยายพันธุ์พืชในตระกูลเดียวกับขมิ้นมากมาย ดังรายงานของ Shukla et al. (2007) ทำการเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนปลายยอดของต้นกระเจียว (*Curcuma angustifolia* Roxb.) บนอาหารสูตร MS เติมน้ำมันเบนซิลอะดิวซีน 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 6 สัปดาห์ สามารถส่งเสริมการเกิดยอดสูงสุด 80 เปอร์เซ็นต์

และมีจำนวนยอดสูงสุดเพียง 1.87 ยอดต่อชิ้นส่วน Shrama and Raina (2013) เพาะเลี้ยงชิ้นส่วนปลายยอดของขมิ้นชันบนอาหารสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าให้เกิดยอดสูงสุด 88.33 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนยอดเฉลี่ยสูงสุด 2.3 ยอดต่อชิ้นส่วน นอกจากนี้มีงานวิจัยการขยายพันธุ์ขมิ้นชันในหลอดทดลองมากมาย แต่จำนวนต้นที่ขยายพันธุ์ได้ยังมีปริมาณน้อย (Shaqufta *et al.*, 2009; Goyal *et al.*, 2010; Jala, 2012) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะเพิ่มปริมาณยอดของขมิ้นชันให้ได้ปริมาณมาก รวมถึงการชักนำรากและอนุบาลต้นกล้า เพื่อเป็นแนวทางในการขยายพันธุ์ขมิ้นชันให้ได้ต้นที่ปลอดโรคและเพียงพอต่อความต้องการของตลาด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาความเข้มข้นของ BA ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณยอดของขมิ้นชัน

นำชิ้นส่วนแ่งของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 อายุ 9 เดือน จากสวนเกษตรกร หมู่ที่ 2 บ้านร่อนนา ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่เริ่มออกหน่ออ่อน (ยอดอ่อน) มาตัดแต่งและล้างด้วยน้ำยาล้างจาน จากนั้นจุ่มแช่แอลกอฮอล์ 70% เป็นเวลา 30 วินาที และฟอกฆ่าเชื้อด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 20% เป็นเวลา 25 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นหนึ่งฆ่าเชื้อ 3 ครั้ง ภายในตู้ยาล้าง แล้วตัดแต่งชิ้นส่วนยอดให้มีขนาด 1 เซนติเมตร มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 0 1 2 3 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH เป็น 5.7 จากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ให้แสง 14 ชั่วโมงต่อวัน ความเข้มแสง 25 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 3 เดือน บันทึกจำนวนยอด ความสูงต้น และจำนวนใบ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) แต่ละสิ่งทดลองทำ 10 ซ้ำ ๆ ละ 5 ขวด (1 ขวด เพาะเลี้ยง 1 ชิ้นส่วน)

2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาความเข้มข้นของ NAA และผงถ่านต่อการชักนำรากของขมิ้นชัน

นำชิ้นส่วนยอดขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 มาวางเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม NAA ความเข้มข้น 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมและไม่เติมผงถ่าน 0.2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ให้แสง 14 ชั่วโมงต่อวัน ความเข้มแสง 25 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 3 เดือน บันทึกจำนวนรากต่อต้น และความยาวราก โดยวางแผนการทดลองแบบ Factorial ใน CRD เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT แต่ละสิ่งทดลองทำ 10 ซ้ำ ๆ ละ 5 ขวด (1 ขวด เพาะเลี้ยง 1 ชิ้นส่วน)

2.3 การทดลองที่ 3 การอนุบาลต้นกล้าที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

นำต้นขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 ที่เกิดราก ต้นมีความสมบูรณ์แข็งแรง ความสูง 10 เซนติเมตร ที่ได้จากการชักนำรากเป็นเวลา 3 เดือน มาล้างวันออกตัดใบออกบางส่วนแล้วจุ่มแช่รากในยาถอนราเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นฝังลงให้แห้ง และนำไปปลูกในกระถางที่มีส่วนผสมของดิน ขี้เถ้าแกลบ และขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 1:1:1 นำไปอนุบาลในโรงเรือนเพาะชำด้วยการพรางแสง 50 เปอร์เซ็นต์ รดน้ำทุกวัน ๆ ละ 1 ครั้ง ในช่วงเช้า บันทึกอัตราการรอดชีวิต หลังจากอนุบาลเป็นเวลา 1 เดือน

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของความเข้มข้นของ BA ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณยอดของขมิ้นชัน

จากการวางเลี้ยงชิ้นส่วนยอดขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ยอดเริ่มมีการตอบสนองต่ออาหาร โดยมีการพัฒนาของยอดที่วางเลี้ยงจากสีขาวเปลี่ยนเป็นสีเขียว และเจริญไปเป็นต้นใหม่ โดยการวางเลี้ยงชิ้นส่วนยอดบนอาหารสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ขมิ้นชันมีการสร้างยอดสูงสุด 7.60 ยอดต่อชิ้นส่วน (Table 1) แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$) กับอาหารสูตรอื่น ๆ ซึ่งให้การสร้างยอดอยู่ในช่วง 4.15-5.20 ยอดต่อชิ้นส่วน ในขณะที่ความสูงต้น และจำนวนใบ ในทุกสูตรอาหารไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (Table 1) ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ BA ไม่มีผลต่อความสูงต้นและจำนวนใบของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 ลักษณะการเกิดยอดใหม่ของขมิ้นชัน หลังวางเลี้ยงบนอาหารสูตรต่าง ๆ เป็นเวลา 3 เดือน พบว่า อาหารทุกสูตรสามารถให้การสร้างยอดรวมได้ โดยต้นใหม่ที่โตมีลำต้น และใบสีเขียว มีลักษณะปกติ (Figure 1)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าอาหารสูตร MS เติม BA ความเข้มข้นเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถส่งเสริมให้ขมิ้นชันมีจำนวนยอดสูงถึง 7.60 ยอดต่อชิ้นส่วน ความสูงต้น 6.00 เซนติเมตร และจำนวนใบ 4.80 ใบต่อต้น สอดคล้องกับการเพาะเลี้ยงขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 และ 2 โดยใช้สารควบคุมการเจริญเติบโต 4 ชนิดคือ BA, Kinetin, Isopentenyl (2-iP) และ Thidiazuron (TDZ) แล้วพบว่าการเติมไซโตไคนินทั้ง 4 ชนิดให้จำนวนต้นที่เกิดใหม่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยให้จำนวนต้นเฉลี่ย 4-5 ต้น (Vanitchananan *et al.*, 2018) แต่เมื่อพิจารณาราคาของสารเคมีเพื่อลดต้นทุน สำหรับการผลิตทางพาณิชย์ จึงแนะนำการใช้ BA ที่มีราคาถูก (Plant Tissue Culture Supplies by SAC SCI-ENG, 2024) ในขณะที่มีรายงานการเพาะเลี้ยงขมิ้นชันสายพันธุ์ Salem โดยเพาะเลี้ยงยอดบนอาหารสูตร MS เติม 6-Benzylaminopurine (BAP) ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับอะดินีนซัลเฟต ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และกรด

แอสคอร์บิก ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการชักนำยอด เริ่มต้น แล้วจึงย้ายไปยังอาหารชักนำยอดรวมสูตร MS เติม BAP ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ IAA ความเข้มข้น 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีการใช้สารเคมีหลายชนิด เสียค่าใช้จ่ายมากกว่า แต่ให้จำนวนยอดไม่ต่างกันมากคือ 9.85 ยอดต่อชิ้นส่วน (Sinchana *et al.*, 2020) นอกจากนี้ยังมีรายงานการเพาะเลี้ยง ชิ้นส่วนยอดของขมิ้นชันบนอาหารสูตร Woody plant medium (WPM) เติม BAP ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ NAA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้จำนวนยอด 6.7 ยอดต่อชิ้นส่วน (Nasirujjaman *et al.*, 2005) ซึ่งมีการใช้สารมากกว่า แต่ให้จำนวน ยอดน้อยกว่า จากการทดลองสามารถลดขั้นตอนการชักนำยอด เริ่มต้นและยอดรวม เป็นการชักนำการเพิ่มปริมาณยอด นอกจากนี้

ยังมีรายงานการเพาะเลี้ยงปลายยอดกระเจียวบนอาหารสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ให้จำนวนยอดเฉลี่ย เพียง 1.87 ยอดต่อชิ้นส่วน (Shukla *et al.*, 2007) ซึ่งมีการใช้ BA ในความเข้มข้นที่สูงกว่า แต่ได้จำนวนยอดที่น้อยกว่า ในการชักนำ ยอดบนอาหารเป็นเวลา 3 เดือน อาจเป็นไปได้ว่าเป็นพืชคนละชนิด กันจึงตอบสนองต่อสารควบคุมการเจริญเติบโตในปริมาณที่ แตกต่างกัน โดย BA จะช่วยกระตุ้นการแตกยอดใหม่ เพิ่มจำนวน ของยอดใหม่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของยอด ช่วยกระตุ้นการ ขยายตัวและการเติบโตของยอด ทำให้ยอดมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว ทั้งนี้การใช้ BA อย่างเหมาะสมจะช่วย เพิ่มประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของยอดและการผลิตพืช ได้มากขึ้น (Angus and Michael, 2003)

Table 1 Effect of BA concentrations on shoot induction of *Curcuma longa* Linn. var. Trang 1 after culturing on MS medium for 3 months

BA concentrations (mg/L)	Number of shoots (shoots/explant)	Height (cm)	Number of leaves (leaves/explant)
0 mg/L BA	4.15 ^{b1/}	4.90	4.10
1 mg/L BA	7.60 ^a	6.00	4.80
2 mg/L BA	5.20 ^b	5.50	4.10
3 mg/L BA	5.20 ^b	5.30	4.70
4 mg/L BA	5.10 ^b	5.30	4.50
5 mg/L BA	5.10 ^b	4.70	4.50
F-test	**	ns	ns
C.V. (%)	11.04	19.22	13.81

ns = Not significant differences at $p > 0.05$ level.

** = Significant differences at $p \leq 0.01$ level.

^{1/} = Values followed by different letters are significantly different according to DMRT.

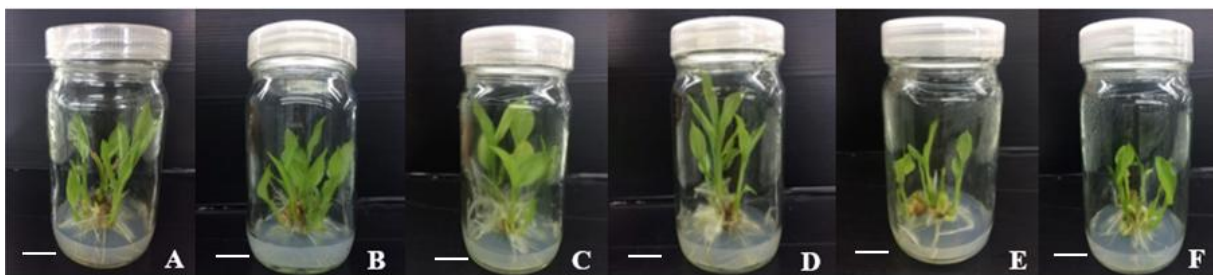


Figure 1 Characteristics of shoot induction of *Curcuma longa* L. var. Trang 1 after culturing on MS medium supplemented with different concentrations of BA for 3 months (A) 0 mg/L (B) 1 mg/L (C) 2 mg/L (D) 3 mg/L (E) 4 mg/L (F) 5 mg/L (bar = 1 cm.)

3.2 ผลของความเข้มข้นของ NAA และผงถ่านต่อการชักนำรากของขมิ้นชัน

เมื่อเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนยอดของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 บนอาหารสูตร MS เต็ม NAA ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้การสร้างรากเฉลี่ยสูงสุด 11.55 รากต่อต้น (Table 2) แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$) กับอาหารที่เติม NAA ความเข้มข้นอื่น ๆ (Table 2) การเติมและไม่เติมผงถ่านให้จำนวนรากของขมิ้นชัน แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$) อาหารที่ไม่เติมผงถ่านให้จำนวนรากมากกว่าอาหารที่เติมผงถ่าน โดยให้จำนวนรากเฉลี่ย 9.76 และ 8.84 รากต่อต้น ตามลำดับ แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$) เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างสูตรอาหารและการเติมผงถ่าน พบว่า ทั้งสองปัจจัยมีผลต่อจำนวนรากของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p \leq 0.01$) โดยการชักนำรากบนอาหารสูตร MS เต็ม NAA ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งที่ไม่เติมและไม่เติมผงถ่านให้จำนวนรากสูงสุด 11.80 และ 11.30 รากต่อต้นตามลำดับ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่แตกต่างกันทางสถิติ

อย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับอาหารสูตรอื่น ๆ ดังนั้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าอาหารเพาะเลี้ยง ในการชักนำรากของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 จึงไม่จำเป็นต้องเติมผงถ่าน

ความยาวรากของขมิ้นชันจากการชักนำบนอาหารสูตร MS เต็ม NAA เข้มข้น 2.5 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ความยาวรากเฉลี่ยสูงสุด 7.60 และ 7.10 เซนติเมตร ตามลำดับ (Table 3) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$) กับการเติม BA ที่ความเข้มข้นอื่น ๆ การชักนำรากบนอาหารที่ไม่เติมผงถ่านให้ความยาวรากมากกว่าอาหารที่เติมผงถ่านซึ่งให้ความยาวรากเฉลี่ย 6.45 และ 5.08 เซนติเมตร ตามลำดับ แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$) เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างสูตรอาหารและวิธีการชักนำราก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความยาวรากของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p \leq 0.01$) โดยการชักนำรากบนอาหารสูตร MS เต็ม NAA ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่เติมผงถ่านให้ความยาวรากสูงสุด 8.60 เซนติเมตร แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับอาหารสูตรอื่น ๆ

Table 2 Effects of NAA concentrations with or without activated charcoal (AC) on the number of roots after culturing on MS medium for 3 months

NAA concentrations (mg/L)	Number of roots (roots/plantlet)		Average ^A NAA concentration
	With AC	Without AC	
0 mg/L NAA	7.40 ^{f1/}	8.50 ^e	7.95E
0.5 mg/L NAA	8.60 ^e	8.50 ^e	8.55D
1.0 mg/L NAA	8.70 ^{de}	9.40 ^{cd}	9.05CD
1.5 mg/L NAA	10.50 ^b	10.30 ^{bc}	10.40B
2.0 mg/L NAA	11.30 ^{ab}	11.80 ^a	11.55A
2.5 mg/L NAA	9.20 ^d	10.00 ^c	9.60C
3.0 mg/L NAA	6.20 ^g	9.80 ^{cd}	8.00D
Average ^B with or without AC	8.84B	9.76A	
A	**		
B	**		
A*B	**		
C.V.(%)	14.34		

** = Significant differences at $P \leq 0.01$ level.

^{1/} = Values followed by different letters are significantly different according to DMRT.

Table 3 Effects of NAA concentrations and with or without AC on root length after culturing on MS medium for 3 months

NAA concentrations (mg/L)	Root length (cm)		Average ^A NAA concentration
	With AC	Without AC	
0 mg/L NAA	3.50 ^{e1/}	4.40 ^d	3.95D
0.5 mg/L NAA	3.20 ^e	4.20 ^{de}	3.70D
1.0 mg/L NAA	4.50 ^{de}	7.00 ^{bc}	5.75C
1.5 mg/L NAA	4.60 ^d	6.40 ^{cd}	5.50C
2.0 mg/L NAA	6.80 ^c	7.40 ^b	7.10A
2.5 mg/L NAA	6.60 ^{cd}	8.60 ^a	7.60A
3.0 mg/L NAA	6.40 ^{cd}	7.20 ^{bc}	6.80B
Average ^B with or without AC	5.08B	6.45A	
A	**		
B	**		
A*B	**		
C.V.(%)	8.43		

** = Significant differences at $P \leq 0.01$ level.

^{1/} = Values followed by different letters are significantly different according to DMRT.

จากการทดลองพบว่า สูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการสร้างรากของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 คือสูตร MS เติม NAA ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถสร้างรากได้ 11.80 รากต่อต้น และความยาวราก 7.40 เซนติเมตร ในขณะที่ Sukontharat (2015) วางเลี้ยงชิ้นส่วนยอดของขมิ้นชันบนอาหารสูตร MS เติม NAA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้จำนวนยอด 3.59 ยอดต่อชิ้นส่วน และจำนวนรากถึง 19.75 รากต่อชิ้นส่วน และ Nasri *et al.* (2013) รายงานการชักนำรากจากชิ้นส่วนยอดที่พัฒนามาจากการวางเลี้ยงฐานใบของ *Alstroemeria ligto* บนอาหารสูตร MS เติม NAA ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้การเกิดรากเพียง 2.75 รากต่อชิ้นส่วน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสถานะของเนื้อเยื่อที่ถูกกระตุ้นต่างกัน โดยการเจริญเติบโตของรากจะมีความแตกต่างกันระหว่างเนื้อเยื่อที่ยังไม่เจริญเติบโต (เพิ่งมีการพัฒนาเป็นต้นกล้า) และเนื้อเยื่อที่อยู่ในระยะการเจริญเติบโตแล้ว (เป็นต้นกล้าที่สมบูรณ์) ซึ่งจากการทดลองมีการใช้เนื้อเยื่อที่เพิ่งมีการพัฒนาเป็นยอด อาจต้องใช้ปริมาณ NAA ที่สูงกว่าเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสร้างราก ทั้งนี้ ออกซินมีผลต่อการเจริญเติบโตและการสร้างรากของพืช โดย NAA ช่วยกระตุ้นการแบ่งเซลล์ในเนื้อเยื่อที่ต้องการสร้างราก ซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของเซลล์ในพื้นที่นั้น ๆ ช่วยให้เซลล์ขยายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้รากเจริญเติบโตได้เร็วและแข็งแรง และส่งเสริมการก่อดวงของท่อรากในเนื้อเยื่อพืช และช่วยกระตุ้นให้เซลล์ที่อยู่ในเนื้อเยื่อที่กำลังพัฒนานั้นเริ่มต้นการสร้างรากขึ้น (Taiz *et al.*, 2015) นอกจากนี้พืชแต่ละชนิดจะตอบสนองต่อชนิดของออกซินแตกต่างกัน

ไป Sinchana *et al.* (2020) รายงานการชักนำรากของขมิ้นชันโดยใช้สาร IBA ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการเติมผงถ่าน จึงสามารถให้การสร้างรากได้ โดยให้การสร้างรากเพียง 2.70 รากต่อต้น อย่างไรก็ตาม พืชต่างชนิดกันต้องการชนิดและระดับความเข้มข้นของออกซินต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างในโครงสร้างของฮอร์โมนที่รับรู้และการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการตอบสนองต่อออกซินต่างกัน ทั้งนี้หากไม่มีการเติมออกซินก็จะมี การสร้างราก แต่พืชบางชนิดไม่จำเป็นต้องเติมออกซินก็สามารถสร้างรากเองได้

3.3 การอนุบาลต้นกล้าที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

จากการอนุบาลต้นกล้าขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 เป็นเวลา 2 เดือน พบว่า ต้นขมิ้นชันมีอัตราการรอดชีวิต 80 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะต้นสมบูรณ์มีการเจริญเติบโตทั้งด้านความสูง จำนวนใบ และมีพื้นที่ใบเพิ่มมากขึ้น (Figure 2) จากการศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุปลูกได้แก่ ดิน ขี้เถ้าแกลบ และขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 1:1:1 ถือเป็นวัสดุปลูกที่สามารถช่วยให้พืชมีการเจริญเติบโตได้ดี ในขณะที่ Ghosh and Chatterjee (2013) ย้ายปลูกต้นขมิ้นชันในกระถางที่บรรจุดินและเวอมิกูลในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 เป็นเวลา 30 วัน จากนั้นย้ายปลูกลงในกระถางพลาสติก เป็นเวลา 2 สัปดาห์ วางเลี้ยงในโรงเรือนกระจก มีอัตราการรอดชีวิต 86 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใช้วัสดุปลูกที่ค่อนข้างแพง แต่ให้อัตราการรอดชีวิตที่ไม่แตกต่างกันมาก และ Shaqufta *et al.* (2009) รายงานการย้ายปลูกต้นกล้า

ขมิ้นชันที่สมบูรณ์ลงปลูกในกระถางบรรจุดิน ทรา และขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1:1 วางอนุบาลในเรือนกระจกนาน 30-50 วัน จากนั้นย้ายปลูกลงในแปลงปลูกเป็นเวลา 2 สัปดาห์ มีอัตราการรอดชีวิต 70-80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีการใช้วัสดุปลูกต่างกัน และมีขั้นตอนที่มากกว่า แต่ให้เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตไม่ต่างกัน โดยในช่วงแรกของการอนุบาล เป็นช่วงที่มีความสำคัญกับพืชที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ เพราะพืชมีความอ่อนแอ จำเป็นต้องอาศัยการปรับตัวกับสภาพแวดล้อมใหม่ เมื่อตั้งตัวได้พืชจะมีการเจริญเติบโตได้เหมือนพืชทั่วไปที่อยู่นอกหลอดทดลอง รวมถึงการเลือกวัสดุปลูกถือว่ามีความสำคัญสำหรับการรอดชีวิตและการเจริญเติบโตของพืชที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในหลอดทดลองเป็นอย่างมาก



Figure 2 Acclimatization of *Curcuma longa* L. var. Trang 1 in a greenhouse (A) initiation for 1 week (B) 2 months and (C) 3 months (bar = 2.5 cm.)

4. สรุป

อาหารสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณยอดของขมิ้นชัน โดยสามารถชักนำการสร้างยอดสูงสุด 7.60 ยอดต่อชิ้นส่วน ความสูงต้น 6.00 เซนติเมตร และจำนวนใบ 4.80 ใบต่อต้น

อาหารสูตร MS เติม NAA ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่เติมผงถ่าน เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการชักนำรากของขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 ในหลอดทดลอง โดยส่งเสริมให้มีการสร้างรากสูงสุด 11.80 รากต่อต้น และความยาวราก 7.40 เซนติเมตร

ต้นขมิ้นชันที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่มีระบบรากสมบูรณ์แข็งแรง สามารถนำมาอนุบาลในกระถางที่มีส่วนผสมของดิน ขี้เถ้าแกลบ และขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 1:1:1 อนุบาลเป็นเวลา 1 เดือน ต้นขมิ้นชันสายพันธุ์ตรัง 1 มีอัตราการรอดชีวิตถึง 80 เปอร์เซ็นต์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ 2566 ประเภททุนวิจัยพื้นฐาน คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยวิจัยไม้ผลและไม้ยืนต้น สาขาพืชศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Angus, W.T. and Michael, T.L. 2003. **The Cytokine Handbook**. ScienceDirect, USA.
- Anis, M., Faisal, M. and Singh, S.K. 2003. Micropropagation of mulberry (*Morus alba* L.) through *in vitro* culture of shoot tip and nodal explants. **Plant Tissue Culture** 13(1): 47-51.
- Attanon, P. 2015. **Research Report on Research and Development on Utilization of Medicinal Plants as Natural**. Department of Agriculture, Bangkok. (in Thai)
- Cikrikci, S., Mozioglu, E. and Yilmaz, H. 2008. Biological activity of curcuminoids isolated from *Curcuma longa* L. **Reccord of Natural Products** 2(1): 19-24.
- Daow Rattanachai, S. 2002. Turmeric and the treatment of stomach ulcers. **Medicinal plant newsletter** 19(4): 12-16.
- Department of Agriculture. 2011. **Turmeric: Steps to follow in producing turmeric**. Available Source: <http://www.kstation.tv>, August 16, 2022. (in Thai)
- Ghosh, A. and Chatterjee, P. 2013. A protocol for rapid propagation of genetically true to type Indian Turmeric (*Curcuma longa* L.) through *in vitro* culture technique. **Advances in Applied Science Research** 4(3): 39-45.
- Goyal, A.K., Ganguly, K., Mishra, T. and Sen, A. 2010. *In vitro* multiplication of *Curcuma longa* Linn. an important medicinal zingiber. **NBU Journal of Plant Sciences** 4(1): 21-24.
- Jala, A. 2012. Effects of NAA BA and sucrose on shoot induction and rapid micropropagation by trimming shoot of *Curcuma longa* L. **Thammasat International Journal of Science and Technology** 17(4): 54-60.
- Kongkathip, N., Chanin T., Sirirak, C., Taweesak, S. and Panthit, M. 2006. **Development of turmeric and Yanphamo herbal extracts to combat bird flu**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Nasirujaman. K., Salah Uddin, M., Zaman, S. and Reza, M.A. 2005. Micropropagation of Turmeric (*Curcuma longa* Linn.) through *in vitro* Rhizome Bud Culture. **Journal of Biological Sciences** 5(4): 490-492.
- Nasri, F., Mortazavi, S.N., Ghaderi, N. and Javadi, T. 2013. Propagation *in vitro* of *Alstroemeria ligtu* hybrid through direct organogenesis from leaf base. **Journal of Horticultural Research** 21(2): 23-30.

- Nuanbunruang, P. and Apichart, C. and Pitak, P. 2019. **Plant propagation using plant tissue culture techniques.** KBS Knowledge Book Store, Bangkok. (in Thai)
- Praditsin, S. and Punnipa, S. 2011. Effect of curcuminoids from *Curcuma longa* Linn. on cellular morphology and viability of *Helicobacter pylori*. **Burapha Science Journal** 16(2): 75-82. (in Thai)
- Plant Tissue Culture Supplies by SAC SCI-ENG. 2024. **Cytokinin.** Available Source: www.ptcs-shop.com, August 24, 2024. (in Thai)
- Prucksunand, C. 2001. **Turmeric Research: Pioneer at Faculty of Medicine Siriraj Hospital.** TW System, Bangkok. (in Thai)
- Shaqufta, N., Saiga, I., Sumera, J. and Aamir, A. 2009. *In vitro* clonal multiplication and acclimatization of different varieties of Turmeric (*Curcuma longa* L.). **Pakistan Journal of Botany** 41(6): 2807-2816.
- Shrama, S.K. and Raina, V. 2013. *In vitro* protocol standardization for turmeric in Jammu division. **Journal of Biotechnology Research Center** 8(3): 55-57.
- Shukla, S.K., Susmita, S., Vijaya, K. and Mishra, S.K. 2007. *In vitro* propagation of tikhur (*Curcuma angustifolia* Roxb.) a starch yielding plant. **Indian Journal of Biotechnology** 6(2): 274-276.
- Sinchana, N.S., Kattimani, K.N., Prabhuling, G., Sudesh, K. and Jagadeesha, N. 2020. Standardization of tissue culture protocol for turmeric (*Curcuma longa* L.) cv. Salem. **International Journal of Chemical Studies** 8(1): 2721-2726.
- Sincharoenpokai, P., Ong-ard, L., Patcharee, S., Ngampong, K., Suriyan, S. and Boonsong, K. 2009. Inhibitory effects of Turmeric (*Curcuma longa* Linn.) extracts on some human and animal pathogenic bacteria, pp. 244-253. *In 47th Kasetsart University Annual Conference: Science.* Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Singh, R., Chandra, R., Bore, M. and Luthra, P.M. 2002. Antibacterial activity of *Curcuma longa* rhizome extract on pathogenic bacteria. **Current Science** 83(6): 737-740.
- Soonthornvipat, T. 2022. Effect of aloe vera and turmeric essential oil coating on storage shelf-life and postharvest quality of strawberry cv. No. 80. **Udonthani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology** 10(1): 73-88. (in Thai)
- Subramoniam, A., Madhavachandran, V. and Gangaprasad, A. 2013. Medicinal plants is the treatment of arthritis. **Annals of Phytomedicine an International Journal** 2(1): 3-36.
- Sukontharat, P. 2015. *In vitro* propagation of *Curcuma longa* Linn. from *ex vitro* sprouted rhizome. Master of Science (Plant Science), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I.M. and Murphy, A. 2015. **Plant Physiology and Development** (6th ed). Sinauer Associates, Inc Publishers, Massachusetts.
- Vanitchananan, P., Supalak, A. and Ampai, S. 2018. Development of system for micropropagation of turmeric (*Curcuma longa* Linn.) using tissue culture technique, pp. 12-30. *In Plant tissue culture for propagation and crop improvement.* Department of Agriculture, Biotechnology Research and Development Office, Bangkok. (in Thai)



Research Article

การศึกษาวิธีฟอกฆ่าเชื้อผิวของกุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ (*Rosa* 'Hohoemi Rouge')

Investigation of Surface Sterilization Procedure for Japanese Mini Rose Hohoemi (*Rosa* 'Hohoemi Rouge')

ทิวธง ทองประไพ^a โรจนกร เชิงปัญญา^b และ อภิรดี เสี่ยงสืบชาติ^{c*}

Thiwthong Thongpraphai^a, Rodjanacorn Chuengpanya^b and Apiradee Siangsuepchart^{c*}

^a สาขาวิชาเกษตรป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ - แพร่ เฉลิมพระเกียรติ อำเภอวังทอง จังหวัดแพร่ 54140

^a Department of Agroforestry, Maejo University Phrae Campus, Rong Kwang, Phrae 54140, Thailand.

^b นักวิชาการอิสระด้านการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง 52130

^b Independent academician in plant tissue culture, Kho Kha, Lampang 52130, Thailand.

^c สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ - แพร่ เฉลิมพระเกียรติ อำเภอวังทอง จังหวัดแพร่ 54140

^c Department of Agro-Industrial Biotechnology, Maejo University Phrae Campus, Rong Kwang, Phrae 54140, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-05-23

Revised: 2024-07-12

Accepted: 2024-08-15

Keywords:

Japanese Mini Rose Hohoemi;

economic plant;

surface sterilization

Japanese Mini Rose Hohoemi or Hohoemi rose (*Rosa* 'Hohoemi Rouge') is a rose cultivar that produces blooms throughout the year. This plant is widely used ornamentally because it produces a large number of flowers per branch and its exceptional resistance to plant diseases. It is essential to adjust the number of plants in order to consistently satisfy the ornamental plant market's requirements. For this reason, tissue culture can help achieve this objective. However, no tissue culture report on Hohoemi rose has been found. Therefore, investigating a suitable surface sterilization method for achieving large numbers of *in vitro* axenic plantlets is crucial. In this current study, young branches of Hohoemi rose were subjected to four distinct procedures for surface sterilization using Hiter® or Osil® solutions. After that, nodes were subsequently excised and cultured onto Murashige and Skoog (1962) medium. The contamination-free rate of the explants and the survival rate of the sterilized explants were recorded after 4 and 8 weeks of culture, respectively. The results revealed that surface sterilization with 10% (v/v) of Osil® for 10 min of exposure time was the appropriate disinfection method. High rates of contamination-free (90%) and survival (100%) were achieved with this treatment. The results of this study will be helpful in producing large numbers of axenic cultures *in vitro* following the surface sterilization process, which will facilitate future research and the development of a successful tissue culture technique for Hohoemi rose.

* Corresponding author.

E-mail address: siangsuepchart.apiradee@gmail.com

Cite this article as:

Thongpraphai, T., Chuengpanya, R. and Siangsuepchart, A. 2025. Investigation of Surface Sterilization Procedure for Japanese Mini Rose Hohoemi (*Rosa* 'Hohoemi Rouge')

Recent Science and Technology 17(3): 263449.

บทคัดย่อ

กุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ (*Rosa 'Hohoemi Rouge'*) เป็นสายพันธุ์กุหลาบที่ออกดอกได้ตลอดทั้งปี ให้ดอกจำนวนมากต่อกิ่ง มีความทนทานต่อโรคพืช จึงเป็นพืชประดับที่ได้รับความนิยม ดังนั้นการผลิตพืชให้มีปริมาณเพียงพอเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของตลาดไม้ประดับได้อย่างสม่ำเสมอจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อสามารถตอบสนองต่อเป้าประสงค์ดังกล่าวได้ หากแต่ยังไม่พบรายงานวิจัยเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของกุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ ด้วยเหตุนี้ การศึกษาวิธีฟอกฆ่าเชื้อผิวที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ต้นพืชปลอดเชื้อในหลอดทดลองจำนวนมากจึงมีความสำคัญ งานวิจัยนี้ได้นำกิ่งอ่อนของกุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิไปฟอกฆ่าเชื้อผิวด้วยสารละลายไฮเตอร์หรือโอซิล 4 วิธี จากนั้นตัดแยกส่วนข้อไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร Murashige และ Skoog (1962) บันทึกอัตราการปลอดเชื้อของชิ้นพืชและการรอดชีวิตของชิ้นพืชปลอดเชื้อเมื่อเลี้ยงครบ 4 และ 8 สัปดาห์ ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าการฟอกฆ่าเชื้อผิวด้วยสารละลายไฮเตอร์เข้มข้น 10% (ปริมาตร/ปริมาตร) นาน 10 นาที เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษานี้ เนื่องจากพบอัตราการปลอดเชื้อ (90%) และการรอดชีวิตของชิ้นพืชที่สูง (100%) ผลจากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ฟอกฆ่าเชื้อผิวของพืชชนิดนี้ให้ได้ต้นพืชปลอดเชื้อที่รอดชีวิตปริมาณมากในระบบการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ อันจะนำไปสู่การศึกษาและพัฒนาวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของกุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ: กุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ, พืชเศรษฐกิจ, การฟอกฆ่าเชื้อผิว

1. บทนำ

กุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ (*Rosa 'Hohoemi Rouge'*) เป็นกุหลาบสายพันธุ์การค้าซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับต่อความต้องการของผู้บริโภคที่มักเปลี่ยนแปลงและมองหาสายพันธุ์ไม้ดอกไม้ประดับชนิดใหม่อยู่เสมอ พืชชนิดนี้เป็นไม้พุ่ม ใบมีสีเขียวเข้ม ดอกกระยะบานเต็มที่ (full bloom) เป็นสีชมพูเข้มขนาด 2 เซนติเมตร มีจำนวนดอกต่อกิ่งได้สูงถึง 18 ดอก และสามารถออกดอกได้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี กุหลาบพันธุ์นี้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบจุดสีดำ (*Diplocarpon rosae*) และโรคใบสนิม (*Phragmidium mucronatum*) (United States Plant Patent, 2020) ด้วยลักษณะดังกล่าวนี้จึงทำให้กุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิเป็นพืชที่ได้รับความนิยมอีกชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมไม้ดอกไม้ประดับทั่วโลก สำหรับในประเทศไทยนั้นพบการขายพืชชนิดนี้ทั้งในตลาดไม้ดอกไม้ประดับ ตลาดออนไลน์ และสื่อสังคมออนไลน์ ดังนั้น การมีปริมาณต้นพืชที่มากเพียงพอต่อการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคหรือตลาดไม้ดอกไม้ประดับได้อย่างต่อเนื่องจึงสำคัญ พืชในสกุลกุหลาบ (genus *Rosa*) นิยมขยายพันธุ์ด้วยการตัดชำ ต่อกิ่ง ทาบกิ่งและติดตา แต่วิธีดังกล่าวไม่สามารถได้ต้นพืชที่มีลักษณะสมบูรณ์แข็งแรงหรือปลอดโรคอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งความสามารถในการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของกุหลาบยังแตกต่างกันไปในแต่ละฤดูกาล ด้วยเหตุนี้ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถเพิ่มปริมาณต้นของกุหลาบได้มากเพียงพอต่อความต้องการของอุตสาหกรรมไม้ดอกไม้ประดับ เทคนิคนี้เป็นวิธีการขยายพันธุ์พืชที่ไม่ขึ้นกับฤดูกาลจึงทำให้สามารถใช้เพื่อเพิ่มปริมาณต้นพืชได้ตลอดทั้งปี ทั้งยังช่วยทำให้ได้ต้นคงพันธุ์ที่มีลักษณะสมบูรณ์และปลอดโรคภายในระยะเวลาที่จำกัดอีกด้วย (Pati *et al.*, 2006)

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเป็นการนำชิ้นส่วนของต้นพืชมาเลี้ยงภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ (aseptic condition) อย่างไรก็ดีตาม

ต้นพืชในธรรมชาติมีการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์เป็นปกติ โดยเฉพาะบริเวณผิวตามส่วนต่าง ๆ ของต้นพืช ซึ่งสามารถทำให้ปลอดเชื้อได้โดยนำมาผ่านกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิว (Bhojwani and Dantu, 2013) จากการที่กุหลาบแกระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิยังไม่มีรายงานการขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชมาก่อน งานวิจัยนี้จึงศึกษาการฟอกฆ่าเชื้อผิวของชิ้นพืชเป็นลำดับแรก การฟอกฆ่าเชื้อผิวเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ อันเป็นการทำให้ชิ้นพืชปลอดจากเชื้อจุลินทรีย์ก่อนที่จะถูกนำเข้าสู่ระบบการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเพื่อนำชิ้นพืชที่ได้เหล่านี้ไปใช้ในขั้นตอนต่าง ๆ ต่อไป ขั้นตอนนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากหากกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวชิ้นพืชมีประสิทธิภาพก็จะทำให้ได้ชิ้นพืชปลอดเชื้อที่รอดชีวิตปริมาณมาก ส่งผลให้การขยายพันธุ์พืชด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อดำเนินไปอย่างเป็นระบบและมีคุณภาพ (Bhadane and Patil, 2016)

การฟอกฆ่าเชื้อในกุหลาบสายพันธุ์ผสม (*Rosa hybrida*) นิยมใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite: NaOCl) เป็นสารฟอกเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ (Tolombetova *et al.*, 2017; Jonoubi *et al.*, 2019) ซึ่งการฟอกฆ่าเชื้อผิวชิ้นพืชในงานวิจัยการขยายพันธุ์กุหลาบสายพันธุ์ผสมด้วยวิธีเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (ค.ศ. 2014 - 2024) พบการใช้ NaOCl เกรดห้องปฏิบัติการที่ระดับความเข้มข้น 2.5 - 30% ร่วมกับเวลาฟอกฆ่าเชื้อผิวนาน 1 - 30 นาที (Abdolmohammadi *et al.*, 2014; Abuj *et al.*, 2015; Bayanati *et al.*, 2015; Dehestani-Ardakani *et al.*, 2016; Tolombetova *et al.*, 2017; Mahmoud and Hassanein, 2018; Jonoubi *et al.*, 2019; Pahnekolayi *et al.*, 2019; da Silva de Matos *et al.*, 2021) สำหรับสารฟอกฆ่าเชื้อผิวที่มีส่วนผสมของ NaOCl ซึ่งถูกนำมาใช้ในสารฟอกขาวเกรดการค้า (commercial bleach) ในปัจจุบัน เช่น ไฮเตอร์ (Hiter®) หรือ คลอโรกซ์ (Clorox®) ได้มีการผสม NaOCl ให้เป็นสารออกฤทธิ์สำคัญเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยสารดังกล่าวสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี หากซื้อได้โดยทั่วไปและมีราคาไม่แพง (Hongthongkham

et al., 2022) จึงทำให้นักวิจัยบางส่วนได้เลือกใช้สารฟอกขาวกรดการค้ำมาฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชในกุหลาบสายพันธุ์ผสม ซึ่งพบการใช้ที่ความเข้มข้น 10 – 100% นาน 5 – 10 นาที (Khosh-Khui and Sink, 1982a; 1982b; Hsia and Korban, 1996; Ibrahim and Debergh, 2000; 2001; Ozel and Arslan, 2006; Kanchanapoom *et al.*, 2009; 2010; Attia *et al.*, 2012) ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแต่ละงานวิจัยได้เลือกใช้ NaOCl ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาในการฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชของกุหลาบพันธุ์ผสมที่ต่างกัน โดยขึ้นกับความสะอาด ชนิดและอายุของชั้นพืชเป็นสำคัญ ดังนั้นผลของสารฟอกขาวกรดการค้ำที่มีส่วนผสมของ NaOCl ต่อการนำมาฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชกุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิจึงเป็นสิ่งที่น่าจะนำมาใช้ศึกษา

Shokri *et al.* (2015) ได้นำอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรหรือซิลเวอร์นาโน (silver nanoparticles: AgNPs) มาลดอัตราการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ในกุหลาบสายพันธุ์ผสม และพบว่า AgNPs สามารถทำให้ชั้นพืชปลอดเชื้อได้สูงถึง 90% จากการนำส่วนข้อไปจุ่มลงในสารละลาย AgNPs เข้มข้น 150 มิลลิกรัม/ลิตร นาน 20 นาที มีการศึกษาในพืชหลายชนิดที่พบว่าสารฟอกชั้นพืชด้วย AgNPs สามารถช่วยกำจัดและลดการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sarmast *et al.*, 2011; Nartop, 2019; Adebomojo and AbdulRahaman, 2020; Tung *et al.*, 2021a) บางงานวิจัยยังพบว่า AgNPs ทำให้ได้ชั้นพืชที่มีอัตราปลอดเชื้อสูงกว่าการฟอกด้วย NaOCl (Parzymies, 2021) และแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Tung *et al.*, 2021b) อีกทั้งชั้นพืชปลอดเชื้อยังมีอัตราการรอดชีวิตหรือการเจริญเติบโตที่สูงอีกด้วย (Shokri *et al.*, 2015; Nartop, 2019; Adebomojo and AbdulRahaman, 2020; Tung *et al.*, 2021a) ทั้งนี้ ได้มีการนำ AgNPs ไปผสมในสารเคมีทางการเกษตร เช่น โอซิล (Osil®) และมีงานวิจัยพบว่าการฉีดพ่นต้นส้มด้วยสารละลายโอซิลช่วยป้องกันการเป็นโรครินนิ่งได้ (Citrus greening disease) (Vatcharakajon *et al.*, 2023) ด้วยเหตุนี้ การนำ AgNPs ที่ผสมในสารเคมีทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ต่อการฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชของกุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการศึกษา

การฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชทั้งในกรณีของ NaOCl และ AgNPs ที่กล่าวมาข้างต้น ได้บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของสารฟอกและ

ระยะเวลาที่ใช้ในการฟอกฆ่าเชื้อผิวสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการปลอดเชื้อและการรอดชีวิตของชั้นพืชภายหลังกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวได้ เนื่องจากสารฟอกไม่เพียงแต่เป็นพิษต่อเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ ยังเป็นพิษต่อเซลล์ของชั้นพืชอีกด้วย (Bhojwani and Dantu, 2013) กระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชจึงเป็นขั้นตอนที่ละเอียดอ่อนและต้องใช้วิธีการฟอกให้เหมาะสม (Bhadane and Patil, 2016) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชที่เหมาะสมของกุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิโดยใช้ไฮเตอร์และโอซิล ผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการฟอกฆ่าเชื้อผิวชั้นพืชในกลุ่มกุหลาบพันธุ์ผสม และจะเป็นประโยชน์ในการนำไปต่อยอดสู่งานวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการขยายพันธุ์กุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิด้วยเทคนิคเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมกุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิก่อนการฟอกฆ่าเชื้อผิว

กุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ (Figure 1A) ซึ่งปลูกในโรงเรือนต้นไม้ของสาขาวิชาเกษตรป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ - แพร่เฉลิมพระเกียรติ ได้รับการพ่นยากันราที่มีสารออกฤทธิ์สำคัญ คือ คาร์เบนดาซิม (carbendazim) ทุก ๆ 15 วัน เป็นเวลา 1 เดือน ยากันราที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกใช้ในอัตราส่วน ยากันรา 20 มิลลิกรัม : น้ำ 20 ลิตร งดการให้น้ำแก่กุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิเป็นเวลา 3 วัน ก่อนดำเนินขั้นตอนการฟอกฆ่าเชื้อผิว

2.2 การฟอกฆ่าเชื้อผิวส่วนข้อของต้นกุหลาบแคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ

คัดเลือกกิ่งอ่อนที่มีลักษณะสมบูรณ์ ไม่ปรากฏร่องรอยของโรคพืชหรือรอยแมลงกัดแทะ (Figure 1B) จากนั้นนำกิ่งมาตัดแยกให้มีความยาว 3 - 5 เซนติเมตร (Figure 1C) ก่อนนำไปล้างน้ำให้สะอาด พร้อมกับแปรงเบา ๆ ด้วยแปรงขนนุ่มและน้ำยาล้างจาน (ไลปอนเอฟ, ประเทศไทย) เพื่อขจัดเศษฝุ่นที่ติดอยู่บนผิวของชั้นพืช นำชั้นพืชไปผึ่งบนกระดาษชาระนา 5 นาที เพื่อให้ชั้นพืชแห้ง จากนั้นกิ่งอ่อนเหล่านี้ถูกจุ่มลงในเอทานอลเข้มข้น 70% (ปริมาตร/ปริมาตร) นาน 1 นาที แล้วจึงนำเข้าสู่ขั้นตอนการฟอกฆ่าเชื้อผิวของชั้นพืช ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 วิธี (Table 1)



Figure 1 Characteristics of *Rosa* 'Hohoemi Rouge' (A), selected young branches (B) and pruned young branches, 3 – 5 cm in length, as starting material for surface sterilizing process (C).

Table 1 Surface sterilization processes for *Rosa* 'Hohoemi Rouge'.

Method	Sterilant (concentration, exposure time) in surface sterilization step	
	1 st step	2 nd step
1	Hiter® (10% v/v, 10 min)	-
2	Hiter® (10% v/v, 10 min)	Hiter® (5% v/v, 5 min)
3	Osil® (10% v/v, 10 min)	-
4	Osil® (10% v/v, 10 min)	Osil® (5% v/v, 5 min)

การฟอกฆ่าเชื้อผิวในแต่ละวิธีมีการใส่น้ำยาล้างจาน (ไลโปนเอฟ, ประเทศไทย) รวมด้วย 75 มิลลิตร/100 มิลลิตร เพื่อทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) กึ่งอ่อนของกุหลาบ แคระญี่ปุ่นโฮโฮเอมิได้ถูกนำมาฟอกฆ่าเชื้อผิวตามวิธีที่แสดงใน Table 1 โดยการเขย่าด้วยมือโดยใช้แรงเขย่าให้สม่ำเสมอและให้ชิ้นพืชได้รับสารฟอกอย่างทั่วถึง จากนั้นชิ้นพืชถูกนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นที่หนึ่งฆ่าเชื้อแล้วจำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้ง นานครั้งละ 5 นาที

ไฮเตอร์ (คาโอ, ประเทศไทย) ที่ใช้ในการศึกษานี้มีสารออกฤทธิ์สำคัญ คือ NaOCl เข้มข้น 6% (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ขณะที่โอซิล (นาวาเทค, ประเทศไทย) มีสารออกฤทธิ์สำคัญ คือ AgNPs เข้มข้น 0.01% (น้ำหนัก/น้ำหนัก) น้ำกลั่นที่ใช้เตรียมสารละลายสำหรับฟอกฆ่าเชื้อผิวหรือล้างเนื้อเยื่อในการศึกษานี้ ถูกทำให้ปลอดเชื้อด้วยการนึ่งในหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (autoclave) ที่ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว นาน 20 นาที

2.3 การศึกษาอัตราการปลอดเชื้อของชิ้นพืชและอัตราการรอดชีวิตของชิ้นพืชปลอดเชื้อ

นำกิ่งอ่อนซึ่งผ่านกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวแล้ว มาตัดแยกเอาเพียงส่วนข้อขนาด 1 - 2 เซนติเมตร ไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร Murashige และ Skoog (MS) (Murashige and Skoog, 1962) บันทึกผลการปลอดเชื้อของชิ้นพืชเมื่อเลี้ยงครบ 4 สัปดาห์ และบันทึกผลการรอดชีวิตของชิ้นพืชปลอดเชื้อหลังจาก

เลี้ยงครบ 8 สัปดาห์ การศึกษานี้บันทึกผลการทดลองเมื่อเลี้ยงชิ้นพืชครบทุก ๆ 4 สัปดาห์ เนื่องจากต้องการสังเกตผลของวิธีการฟอกฆ่าเชื้อผิวต่อการปลอดเชื้อและการรอดชีวิตของชิ้นพืชที่ชัดเจน ทั้งนี้ ชิ้นพืชที่ถือว่ารอดชีวิตต้องมีการเจริญเติบโตและพัฒนา พบการเจริญให้ใบหรือยอดใหม่ขึ้น

ข้อมูลที่บ้านที่ถูกนำมาคิดคำนวณโดยสมการที่ใช้คำนวณอัตราการปลอดเชื้อของชิ้นพืช คือ (จำนวนชิ้นพืชที่ปลอดเชื้อทั้งหมด / จำนวนชิ้นพืชทั้งหมด) x 100 ขณะที่สมการคำนวณอัตราการรอดชีวิตของชิ้นพืชปลอดเชื้อ คือ (จำนวนชิ้นพืชปลอดเชื้อที่รอดชีวิตทั้งหมด / จำนวนชิ้นพืชปลอดเชื้อทั้งหมด) x 100

อาหารสังเคราะห์สูตร MS ในการศึกษาี้ ประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส 30 กรัม/ลิตร และเจลไรท์ (gelrite) 2 กรัม/ลิตร ระดับความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของอาหารอยู่ที่ 5.7 - 5.8 อาหารถูกนึ่งในหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงที่ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว นาน 15 นาที เพื่อให้ปลอดเชื้อ การศึกษานี้ใช้ขวดแก้วขนาด 4 ออนซ์ในการเลี้ยงชิ้นพืช โดยเลี้ยง 1 ชิ้นพืชต่อขวด และแต่ละขวดบรรจุอาหารปริมาณ 20 มิลลิตร สภาวะที่ใช้ในการเลี้ยงเนื้อเยื่อตลอดการศึกษานี้ คือ อุณหภูมิ 24 - 26 องศาเซลเซียส, ความเข้มแสง 1,800 ลักซ์ จากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สีขาวโทนเย็น และชิ้นพืชได้รับแสงนาน 16 ชั่วโมง/วัน

2.4 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) การฟอกแต่ละวิธีใช้ชิ้นพืชจำนวน 10 ชิ้น และทำการทดลอง 3 ครั้ง ข้อมูลที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนทางสถิติแบบทางเดียว (one-way analysis of variance) ด้วยการทดสอบเอฟ (F-test) หากข้อมูลพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ข้อมูลถูกนำไปเปรียบเทียบหาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) สถิติในการศึกษานี้วิเคราะห์ที่ระดับ $p < 0.05$ ด้วยโปรแกรม PASW 18.0 ข้อมูลแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : S.D.)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การเตรียมกุหลาบแคระญี่ปุ่นไฮไฮเอมิก่อนการฟอกฆ่าเชื้อผิว

การศึกษานี้กำจัดเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นในกุหลาบแคระญี่ปุ่นไฮไฮเอมิด้วยการพ่นยาที่มี carbendazime เป็นสารออกฤทธิ์สำคัญเนื่องจากคุณสมบัติโดยทั่วไปของ carbendazime คือ เป็นสารที่มีฤทธิ์ครอบคลุมเชื้อโรคที่กว้าง (broad-spectrum) สามารถป้องกันและกำจัดโรคพืชได้ดี โดยเฉพาะโรคใบจุดและโรคราแป้ง ซึ่งเป็นโรคพืชที่มักพบในกุหลาบ (Tibkwang *et al.*, 2018) นอกจากนี้ การศึกษาการฟอกฆ่าเชื้อผิวในกุหลาบสายพันธุ์ผสมบางรายงานพบว่าการเตรียมต้นพืชก่อนนำชิ้นพืชเข้าสู่กระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิว (pretreat) ด้วยการใช้ carbendazime มีส่วนช่วยให้ได้อัตราการปลอดเชื้อของชิ้นพืชภายหลังกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวสูงขึ้น (Bala *et al.*, 2010; 2013; Namita *et al.*, 2015; Yadav *et al.*, 2023) มีการศึกษาที่พบว่าปริมาณความเข้มข้นที่ดินส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในดินอย่างมีนัยสำคัญ (Schnürer *et al.*, 1986) ดังนั้นการรดน้ำต้นพืชก่อนนำมาฟอกฆ่าเชื้อผิวจึงส่งผลให้บริเวณผิวดินหรือผิววัสดุปลูกมีความชื้นที่สูงขึ้น ก่อให้เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์สูงมากขึ้น โดยน้ำสามารถเป็นตัวกลางนำเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ภายในต้นพืชได้ผ่านกระบวนการดูดและลำเลียงน้ำของพืช ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการฟอกฆ่าเชื้อผิวชิ้นพืชลดลงได้ ด้วยเหตุดังกล่าว การศึกษานี้จึงงดการให้น้ำแก่กุหลาบแคระญี่ปุ่นไฮไฮเอมิเป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้การฟอกฆ่าเชื้อผิวชิ้นพืชเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

3.2 อัตราการปลอดเชื้อของส่วนข้อกุหลาบแคระญี่ปุ่นไฮไฮเอมิหลังจากผ่านขั้นตอนการฟอกฆ่าเชื้อผิว

เมื่อนำส่วนข้อของกุหลาบแคระญี่ปุ่นไฮไฮเอมิที่ผ่านการฟอกฆ่าเชื้อผิวไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าการฟอกทั้ง 4 วิธี มีชิ้นพืชเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่พบ

การปนเปื้อนจากเชื้อราหรือแบคทีเรีย ลักษณะการปนเปื้อนจากเชื้อราพบเป็นกลุ่มเชื้อราเจริญขึ้นที่ชิ้นพืช ขณะที่ลักษณะการปนเปื้อนจากแบคทีเรียพบเป็นเมือกสีเหลืองหรือขาวข้นไหลออกมาจากชิ้นพืช วิธีการฟอกฆ่าเชื้อผิวที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ส่งผลให้ชิ้นพืชมีการปลอดเชื้อที่สูง (86.67 – 93.33%) และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง 4 วิธีที่ศึกษา (Table 2) เป็นการบ่งชี้ว่าไฮเตอร์และโอซิลมีประสิทธิภาพสูงต่อการนำมาฟอกฆ่าเชื้อผิวของชิ้นพืชกุหลาบแคระญี่ปุ่นไฮไฮเอมิให้ปลอดเชื้อ ไฮเตอร์ ซึ่งมี NaOCl เป็นสารออกฤทธิ์สำคัญอยู่นั้น เมื่อ NaOCl ถูกนำจะแตกตัวให้ไฮโปคลอไรท์ไอออน (OCl⁻) และกรดไฮโปคลอรัสซัน (hypochlorous acid: HOCl) OCl⁻ สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ด้วยการออกซิไดซ์ผนังและเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้โครงสร้างเหล่านี้ได้รับความเสียหาย ขณะเดียวกัน HOCl สามารถแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ได้ และจะเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับหมู่ซัลไฟไฮดริล (-SH) ของเอนไซม์หลายชนิด ทำให้เอนไซม์เหล่านี้เสื่อมสภาพ กิจกรรมภายในเซลล์หลายกระบวนการจึงหยุดชะงัก HOCl ยังทำให้เกิดสารคลอรามิน (chloramines) ซึ่งรบกวนกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ภายในเซลล์ การมี HOCl ปริมาณมากในเซลล์ยังส่งผลให้เซลล์อยู่ในสภาวะเครียด เกิดการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนสูงขึ้น (reactive oxygen species: ROS) อนุมูลเหล่านี้จะทำให้โครงสร้างต่าง ๆ ภายในเซลล์เสียหายต่อไป ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ตาย (Estrela *et al.*, 2002; Fukuzaki, 2006) สำหรับกรณีของโอซิลซึ่งมี AgNPs เป็นสารออกฤทธิ์สำคัญต่อการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ AgNPs จะเข้าจับบริเวณผนังและเยื่อหุ้มเซลล์โดยอาศัยความต่างระหว่างประจุบวกของซิลเวอร์ไอออน (Ag⁺) ของ AgNPs กับประจุลบของซัลเฟตไอออน (S⁻) ที่อยู่ในโปรตีนในโครงสร้างของผนังและเยื่อหุ้มเซลล์ การสะสมของ AgNPs จำนวนมากที่บริเวณเหล่านี้จะทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติทางสรีรวิทยา ทำให้โครงสร้างดังกล่าวถูกทำลาย นอกจากนี้ Ag⁺ ของ AgNPs จะเข้าจับกับไรโบโซมและไอออนอื่น ๆ เช่น ไอออนของฟอสฟอรัส (P³⁻) ทำให้การสังเคราะห์โปรตีน การหายใจระดับเซลล์ การแบ่งเซลล์และการสังเคราะห์สารพันธุกรรม (DNA) ถูกรบกวนหรือหยุดชะงัก เป็นผลให้เชื้อจุลินทรีย์ตาย อีกทั้งการสะสมของ Ag⁺ ในเซลล์จำนวนมากยังสามารถทำให้เกิด ROS ได้อีกด้วย (Yin *et al.*, 2020)

ถึงแม้งานวิจัยนี้ให้ผลการปลอดเชื้อของชิ้นพืชที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หากแต่พบผลการทดลองที่น่าสนใจ กล่าวคือ การฟอกฆ่าเชื้อผิวส่วนข้อด้วยสารละลายไฮเตอร์จำนวน 1 ครั้ง มีอัตราการปลอดเชื้อของชิ้นพืชที่ 93.33% (วิธีที่ 1) ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าการฟอกฆ่าเชื้อผิวด้วยสารละลายไฮเตอร์จำนวน 2 ครั้ง ซึ่งมีอัตราการปลอดเชื้อของชิ้นพืชอยู่ที่ 86.67% (วิธีที่ 2) (Table 2) ผลการศึกษานี้คล้ายคลึงกับบางงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบผลการทดลองในลักษณะเดียวกัน (Jaisue *et al.*, 2019; Srisawang *et al.*, 2019) ทั้งนี้เป็นเพราะการที่ชิ้นพืชถูกฟอกด้วย NaOCl หลายครั้งหรือเป็นเวลานาน NaOCl สามารถส่งผลกระทบให้เกิด

Table 2 The effect of the different surface sterilization procedures on the contamination-free rate of *Rosa* 'Hohoemi Rouge' after 4 weeks of culture on MS medium.

Method	Total number of contamination-free explants	Total number of explants with contamination		Contamination-free rate (%)
		Fungi	Bacteria	
1	28	-	2	93.33 $\pm$ 5.77
2	27	-	3	86.67 $\pm$ 5.77
3	27	2	1	90.00 $\pm$ 10.00
4	27	2	1	90.00
F-test				N.S. ($p = 0.672$)

N = 10 explants/treatment with 3 replications. Data are presented as mean $\pm$ S.D. N.S. in F-test indicates a statistically non-significant difference at $p < 0.05$.

รอยแตกขนาดเล็ก (microfissure) ทำให้เนื้อเยื่อพืชเกิดความเสียหาย มีความอ่อนแอและกลไกป้องกันเชื้อจุลินทรีย์โดยธรรมชาติลดลง ชี้นพืชจึงอยู่ในสภาวะเครียดและต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ได้ต่ำ อีกทั้งสภาพของชี้นพืชดังกล่าวข้างต้น ยังทำให้ชี้นพืชสามารถปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้นระหว่างขั้นตอนการย้ายชี้นพืชสู่สารฟอกหรือน้ำฟอกฆ่าเชื้อขวดใหม่อีกด้วย (Leva and Rinaldi, 2012) สำหรับในกรณีของ AgNPs การฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 หรือ 2 ครั้ง พบอัตราการปลอดเชื้อของชี้นพืชอยู่ที่ 90% ซึ่งอาจเป็นเพราะความเข้มข้นของสารและระยะเวลาที่ใช้ฟอกในการศึกษาครั้งนี้ ไม่ได้ส่งผลทำลายเนื้อเยื่อพืชมากเท่า NaOCl อย่างไรก็ตาม แม้จะยังไม่พบรายงานที่มีการฟอกชี้นพืชด้วย AgNPs จำนวน 2 ครั้ง แต่หลายรายงานได้ระบุว่าความเข้มข้นและระยะเวลาในการฟอกด้วย AgNPs มีผลต่ออัตราการปลอดเชื้อของชี้นพืช โดยหากใช้ AgNPs ในความเข้มข้นต่ำหรือระยะเวลาการฟอกสั้น จะส่งผลให้ได้อัตราการปลอดเชื้อของชี้นพืชที่ต่ำกว่าการใช้ AgNPs ในความเข้มข้นสูงหรือระยะเวลาการฟอกที่นาน (Samast *et al.*, 2011; Shokri *et al.*, 2015; Nartop, 2019; Adebomojo and AbdulRahaman, 2020; Tung *et al.*, 2021a) ดังนั้นการฟอกฆ่าเชื้อผิวชี้นพืชควรใช้ความเข้มข้นของสารฟอกและระยะเวลาในการฟอกให้เหมาะสมเพื่อให้สารฟอกสามารถออกฤทธิ์ต่อการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

3.3 อัตราการรอดชีวิตของส่วนข้อปลอดเชื้อกุหลาบแคว้นญี่ปุ่นโฮโฮเอมิ

เมื่อย้ายส่วนข้อที่ปลอดเชื้อมาเลี้ยงในอาหารสังเคราะห์สูตร MS ต่ออีก 4 สัปดาห์ (รวมระยะเวลาการเลี้ยงส่วนข้อในหลอดทดลอง คือ 8 สัปดาห์) ไม่พบการปนเปื้อนเพิ่มเติม ผลการทดลองพบว่า การฟอกแต่ละวิธีส่งผลกระทบต่อความแตกต่างของอัตราการรอดชีวิตของชี้นพืชปลอดเชื้อ การฟอกฆ่าเชื้อผิวด้วยสารละลาย

ไฮเตอร์พบการตายของชี้นพืช โดยการฟอกด้วยสารละลายไฮเตอร์จำนวน 2 ครั้ง ให้อัตราการรอดชีวิตของชี้นพืช (36.67%) ต่ำกว่าการฟอกด้วยสารละลายไฮเตอร์เพียงครั้งเดียว (50.15%) ขณะที่การฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่พบการตายของส่วนข้อปลอดเชื้อ (อัตราการรอดชีวิต = 100%) (Table 3) ข้อปลอดเชื้อที่ตายมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลคล้ำทั้งชี้นพืชและไม่พบการเจริญให้ใบหรือยอดใหม่ ขณะที่ส่วนข้อปลอดเชื้อที่รอดชีวิตนั้น ชี้นพืชเป็นสีเขียวและพบการเจริญให้ใบและยอดใหม่ทุกชี้นพืช (Figure 2) ทั้งนี้ ส่วนข้อบางชี้นพบการเจริญของดอกตูมชี้นมาอีกด้วย (Figure 3)

การฟอกฆ่าเชื้อผิวชี้นพืชกุหลาบแคว้นญี่ปุ่นโฮโฮเอมิด้วยสารละลายไฮเตอร์ 2 ครั้ง (วิธีที่ 2) ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของชี้นพืชปลอดเชื้อลดลง (Table 3) ผลวิจัยนี้เป็นไปในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า การใช้ NaOCl ที่เพิ่มความเข้มข้น เพิ่มระยะเวลาในการฟอก หรือเพิ่มจำนวนครั้งในการฟอก ทำให้อัตราการรอดชีวิตของชี้นพืชปลอดเชื้อลดลง (Maurya *et al.*, 2013; Dehestani-Ardakani *et al.*, 2016; Jaisue *et al.*, 2019; Srisawang *et al.*, 2019) ทั้งนี้เป็นเพราะสารฟอกฆ่าเชื้อผิวไม่เพียงเป็นพิษต่อเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ หากแต่ยังเป็นพิษต่อเซลล์ของชี้นพืชอีกด้วย (Bhojwani and Dantu, 2013) ชี้นพืชจึงมีอัตราการรอดชีวิตหรือการเจริญเติบโตที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นหรือระยะเวลาในการฟอกฆ่าเชื้อผิว สำหรับกรณีการฟอกด้วย AgNPs ในการศึกษาพบว่า ชี้นพืชที่ถูกฟอกฆ่าเชื้อผิวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 100% (Table 3) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า 1) AgNPs มีการตกค้างอยู่ในเซลล์พืชในปริมาณที่ต่ำดังที่พบในการศึกษาของ Vatcharakajon *et al.* (2023) จึงไม่เป็นพิษต่อเซลล์พืช และ 2) AgNPs สามารถถูกดูดซึมและเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเซลล์ของชี้นพืชได้ง่ายผ่านท่อลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ (xylem) หรือท่อลำเลียงอาหาร (phloem) ซึ่งชี้นพืชสามารถนำ AgNPs ไปใช้เพื่อสนับสนุนกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ได้ (Tung *et al.*, 2021a) อย่างไรก็ตาม การฟอกฆ่าเชื้อผิวในพืชบางชนิดพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นหรือระยะเวลาในการฟอกด้วย AgNPs ทำให้อัตรา

การรอดชีวิตหรือการเจริญเติบโตลดลง (Shokri *et al.*, 2015; Nartop, 2019; Adebomojo and AbdulRahaman, 2020; Tung *et al.*, 2021a; 2021b) ซึ่งแตกต่างไปจากผลของงานวิจัยนี้เหล่านี้ล้วนเป็นผลจากความแตกต่างทางพันธุกรรมของพืชแต่ละชนิดหรือชิ้นส่วนของพืชที่นำไปใช้ฟอกฆ่าเชื้อผิว (Tung *et al.*, 2021a) ดังนั้น การได้มาซึ่งชิ้นพืชปลอดเชื้อที่มีอัตราการรอดชีวิตสูงต้องใช้ชนิดและความเข้มข้นของสารฟอก รวมถึงระยะเวลาในการฟอกให้เหมาะสมเพื่อป้องกันความเป็นพิษของสารฟอกต่อชิ้นพืช

วิธีการฟอกด้วยสารละลายไฮโซลจำนวน 1 ครั้ง (วิธีที่ 3) และ 2 ครั้ง (วิธีที่ 4) ให้ผลการปลอดเชื้อที่คล้ายคลึงกัน (Table 2)

และไม่พบการตายของส่วนข้อปลอดเชื้อ (Table 3) เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการฟอกที่ 3 คือ การฟอกส่วนข้อด้วยสารละลายไฮโซลเข้มข้น 10% (ปริมาตร/ปริมาตร) นาน 10 นาที เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีฟอกที่ใช้ปริมาณสารเคมีที่น้อยและระยะเวลาในการฟอกที่สั้นกว่าวิธีการฟอกที่ 4 (รวมใช้สารเข้มข้น 15% ปริมาตร/ปริมาตร และฟอกนาน 15 นาที) จึงเป็นการช่วยประหยัดทรัพยากรและต้นทุนในขั้นตอนการฟอกฆ่าเชื้อผิวชิ้นพืชของกุหลาบกระป๋องโฮโฮเอมิ

Table 3 The effect of different surface sterilization procedures on survival rate in contamination-free explants of Rosa 'Hohoemi Rouge' after 8 weeks of culture on MS medium.

Method	Total number of survived and contamination-free explants	Survival rate of contamination-free explants (%)
1	14	50.15 $\pm$ 18.22 B
2	10	36.67 $\pm$ 13.77 B
3	27	100 A
4	27	100 A
F-test		* ($p = 0.000$)

N = 10 explants/treatment with 3 replications. Data are presented as mean $\pm$ S.D. * in the F-test indicates a statistically significant difference. Different capital letters within the column indicated statistical significance according to DMRT. All statistical analysis were performed at $p < 0.05$.



Figure 2 *In vitro* growth of Rosa 'Hohoemi Rouge' explants after surface sterilization with 4 different methods and cultured on MS medium for 8 weeks (bar = 1 cm).

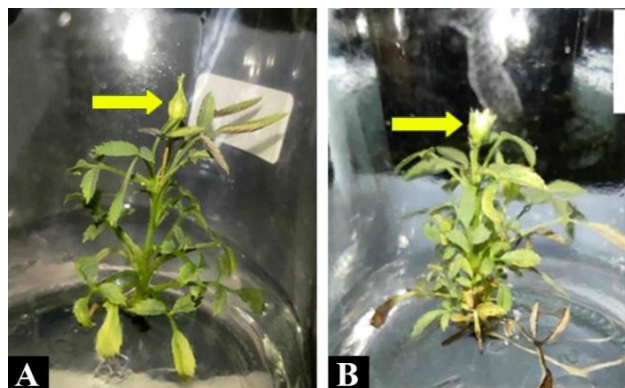


Figure 3 *In vitro* flowering of Rosa 'Hohoemi Rouge' : budding flower (A) and blooming flower (B) (bar = 1 cm).

4. สรุป

การใช้วิธีการฟอกที่มีความเข้มข้นของสารละลายไฮเตอร์และโอซิล ตลอดจนระยะเวลาการฟอกที่แตกต่างกันในการศึกษานี้พบว่าแต่ละวิธีให้อัตราการปลอดเชื้อที่สูงและไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หากแต่อัตราการรอดชีวิตของชิ้นพืชปลอดเชื้อมีความแตกต่างกัน ซึ่งการฟอกฆ่าเชื้อผิวด้วยโอซิลทั้ง 2 วิธี ไม่ทำให้ชิ้นพืชปลอดเชื้อเกิดการตาย ทั้งนี้ การฟอกฆ่าเชื้อผิวส่วนข้อของกุหลาบแคะญี่ปุ่นไฮโอเอมิด้วยสารละลายโอซิลเข้มข้น 10% (ปริมาตร/ปริมาตร) นาน 10 นาที เป็นวิธีการฟอกที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษานี้ ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการฟอกฆ่าเชื้อผิวชิ้นพืชของกุหลาบแคะญี่ปุ่นไฮโอเอมิ อันจะทำให้ได้เนื้อเยื่อปลอดเชื้อที่รอดชีวิตจำนวนมากในระบบการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ซึ่งจะสามารถต่อยอดสู่การศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการขยายพันธุ์พืชระดับเศรษฐกิจชนิดนี้ด้วยเทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ – แพร่ เฉลิมพระเกียรติ สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการปฏิบัติงาน คุณพนมพร วรรณประเสริฐ สำหรับการเอื้อเฟื้อและสนับสนุนต้นกุหลาบแคะญี่ปุ่นไฮโอเอมิที่ใช้ในการศึกษาการฟอกฆ่าเชื้อผิว และ คุณสุกัรา วามือ ที่ได้ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Abdolmohammadi, M., Kermani, M.J., Zakizadeh, H. and Hamidoghli, Y. 2014. *In vitro* embryo germination and interploidy hybridization of rose (*Rosa* sp.). **Euphytica** 198: 255-264.
- Abuj, B.B., Kshirsagar, A.B. and Zahid, I.H. 2015. Effect of different concentration of BA and NAA on nodal culture of *Rosa hybrida* L. **Bionano Frontier** 8(1): 14-17.
- Adebomojo, A.A. and Abdul-Rahaman, A.A. 2020. Surface sterilization of *Ocimum* seeds and tissues with biosynthesized nanosilver and its effects on callus induction. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 805: 012024.
- Attia, A.O., Dessoky, E.D.S. and El-Tarras, A.E. 2012. *In vitro* propagation of *Rosa hybrida* L. cv. Al-Taif Rose plant. **African Journal of Biotechnology** 11(48): 10888-10893.
- Bala, M., Singh, K.P. and Prasad, K.V. 2010. Standardization of *in vitro* mass multiplication protocol for hybrid tea rose cv. Pusa Mohit. **Indian Journal of Horticulture** 67(2): 225-229.
- Bala, M., Singh, K.P., Singh, S.K. and Prasad, K.V. 2013. Standardization of an efficient protocol for *in vitro* mass multiplication of hybrid tea rose cv. Raktima. **Indian Journal of Horticulture** 70(3): 404-410.
- Bayanati, M., Davoodi, D. and Kermani, M.J. 2015. Effect of agar and different culture media on the micropropagation of *Rosa hybrida* cv. 'Black Baccara'. **Journal of Ornamental Plants** 5(2): 75-81.
- Bhadane, B.S. and Patil, R.H. 2016. Data on the cost effective surface sterilization method for *C. carandas* (L.) seeds and callus induction from aseptic seedling. **Data in Brief** 7: 1551-1555.
- Bhojwani, S.S. and Dantu, P.K. 2013. **Plant tissue culture: an introductory text**. Springer, New Delhi.
- da Silva de Matos, A.V.C., de Oliveira, B.S., de Oliveira, M.E.B.B. and Cardoso, J.C. 2021. AgNO₃ improved micropropagation and stimulate *in vitro* flowering of rose (*Rosa x hybrida*) cv. Sena. **Ornamental Horticulture** 27(1): 33-40.
- Dehestani-Ardakani, M., Shariatpanahi, M.E. and Kafi, M. 2016. Investigation of the effects of temperature and starvation stresses on microspore embryogenesis in two tetraploid roses (*Rosa hybrida* L.). **Scientia Agriculture** 14(2): 220-227.
- Estrela, C., Estrela, C.R., Barbin, E.L., Spanó, J.C.E., Marchesan, M.A. and Pécora, J.D. 2002. Mechanism of action of sodium hypochlorite. **Brazilian Dental Journal** 13: 113-117.
- Fukuzaki, S. 2006. Mechanisms of actions of sodium hypochlorite in cleaning and disinfection processes. **Biocontrol Science** 11(4): 147-157.
- Hongthongkham, J., Phanet, N. and Singhamat, J. 2022. *In vitro* propagation of *Plumbago zeylanica* L. **Udon Thani Rajabhat University Journal of Science and Technology** 10(2): 43-56. (in Thai)
- Hsia, C.N. and Korban, S.S. 1996. Factors affecting *in vitro* establishment and shoot proliferation of *Rosa hybrida* L. and *Rosa chinensis* minima. **In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant** 32: 217-222.

- Ibrahim, R. and Debergh, P.C. 2000. Improvement of adventitious bud formation and plantlet regeneration from *in vitro* leaflet explants of roses (*Rosa hybrida* L.). **Acta Horticulturae** 520: 271-279.
- Ibrahim, R. and Debergh, P.C. 2001. Factors controlling high efficiency adventitious bud formation and plant regeneration from *in vitro* leaf explants of roses (*Rosa hybrida* L.). **Scientia Horticulturae** 88(1): 41-57.
- Jaisue, C., Thitithanakul, S., Onsanit, S. and Sontikun, S. 2019. Explants sterilization techniques of *Nepenthes* spp. for tissue culture. **Khon Kaen Agriculture Journal** 47: 1515-1520. (in Thai)
- Jonoubi, P., Aminsalehi, M., Razavi, K. and Zeinipour, M. 2019. Propagation of *Rosa hybrida* L. cv. Cool Water under tissue culture and transformation of the *RhAA* gene via *Agrobacterium tumefaciens*. **Journal of Genetic Resources** 5(1): 38-44.
- Kanchanapoom, K., Posayapisit, N. and Kanchanapoom, K. 2009. *In vitro* flowering from cultured nodal explants of rose (*Rosa hybrida* L.). **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca** 37(2): 261-263.
- Kanchanapoom, K., Sakpeth, P. and Kanchanapoom, K. 2010. *In vitro* flowering of shoots regenerated from cultured nodal explants of *Rosa hybrida* cv. 'Heirloom'. **Science Asia** 36: 161-164.
- Khosh-Khui, M. and Sink, K.C. 1982a. Rooting-enhancement of *Rosa hybrida* for tissue culture propagation. **Scientia Horticulturae** 17(4): 371-376.
- Khosh-Khui, M. and Sink, K.C. 1982b. Micropropagation of new and old world rose species. **Journal of Horticultural Science** 57(3): 315-319.
- Leva, A. and Rinaldi, L.M.R. 2012. **Recent advances in plant *in vitro* culture**. InTechOpen, Rijeka.
- Mahmoud, I.M.A. and Hassanein, A.M.A. 2018. Essential factors for *in vitro* regeneration of rose and a protocol for plant regeneration from leaves. **Horticultural Science** 45(2): 83-91.
- Maurya, R.P., Yadav, R.C., Godara, N.R. and Beniwal, V.S. 2013. *In vitro* plant regeneration of rose (*Rosa hybrida* L.) cv. "Benjamin Paul" through various explants. **Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences** 1: 111-119.
- Murashige, T. and Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. **Physiologia Plantarum** 15(3): 473-497.
- Namita, N., Raju, D.V.S., Prasad, K.V., Singh, K.P. and Kumar, S. 2015. Standardization of protocol for *in vitro* multiplication of rose (*Rosa× hybrida*) cv. Happiness. **The Indian Journal of Agricultural Sciences** 85(11): 1513-1517.
- Nartop, P. 2019. Silver nanoparticles: ecofriendly surface sterilization of plant seeds in different shapes and sizes. **Journal of Animal and Plant Sciences** 29(2): 453-460.
- Ozel, C.A. and Arslan, O. 2006. Efficient micropropagation of English shrub rose "Heritage" under *in vitro* conditions. **International Journal of Agriculture and Biology** 5: 626-629.
- Pahnekolayi, M.D., Tehranifar, A., Samiei, L. and Shoor, M. 2019. Optimizing culture medium ingredients and micrografting devices can promote *in vitro* micrografting of cut roses on different rootstocks. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture** 137: 265-274.
- Parzymies, M. 2021. Nano-silver particles reduce contaminations in tissue culture but decrease regeneration rate and slows down growth and development of *Aldrovanda vesiculosa* explants. **Applied Sciences** 11(8): 3653.
- Pati, P.K., Rath, S.P., Sharma, M., Sood, A. and Ahuja, P.S. 2006. *In vitro* propagation of rose - a review. **Biotechnology Advances** 24(1): 94-114.
- Sarmast, M., Salehi, H. and Khosh-Khui, M. 2011. Nano silver treatment is effective in reducing bacterial contaminations of *Araucaria excelsa* R. Br. var. *Glauc*a explants. **Acta Biologica Hungarica** 62(4): 477-484.
- Schnürer, J., Clarholm, M., Boström, S. and Rosswall, T. 1986. Effects of moisture on soil microorganisms and nematodes: a field experiment. **Microbial Ecology**, 12: 217-230.
- Shokri, S., Babaei, A., Ahmadian, M., Arab, M.M. and Hessami, S. 2015. The effects of different concentrations of nano-silver on elimination of bacterial contaminations and phenolic exudation of rose (*Rosa hybrida* L.) *in vitro* culture. **Acta Horticulturae** 1083: 391-396.

- Srisawang, A., Laohavisuti, N. and Ruangdej, U. 2019. The optimum sterilization procedures on micropropagation of *Anubias* sp. 'White'. **King Mongkut's Agricultural Journal** 37(4): 648-654. (in Thai)
- Tibkwang, A., Junkasiraporn, S. and Chotikadachanarong, K. 2018. Effects of cytokinin and sucrose on tissue culture of *Rosa chinensis* Jacq.var. minima Voss. **Burapha Science Journal** 23(2): 712-721. (in Thai)
- Tolembetova, A.K., Turasheva, S.K., Imanbaeva, A.A., Emazarova, G.I. and Serikova, Z.B. 2017. Microclonal propagation *in vitro* of commercial varieties of rose. **Experimental Biology** 4(73): 32-41.
- Tung, H.T., Thuong, T.T., Cuong, D.M., Luan, V.Q., Hien, V.T., Hieu, T., Nam, N.B., Phuong, H.T.N, Vinh, B.V.T., Khai, H.D., Nhut, D.T. and Nhut, D. T. 2021a. Silver nanoparticles improved explant disinfection, *in vitro* growth, runner formation and limited ethylene accumulation during micropropagation of strawberry (*Fragaria × ananassa*). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture** 145: 393-403.
- Tung, H.T., Van, H.T., Bao, H.G., Bien, L.T., Khai, H.D., Luan, V.Q., Cuong, D.M., Phong, T.H. and Nhut, D.T. 2021b. Silver nanoparticles enhanced efficiency of explant surface disinfection and somatic embryogenesis in *Begonia tuberosus* via thin cell layer culture. **Vietnam Journal of Biotechnology** 19(2): 337-347.
- United States Plant Patent. 2020. **Patent No.: US PP31,646 P3**. Available Source: <https://www.freepatentsonline.com/PP31646.html>, February 20, 2024.
- Vatcharakajon, P., Somsaket, A., Choengpanya, K., Susawaengsup, C., Sornsakdanuphap, J., Boonplod, N., Bhuyar, P. and Dangtungee, R. 2023. Silver nanochito oligomer hybrid solution for the treatment of *Citrus* greening disease (CGD) and biostimulants in *Citrus*. **Horticulture** 9(6): 725.
- Yadav, H., Banyal, N., Singh, M.K., Singh, K.P., Panwar, S., Singh, B., Kumar, S. and Mandal, B.N. 2023. Optimization of *in-vitro* protocol for rapid mass multiplication of floribunda rose cv. 'Rose Sherbet'. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America** 54(9): 15781-15788.
- Yin, I.X., Zhang, J., Zhao, I.S., Mei, M.L., Li, Q. and Chu, C.H. 2020. The antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in dentistry. **International Journal of Nanomedicine** 15: 2555-2562.

Research Article

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าจากของเหลือในกระบวนการแปรรูป
ผักผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ : กรณีศึกษาผงโรยข้าว

Development of Value-Added Products from the Processing of
Vacuum-Fried Vegetable and Fruit Residues: A Case Study of Furikake

นภาพร หงษ์พันธุ์^a สรिता ชามุสิก^a สาทิตา คำมี^a ศรีนัย เนมหารวรรณ^b และ สุนทรียา กาละวงศ์^{c*}

Nawaporn Hongpan^a, Sarita Chansuek^a, Satita Khammee^a, Sarun Nemahawan^b and Soontreeya Kalawong^{c*}

^a สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา เขตชนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

^a Department of Food Technology, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Dhonburi, Bangkok 10600, Thailand.

^b บริษัท ทริปปี้ล เจ ฟู้ด แอนด์ เบเวอร์เรจ จำกัด อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย 57220

^b Triple j food and beverage company limited, Mae Sai, Chiang Rai 57220, Thailand.

^c สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา เขตชนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

^c Department of Agricultural Technology, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Dhonburi, Bangkok 10600, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-26

Revised: 2024-05-30

Accepted: 2024-06-12

Keywords:

Furikake;

development;

residues;

vacuum-fried vegetable and fruit

processing

This research aims to create a suitable rice seasoning product prototype formula using the residues from vacuum-fried fruits and vegetables. According to the findings, the prototype formula of the Furikake product that received the most acceptance was Formula 2 (containing residues from watermelon, pumpkin, pineapple, banana, and Shiitake mushroom powder in the amounts of 15, 30, 20, 20 and 15 grams, respectively). This formula had a moisture content of 6.17 percent and a free water content of 0.33, a rancidity value (TBA) of 6.81 micrograms of malondialdehyde per kg and an overall liking score of 7.90 points, indicating a moderate level of liking. The findings of the prototype formula development revealed that the watermelon and dried fish flavor received the most liking scores from consumers across all sensory attributes except appearance, with statistically significant differences. The overall liking score was 8.23 points, indicating the highest level of acceptance. Nutritional information for the prototype product of watermelon and dried fish rice seasoning includes moisture, protein, fat, and ash contents of 9.14%, 16.01%, 18.21%, and 4.60%, respectively. Additionally, it contains 52.04% of total carbohydrates (including 7.16 grams of dietary fiber and 43.57 grams of sugar), 700.70 milligrams of sodium, 7.817 micrograms of vitamin A, 46.90 micrograms of beta-carotene, 348.4 milligrams of calcium, 1.61 milligrams of iron, and 436.09 kcal of total energy per 100 grams, with 163.89 kcal of that derived from fat.

© 2025 Hongpan, N., Chansuek, S., Khammee, S., Nemahawan, S. and Kalawong, S. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: soontreeya596@gmail.com

Cite this article as:

Hongpan, N., Chansuek, S., Khammee, S., Nemahawan, S. and Kalawong, S. 2025. Development of Value-Added Products from the Processing of Vacuum-Fried Vegetable and Fruit Residues: A Case Study of Furikake. *Recent Science and Technology* 17(3): 262661.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรต้นแบบที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวโดยใช้ของเหลือจากกระบวนการแปรรูปผักผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ ผลพบว่า ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด คือ สูตรที่ 2 (ของเหลือจากแตงโม พักทอง สับปะรด กัลยหอม และผงปรุงรสเห็ดหอมในปริมาณ 15, 30, 20, 20 และ 15 กรัม ตามลำดับ) ซึ่งมีปริมาณความชื้นร้อยละ 6.17 ปริมาณน้ำอิสระ 0.33 และค่าการเกิดกลิ่นหืน (TBA) 6.81 มิลลิกรัมมาลอนไดอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม และมีคะแนนความชอบโดยรวมเท่ากับ 7.90 คะแนน อยู่ในระดับชอบปานกลาง เมื่อนำไปพัฒนาสูตรต้นแบบ พบว่า สูตรต้นแบบที่เหมาะสมที่สุด คือ รสแตงโมปลาแห้ง ซึ่งผู้บริโภคให้ความชอบต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสทุกด้านสูงที่สุด โดยมีคะแนนความชอบโดยรวม เท่ากับ 8.23 คะแนน อยู่ในระดับชอบมากที่สุด และผงโรยข้าวรสแตงโมปลาแห้งมีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า ร้อยละ 9.14, 16.01, 18.21 และ 4.60 ตามลำดับ การโบไฮเดรตทั้งหมดร้อยละ 52.04 โดยเป็นใยอาหาร 7.16 กรัม และน้ำตาล 43.57 กรัม โซเดียม 700.70 มิลลิกรัม วิตามินเอ 7.817 ไมโครกรัม เบต้าแคโรทีน 46.90 ไมโครกรัม แคลเซียม 348.4 มิลลิกรัม เหล็ก 1.61 มิลลิกรัม และมีพลังงานทั้งหมด 436.09 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม โดยเป็นพลังงานจากไขมัน 163.89 กิโลแคลอรี

คำสำคัญ: ผงโรยข้าว, การพัฒนาผลิตภัณฑ์, ของเหลือ, การแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ทอดกรอบ เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพที่กำลังได้รับความนิยมจากผู้บริโภคเป็นอย่างมากในปัจจุบัน (Nampradit, 2021; Pitak and Wongpichet, 2014) เนื่องจากมีเนื้อสัมผัสที่กรอบ รับประทานได้ทุกช่วงเวลา มีรสชาติดี และมีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าอาหารขบเคี้ยวประเภทแป้งทอดกรอบ โดยกรรมวิธีการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบมีหลายวิธี ทั้งแบบที่ใช้ความร้อนสูง เช่น การอบด้วยความร้อน (Phonphard, 2022) การทอดในน้ำมันให้กรอบแบบปกติ หรือทอดสุญญากาศ (Vacuum Frying) (Nampradit, 2021) และแบบที่ไม่ใช้ความร้อนโดยทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying) (Fellows, 2000; Savo *et al.*, 2012) ซึ่งทำให้ผักและผลไม้แห้งกรอบ เก็บได้นานขึ้น พกพาสะดวก และยังเป็นตัวเลือกให้ผู้ที่ไม่ชอบรับประทานผักและผลไม้สดสามารถรับประทานได้ง่ายอีกด้วย ทั้งนี้ กระบวนการทอดแบบปกติ (ที่ความดันบรรยากาศ) จะใช้อุณหภูมิในการทอดสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียคุณค่าทางสารอาหารมาก และผลิตภัณฑ์มีการดูดซึมน้ำมันในปริมาณสูง (Assawarachan and Tantikul, 2021) ซึ่งเหมาะสำหรับ ทอดผักผลไม้ที่มีส่วนประกอบของแป้งได้ดี แต่ไม่เหมาะกับการทอดผักผลไม้ที่มีน้ำตาลมากให้มีความชื้นต่ำพอที่จะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ ดังนั้น กระบวนการทอดแบบสุญญากาศ จึงเป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมที่สามารถทำให้น้ำระเหยออกจากอาหารได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการดูดซึมน้ำมันน้อยลง มีการสูญเสียคุณค่าทางสารอาหารน้อยกว่าการทอดในสภาวะบรรยากาศปกติ (Assawarachan and Tantikul, 2021) นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ยังมีสี สัน กลิ่นและรสชาติที่ดี และมีอายุการเก็บรักษาได้นานมากขึ้น (Garrayo and Moreira, 2002) และนิยมใช้เพื่อทอดผักและผลไม้ เช่น ทุเรียน มะม่วง ขนุน กัลยหิม ฝรั่ง แอปเปิล สับปะรด แครอท พริกหวาน กระเจี๊ยบเขียว เป็นต้น

ปัญหาหนึ่งที่ผู้ผลิตมักพบในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ คือ ของเหลือจากกระบวนการผลิตหรือชั้นผลิตภัณฑ์ที่แตกหักไม่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ หรือเกิดจากความเสียหายในการจัดเก็บผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ผลิตสูญเสียรายได้จากของเหลือทิ้งที่เสียไป ทางผู้ผลิตจึงมีความต้องการที่จะใช้ประโยชน์จากของเหลือที่ยังคงมีคุณค่าทางอาหาร และต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีมูลค่าเพิ่มให้ตอบสนองต่อผู้บริโภคที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความสะดวกในการบริโภค อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการลดปริมาณของเสียสุดท้ายที่ต้องกำจัดทิ้งไปอีกด้วย ซึ่งในตลาดผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปมีผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ กราโนลา ธัญพืชอัดแท่ง ขนมขบเคี้ยว อาหารว่าง และผงโรยข้าวรสชาติต่าง ๆ ที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการความสะดวกสบายในการใช้ชีวิต โดยผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว หรือที่เรียกว่า ฟุริคาเกะ (Furikake) หรือเครื่องปรุงรสข้าว (Rice Seasoning) สโตร์ญี่ปุ่นที่ผู้บริโภคหันมานิยมรับประทานในปัจจุบัน (Watanachai and Suktanarak, 2022) ผลิตภัณฑ์นี้สามารถเพิ่มรสชาติและรสชาติในอาหารได้โดยโรยหน้าอาหารโดยเฉพาะข้าวสวย ฟุริคาเกะมักจะประกอบด้วยสาหร่ายแห้ง งาคั่ว เมล็ดพืช ปลาแห้ง เกลือ ผงชูรส และน้ำตาล (Mouritsen, 2009) คุณค่าทางโภชนาการของฟุริคาเกะสามารถปรับปรุงได้ง่ายโดยการเพิ่มส่วนผสมที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น ผงผัก และผงโปรตีน (Chansataporn and Keomany, 2021) ในประเทศไทยมีงานวิจัยที่ทำการพัฒนาผงโรยข้าวหลากหลายรสชาติ เช่น ผงโรยข้าวรสหมอลำเสริมปลาแห้ง (Morida and Khamwachiraphitak, 2023) ผงโรยข้าวรสกะเพราเสริมใบชายา (Watanachai and Suktanarak, 2022) ผงโรยข้าวปลาเสริมสาหร่ายพวงองุ่นอบแห้ง (Sripawatakul *et al.*, 2021) ผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้าน (Rajchasom *et al.*, 2020) ผงโรยข้าวสำเร็จรูปเสริมบัวตอง (Nimitkeatkai *et al.*, 2019) เป็นต้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำของเหลือจากกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศมาใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่า โดย

พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการ และช่วยลดปัญหาของเหลือทิ้งจากผลิตภัณฑ์ของโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบเริ่มต้น

นำของเหลือจากกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ ได้แก่ แครอท แดงโม กัลยหอม พักทอง และสับปะรด ซึ่งได้รับมาจาก บริษัท ทริปเปิล เจ ฟู้ด แอนด์ เบเวอร์เรจ จำกัด จังหวัดเชียงราย มาบั่นละเอียดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที ถึง 1 นาที ให้วัตถุดิบมีลักษณะเป็นผงหยาบ แล้วอบด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที (Sanguansin *et al.*, 2017) เพื่อควบคุมความชื้นเบื้องต้น โดยกำหนดระยะเวลาการเก็บรักษาวัตถุดิบส่วนที่ผ่านการทอดมาแล้วและส่งมายังห้องปฏิบัติการไม่เกิน 1 สัปดาห์ เมื่อได้รับวัตถุดิบจะเริ่มทำการทดลองทันที

2.2 การศึกษาส่วนผสมและสูตรพื้นฐานที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ

นำวัตถุดิบที่เตรียมในข้อที่ 1 มาศึกษาส่วนผสมและสูตรพื้นฐานที่เหมาะสม โดยชั่งน้ำหนักส่วนผสมของผงโรยข้าวแต่ละสูตรตาม Table 1 แล้วนำมาบดให้ละเอียด คลุกผสมให้เข้ากัน และนำไปอบแห้งด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ

ควบคุมให้มีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 12 (Thai Industrial Standards Institute, 2015) แล้วทำการบรรจุใส่ซองฟอยล์อะลูมิเนียมทำการผลิตผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผงโรยข้าวจากผัก (มผช.1151/2562) (Thai Industrial Standards Institute, 2019) จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าการเกิดกลิ่นหืน และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9 ระดับ ได้แก่ สี กลิ่นรส รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม ในขั้นต่อไป

2.3 การศึกษาคุณภาพทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐาน

นำตัวอย่างผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐาน ทั้ง 3 สูตรไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1 คุณภาพทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ โดยการสังเกต ค่าสี L* (Lightness) a* (Redness) และ b* (Yellowness) โดยใช้เครื่องวัดสี (CR-10 Plus) ปริมาณความชื้น (%Moisture content) ตามวิธี AOAC (2000) ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity Meter, AQUALAB Series 3) และค่าการเกิดกลิ่นหืน (Thiobarbituric acid, TBA) ตามวิธี AOAC (2000)

Table 1 Ingredients of basic formula of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing by-products (100 grams)

Ingredients (grams)	Formula 1	Formula 2	Formula 3
Carrot	15	-	15
Watermelon	20	15	15
Pumpkin	15	30	15
Pineapple	25	20	15
Banana	15	20	15
Shiitake mushroom powder	-	15	15
Crystal sea salt	2	-	3.3
Roasted black sesame	8	-	-
Roasted white sesame	-	-	6.7

Note: Formulas 1, 2 and 3 adapted from Porntewabancha (2011)

2.3.2 คุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ สี กลิ่น รส รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม ได้รับการประเมินโดยใช้ผู้บริโภคร่วมไป จำนวน 30 คน ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) (Anprung, 2004) ซึ่งการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในงานวิจัยนี้ ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา (รหัส 038/66E18)

2.4 การพัฒนาสูตรต้นแบบผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ

ทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐานซึ่งมีคุณภาพดีและมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดมา 1 สูตรแล้วพัฒนาเป็นสูตรต้นแบบ 3 รสชาติ ได้แก่ รสดั้งเดิม รสแตงโม ปลาแห้ง และรสโนริซอสโชยุ เริ่มจากนำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ในข้อ 1 มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่แสดงใน Table 2 และเตรียมผงโรยข้าวแต่ละสูตรตามวิธีการ ดังนี้

2.4.1 การเตรียมผงโรยข้าวรสดั้งเดิม

นำผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศมาปั่นให้ละเอียด โรยผงปรุงรสเห็ดหอมที่เตรียมไว้ คลุกผสมให้เข้ากัน และนำไปอบแห้งด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้มีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 6±2 จากนั้นบรรจุใส่ซองฟอยล์อะลูมิเนียมและปิดผนึกไว้

2.4.2 การเตรียมผงโรยข้าวรสแตงโมปลาแห้ง

นำผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศมาปั่นให้ละเอียด เตรียมปลาแห้งโดยการโขลกให้เนื้อปลาฟู เจียวหอมแดง คลุกผสมกับเครื่องปรุงที่เตรียมไว้ และนำไปอบแห้งด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้มีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 6±2 จากนั้นบรรจุใส่ซองฟอยล์อะลูมิเนียมและปิดผนึกไว้

2.4.3 การเตรียมผงโรยข้าวรสโนริซอสโชยุ

นำผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศมาปั่นให้ละเอียด ผสมกับส่วนผสมที่เตรียมไว้ คลุกผสมให้เข้ากัน และนำไปอบแห้งด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้มีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 6±2 จากนั้นบรรจุใส่ซองฟอยล์อะลูมิเนียมและปิดผนึกไว้

Table 2 Prototype formula of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing by-products (100 grams)

Ingredients (grams)	Original	Watermelon	Nori-Shoyu
		with sweet dried fish	
Carrot	-	-	15
Watermelon	15	30	15
Pumpkin	30	30	15
Pineapple	20	25	15
Banana	20	-	15
Shiitake mushroom powder	15	2	0.8
Crystal sea salt	-	-	-
Dried fish	-	5	8
Roasted white sesame	-	-	1
Roasted black sesame	-	-	1
Seaweed powder	-	-	10
Japanese style seasoning powder	-	-	2
Fried shallots	-	6	-
Sugar	-	2	1.6
Soy sauce (Shoyu)	-	-	0.6

Note: Original: Original flavor according to the basic formula 2 in Table 1

Watermelon with sweet dried: Watermelon with sweet dried fish flavor

Nori-Shoyu: Nori seaweed seasoned with soy sauce flavor

นำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาทั้ง 3 รสชาติ มาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านสี กลิ่น โดยรวม รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม โดยใช้ ผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 30 คน ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9 ระดับ (Anprung, 2004) จากนั้นทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาและมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด เพียง 1 รสชาติ ไปศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

2.5 การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรต้นแบบที่ผ่านการคัดเลือกและได้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดจากข้อ 4 ไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ (AOAC, 2016) ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน แร่ธาตุ และพลังงานทั้งหมด

2.6 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาคูณภาพทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐานและสูตรต้นแบบ วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ และการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ โดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการศึกษาส่วนผสมและสูตรพื้นฐานที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ

ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ ได้แก่ พักทอง แดงโม กล้วย สับปะรด แครอท และงาดำ ดังแสดงใน Table 3

เมื่อนำวัตถุดิบไปอบที่อุณหภูมิ 90±2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ปริมาณความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนี้ พักทอง ร้อยละ 7.16 แครอท ร้อยละ 9.87 กล้วย ร้อยละ 6.78 แดงโม ร้อยละ 6.38 สับปะรด ร้อยละ 4.61 งาขาว ร้อยละ 0.72 และงาดำ ร้อยละ 0.63 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแครอทมีปริมาณความชื้นสูงที่สุด ในขณะที่สับปะรดมีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดแบบสุญญากาศจัดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่มีปริมาณความชื้นต่ำ โดยทั่วไปมีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 15 (น้ำหนักเปียก) และมีค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพและ ส่งผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาและความปลอดภัยอาหาร (Pakpot et al., 2019) วัตถุดิบทั้งหมดนี้จะถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวเพื่อใช้สำหรับศึกษาในขั้นตอนต่อไป

Table 3 Percentage of moisture content of raw materials before being used to make rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing by-products

Raw Materials	Moisture content (%)
Carrot	9.87±1.01 ^a
Pumpkin	7.16±1.59 ^b
Banana	6.75±0.97 ^c
Watermelon	6.38±0.90 ^d
Pineapple	4.61±0.50 ^d
White sesame	0.72±0.47 ^f
Black sesame	0.63±0.34 ^f

Note: Mean value of three replicate measurements ± standard deviation (SD) with different letters in the column indicating statistically significant differences ($p \leq 0.05$).

3.2 ผลคุณภาพทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐาน

3.2.1 ลักษณะปรากฏ

จากการสังเกตลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร ผลแสดงดัง Table 4 พบว่า ผงโรยข้าวสูตรที่ 1 มีสีโทนส้มแดง มีลักษณะเป็นผงหยาบ เนื้อสัมผัสกรอบร่วน และมองเห็นส่วนผสมของเมล็ดงาดำ สูตรที่ 2 มีสีโทนเหลือง มีลักษณะเป็นผงหยาบ เนื้อสัมผัสกรอบร่วน และมองเห็นส่วนผสมของวัตถุดิบ สูตรที่ 3 มีสีโทนส้มเหลือง มีลักษณะเป็นผงหยาบ เนื้อสัมผัสกรอบร่วน และมองเห็นส่วนผสมของเมล็ดงาดำ เนื่องจากปริมาณของวัตถุดิบในแต่ละสูตรมีส่วนผสมที่แตกต่างกันไปในแต่ละสูตร จึงส่งผลให้เห็นโทนสีของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไปด้วย

3.2.2 ค่าสี

ค่าสีของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐาน

ทั้ง 3 สูตร แสดงดัง Table 5 พบว่า ค่า L^* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นค่า a^* และ b^* ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 มีค่า L^* สูงที่สุด เท่ากับ 50.53 ทั้งนี้เนื่องจากมีส่วนผสมวัตถุดิบที่มีสีโทนสว่างในปริมาณมากกว่าสูตรอื่น เช่น พักทอง ถั่วลิสง และสับปะรด ในขณะที่สูตรที่ 1 มีค่า L^* ต่ำที่สุด เท่ากับ 47.86 และสูตรที่ 3 มีค่า L^* ไม่แตกต่างจากสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 49.30 ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบมีโทนสีใกล้เคียงกัน และสีของผงโรยข้าวแต่ละสูตรมีสีออกไปในโทนน้ำตาล อาจเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลชนิดคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) และปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ จึงส่งผลให้สูตรที่ 1 มีสีเข้มกว่าสูตรอื่น สำหรับค่า a^* ของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21.20 สูตรที่ 2 เท่ากับ 19.23 และสูตรที่ 3 เท่ากับ 21.49 ตามลำดับ และค่า b^* ของสูตรที่ 1 มีค่าเท่ากับ 40.13 สูตรที่ 2 เท่ากับ 44.40 และสูตรที่ 3 เท่ากับ 42.90 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัตถุดิบที่มีสีคล้ายกัน ดังนั้นค่าสีของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวเป็นผลมาจากส่วนผสมของวัตถุดิบที่มีสีและปริมาณแตกต่างกันในแต่ละสูตร

Table 4 Appearance of basic formula of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing residues

Treatment	Appearance	Sensory details
Formula 1		It has an orange-red color and looks like a coarse powder. The texture is crispy and crumbly.
Formula 2		It has a yellowish color and looks like a coarse powder. The texture is crispy and crumbly.
Formula 3		It has a yellow-orange color and looks like a coarse powder. The texture is crispy and crumbly.

Note: Formulas 1, 2 and 3 adapted from Porntewabancha (2011)

Table 5 Color values of basic formula of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing residues

Color values	Formula 1	Formula 2	Formula 3
L*	47.86±0.92 ^b	50.53±0.66 ^a	49.30±1.41 ^{ab}
a* ^{ns}	21.20±0.69	19.23±0.83	21.46±3.61
b* ^{ns}	40.13±1.71	44.40±1.44	42.90±2.86

Note: Mean values ± SD with different letters in the row are statistically significantly different ($p < 0.05$);

ns indicates not significantly different ($p > 0.05$).

Table 6 Physicochemical qualities of basic formula of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing residues

Physicochemical qualities	Formula 1	Formula 2	Formula 3
Water Activity (a_w) ^{ns}	0.315±0.01	0.330±0.05	0.328±0.02
Moisture content (%)	6.67±0.51 ^a	6.17±0.98 ^{ab}	6.01±0.15 ^b
Thiobarbituric acid (TBA, mg MDA/Kg)	6.81±0.34 ^a	6.81±0.11 ^a	6.24±0.11 ^b

3.2.3 ปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร แสดงดัง Table 6 พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 และ 3 มีปริมาณน้ำอิสระสูงที่สุด เท่ากับ 0.330 และสูตรที่ 1 มีปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุด เท่ากับ 0.328 โดยจะเห็นว่าสูตรที่ 2 และ 3 มีปริมาณน้ำอิสระสูงกว่าสูตรที่ 1 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากวัตถุดิบบางชนิดมีความชื้นสูงกว่าชนิดอื่น เช่น ผงเห็ดหอม และดอกเกลือ จึงส่งผลต่อปริมาณน้ำอิสระที่สูงขึ้น ทั้งนี้ในการผลิตมีขั้นตอนการนำผงโรยข้าวไปอบแห้งเพื่อเพิ่มความกรอบด้วย จึงส่งผลทำให้ค่าปริมาณน้ำอิสระเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผงโรยข้าวจากผัก (มผช.1511/2562) (Thai Industrial Standards Institute, 2019) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.6 ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phungam *et al.* (2023) พบว่า ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวทดแทนด้วยเห็ดนางฟ้า ร้อยละ 30 มีปริมาณน้ำอิสระ เท่ากับ 0.44 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

3.2.4 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร แสดงดัง Table 6 พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่ 1 มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด คือ ร้อยละ 6.67 และสูตรที่ 3 มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 6.01 ส่วนสูตรที่ 2 มีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างจากสูตรที่ 1 และ 3 เท่ากับ ร้อยละ 6.17 ทั้งนี้ในการผลิตมีการนำผงโรยข้าวไปอบเพื่อเพิ่มความกรอบ จึงส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pomtewabancha (2011)

ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากผักสลัด พบว่า มีปริมาณความชื้นเท่ากับ ร้อยละ 5.08

3.2.5 การเกิดกลิ่นหืน

ค่าการเกิดกลิ่นหืน (TBA) ของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร แสดงดัง Table 6 พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสูตรที่ 1 และ 2 มีค่า TBA สูงที่สุด เท่ากับ 6.81 mg MDA/Kg ส่วนสูตรที่ 3 มีค่า TBA ต่ำที่สุด เท่ากับ 6.24 mg MDA/Kg ซึ่งจะเห็นได้ว่าผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 และ 2 มีค่าการเกิดกลิ่นหืนสูงกว่าสูตรที่ 3 ทั้งนี้ เป็นผลมาจากสัดส่วนของส่วนผสมเป็นชั้นผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศมีอยู่ในปริมาณมากกว่า เมื่อมีการสัมผัสกับออกซิเจนในระหว่างการผลิต จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดกลิ่นหืนได้สูงกว่า

3.2.6 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐาน แสดงดัง Table 7 พบว่า ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร มีค่าคะแนนความชอบต่อทุกคุณลักษณะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 มีค่าคะแนนความชอบทุก ๆ ด้านสูงกว่าสูตรอื่น ซึ่งคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ เท่ากับ 7.93 คะแนน ด้านสี เท่ากับ 7.97 คะแนน กลิ่นรสโดยรวม เท่ากับ 7.83 คะแนน รสชาติ เท่ากับ 8.33 คะแนน ความกรอบ เท่ากับ 7.90 คะแนน และความชอบโดยรวม 8.23 คะแนน ส่วนสูตรที่ 3 มีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏและสีไม่แตกต่างจากสูตรที่ 2 เท่ากับ 7.53 และ 7.53 คะแนน ตามลำดับ แต่มีค่าคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวม รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม เท่ากับ 6.27,

5.93, 5.87 และ 6.07 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากสูตรที่ 1 ซึ่งมีคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวม เท่ากับ 6.00 คะแนน รสชาติ เท่ากับ 5.97 คะแนน ความกรอบ เท่ากับ 5.57 คะแนน และความชอบโดยรวม 5.87 คะแนน แต่มีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏและสีต่ำกว่าที่สุด เท่ากับ 6.40 และ 6.45 คะแนน ทั้งนี้ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 มีส่วนผสมของเครื่องเทศที่มีกลิ่นเฉพาะตัวที่ค่อนข้างแรง จึงทำให้ผู้ทดสอบไม่ชอบสูตรดังกล่าว และมีผลต่อค่าคะแนนความชอบ

จากข้อมูลข้างต้น จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร มีคุณภาพทางเคมีกายภาพไม่แตกต่างกัน และเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผงโรยข้าวจากผัก (มผช. 1511/2562) (Thai Industrial Standards Institute, 2019) แต่ในแง่ของคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 มีค่าคะแนนความชอบของผู้บริโภคต่อคุณลักษณะทุกด้านสูงที่สุด โดยมีคะแนนความชอบโดยรวม เท่ากับ 8.23 คะแนน ดังนั้นจึงทำการคัดเลือกสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 ไปใช้ในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากผักและผลไม้ทอดกรอบสูตรต้นแบบในขั้นต่อไป

3.3 ผลการพัฒนาสูตรต้นแบบผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ

จากการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรพื้นฐาน ซึ่งมีคุณภาพดีและมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดมา 1 สูตร แล้วพัฒนาเป็นสูตรต้นแบบ 3 รสชาติ ได้แก่ รสดั้งเดิม รสแตงโม ปลาแห้ง และรสโนริซอสโชยุ ดัง Figure 1 และผลการทดลองแสดงดัง Table 8 พบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความชอบต่อคุณลักษณะทาง

ประสาทสัมผัสทุก ๆ ด้านของผงโรยข้าวสูตรต้นแบบ ทั้ง 3 รสชาติ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นด้านลักษณะปรากฏ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยผงโรยข้าวรสแตงโมปลาแห้ง มีค่าคะแนนความชอบทุก ๆ ด้านสูงกว่าสูตรอื่น โดยด้านสีเท่ากับ 7.87 คะแนน กลิ่นโดยรวมเท่ากับ 7.90 คะแนน รสชาติเท่ากับ 8.33 คะแนน ความกรอบเท่ากับ 7.90 คะแนน และความชอบโดยรวมเท่ากับ 8.23 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบมากถึงชอบมากที่สุด ส่วนรสโนริซอสโชยุ มีค่าคะแนนความชอบต่อคุณลักษณะทุกด้านรองลงมาจากรสแตงโมปลาแห้ง โดยมีคะแนนความชอบด้านสีเท่ากับ 7.63 คะแนน กลิ่นโดยรวมเท่ากับ 6.23 คะแนน รสชาติเท่ากับ 5.93 คะแนน ความกรอบเท่ากับ 5.90 คะแนน และความชอบโดยรวมเท่ากับ 6.07 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก และรสดั้งเดิม มีค่าคะแนนความชอบต่อคุณลักษณะทุกด้านต่ำกว่าสูตรอื่น ๆ โดยมีคะแนนความชอบด้านสีเท่ากับ 7.20 คะแนน กลิ่นโดยรวมเท่ากับ 6.10 คะแนน รสชาติเท่ากับ 6.03 คะแนน ความกรอบเท่ากับ 5.57 คะแนน และความชอบโดยรวมมีเท่ากับ 5.90 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับเฉย ๆ จนถึงชอบเล็กน้อย

จากผลการพัฒนาสูตรต้นแบบ จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศรสแตงโมปลาแห้ง ได้รับค่าคะแนนความชอบต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทุกด้านสูงกว่าสูตรอื่น ๆ และมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 8.23 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบมากที่สุด ดังนั้นจึงคัดเลือกผงโรยข้าวรสแตงโมปลาแห้ง ไปศึกษาคุณค่าทางโภชนาการในขั้นต่อไป

Table 7 Liking scores of basic formula of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing residues

Sensory attributes	Formula 1	Formula 2	Formula 3
Appearance	6.40±1.22 ^b	7.93±0.80 ^a	7.53±1.41 ^a
Color	6.45±1.22 ^b	7.97±0.80 ^a	7.53±1.41 ^a
Overall flavor	6.00±1.44 ^b	7.83±0.91 ^a	6.27±1.20 ^b
Taste	5.97±1.12 ^b	8.33±0.88 ^a	5.93±1.36 ^b
Crunchiness	5.57±1.17 ^b	7.90±0.89 ^a	5.87±1.41 ^b
Overall liking	5.87±0.86 ^b	8.23±0.68 ^a	6.07±0.94 ^b

Note: Mean values ± SD with different letters in the row are statistically significantly different ($p < 0.05$).



Figure 1 Appearance of the prototype of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing residues

Table 8 Liking scores of prototype formula of rice seasoning (Furikake) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing residues

Sensory attributes	Original	Watermelon	Nori-Shoyu
Appearance ^{ns}	7.50±1.76	7.93±0.94	7.90±1.37
Color	7.20±1.40 ^b	7.87±0.78 ^a	7.63±1.38 ^{ab}
Overall flavor	6.10±1.47 ^b	7.90±0.92 ^a	6.23±1.19 ^b
Taste	6.03±1.19 ^b	8.33±0.88 ^a	5.93±1.14 ^b
Crunchiness	5.57±1.17 ^b	7.90±0.89 ^a	5.90±1.45 ^b
Overall liking	5.90±0.85 ^b	8.23±0.68 ^a	6.07±0.94 ^b

Note: Mean values ± SD with different letters in the row are statistically significantly different ($p \leq 0.05$);

ns indicates not significantly different ($p > 0.05$);

Original: Original flavor according to the basic formula in Table 1

Watermelon: Watermelon with sweet dried fish flavor

Nori-Shoyu: Nori seaweed seasoned with soy sauce flavor

Table 9 Nutritional values of the prototype of rice seasoning (Watermelon with sweet dried fish flavor) product from vacuum-fried vegetable and fruit processing residues

Nutrition values	Contents
Moisture (%)	9.14
Protein (%)	16.01
Fat (%)	18.21
Ash (%)	4.60
Total carbohydrate (%)	52.04
Dietary fiber (g)	7.16
Sugar (g)	43.57
Sodium (mg)	700.70
Vitamin A (μg)	7.82
Beta-carotene ((μg)	46.90
Calcium (mg)	348.40
Iron (mg)	1.61
Energy from fat (kcal per 100 g)	163.89
Total energy (kcal per 100 g)	436.09

3.4 ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศ

จากการนำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศรสแดงโมปลาแห้งที่ได้รับการคัดเลือกไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ผลแสดงดัง Table 9 พบว่าผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวรสแดงโมปลาแห้ง มีความชื้นร้อยละ 9.14 โปรตีนร้อยละ 16.01 ไขมันร้อยละ 18.21 เถ้าร้อยละ 4.60 คาร์โบไฮเดรตทั้งหมดร้อยละ 52.04 โดยเป็นใยอาหาร 7.16 กรัม และน้ำตาล 43.57 กรัม โซเดียม 700.70 มิลลิกรัม วิตามินเอ 7.817 ไมโครกรัม เบต้าแคโรทีน 46.90 ไมโครกรัม แคลเซียม 348.4 มิลลิกรัม เหล็ก 1.61 มิลลิกรัม และมีพลังงานทั้งหมด 436.09 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม โดยเป็นพลังงานจากไขมัน 163.89 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม

4. สรุป

ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวจากของเหลือในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสูตรต้นแบบที่เหมาะสมที่สุด คือ รสแดงโมปลาแห้ง โดยผู้บริโภคให้คะแนนความชอบต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสทุกด้านสูงที่สุด โดยมีคะแนนความชอบโดยรวม เท่ากับ 8.23 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบมากที่สุด และผงโรยข้าวสูตรต้นแบบรสแดงโมปลาแห้งมีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้นร้อยละ 9.14 โปรตีนร้อยละ 16.01 ไขมันร้อยละ 18.21 เถ้าร้อยละ 4.60 คาร์โบไฮเดรตทั้งหมดร้อยละ 52.04 โดยเป็นใยอาหาร 7.16 กรัม และน้ำตาล 43.57 กรัม โซเดียม 700.70 มิลลิกรัม วิตามินเอ 7.817 ไมโครกรัม เบต้าแคโรทีน 46.90 ไมโครกรัม แคลเซียม 348.4 มิลลิกรัม เหล็ก 1.61 มิลลิกรัม และมีพลังงานทั้งหมด 436.09 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม โดยเป็นพลังงานจากไขมัน 163.89 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม ดังนั้น จะเห็นได้ว่าของเหลือจากกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบสุญญากาศสามารถนำมาเพิ่มมูลค่าโดยพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวที่มีรสชาติเป็นที่ชื่นชอบของผู้บริโภคและมีคุณค่าทางโภชนาการได้

5. ข้อเสนอแนะ

1. ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรต้นแบบสามารถปรับปรุงสูตรให้มีรสชาติที่หลากหลายเพิ่มเติม เพื่อให้เกิดความแปลกใหม่และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นได้
2. สามารถนำผลงานวิจัยไปต่อยอด โดยนำวัตถุดิบทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ มาใช้ เพื่อเสริมคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์ เช่น สมุนไพร และธัญพืชต่าง ๆ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทำวิจัย และขอขอบคุณ บริษัท ทรูปเบิล เจ ฟู้ด แอนด์ เบเวอเรจ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัตถุดิบตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Anprung, P. 2004. **Principle of food analysis by sensory evaluation** (1st ed). Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)
- Assawarachan, R. and Tantikul, S. 2021. A review article: vacuum frying technology. **Vocational Education Innovation and Research Journal** 5(2): 124-136. (in Thai)
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International** (17thed). AOAC International, Gaithersburg, MD.
- AOAC. 2016. **Official Methods of Analysis of AOAC International** (20thed). AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Chansataporn, W. and Keomany, D. 2021. Development of Furikake from coconut worm, pp.1179-1206. *In The 11th National and the 5th International PIM Conference on July 16, 2021*. Auditorium, Floor 16, CP All Academy Panyapiwat Institute of Management, Nonthaburi. (in Thai)
- Fellows, P. 2000. **Food Processing Technology, Principles and Practice** (2nd ed). Woodhead Pub, Cambridge.
- Garrayo, J. and Moreira, R. 2002. Vacuum frying of potato chips. **Journal of Food Engineering** 55: 181-191.
- Morida, K. and Khamwachiraphitak, M. 2023. Development of rice seasoning (Furikake) : mala flavored supplemented with dried fish. **VRU Research and Development Journal Science and Technology** 18(1): 101-113. (in Thai)
- Mouritsen, O.G. 2009. **Sushi food for the eye, the body, and the soul** (2nd ed). Springer, New York.
- Nampradit, C. 2021. Development of Fried Kluai Hom Thong (*Musa acuminata* (AAA Group)) Product by Vacuum

- Frying. Master of Science (Agricultural Technology), Rambhai Bani Rajabhat University, Chanthaburi. (in Thai)
- Nimitkeatkai, H., Prommajak, T., Wutthinithisanand, N. and Potaros, T. 2019. Development of instant rice powder from pickled plums. **Agricultural Science Journal** 50(2)(Suppl.): 145-148. (in Thai)
- Pakpot, W., Siri Wattananon, L., Lapsongphon, N. and Lichanporn, I. 2019. Influence of Temperature and Time Drying on Physical and Chemical Quality of Mango Peel Power, pp. 662- 672. *In The 20th National Graduate Research Conference on March 15, 2019*. Khon Kaen University, Khon Kaen. (in Thai)
- Pitak, L. and Wongpichet, S. 2014. Appropriate stage of ripeness and time for vacuum frying of cultivated banana. **Engineering and Applied Science Research** 41(1): 119-126. (in Thai)
- Phonphard, R. 2022. Amaranth (*Amaranthus lividus* L.) Drying using Microwave Combined with Hot Air. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Mahasarakham University. (in Thai)
- Phungam, N., Sukari, S., Kattakdad, S., Utto, W., Phakawan, J. and Settapramote, N. 2023. Study of physical-chemical characteristics of rice seasoning products made from fairy mushrooms for enhanced antioxidant content. **VRU Research and Development Journal Science and Technology** 18(3): 165-179. (in Thai)
- Porn Tewabancha, D. 2011. Development of rice seasoning (Furikake) from lettuce (*Lactuca Sativa* L.). Master of Science (Food Technology), Silpakorn University. (in Thai)
- Rajchasom, S., Seelum, N. and Takonkeaw, S. 2020. Development of seasoning powder and furikake-rice seasoning from fermented soybean. **RMUTP Research Journal Sciences and Technology** 14(2): 173-182. (in Thai)
- Sanguansin, S., Lamun, S., Cheeptamrong, S. and Siwnguan, K. 2017. The Studying of the Optimum Conditions for Frying on the Oil Uptake of the Seasoned Fried Dragon Fruit Peel Product, pp.994-1001. *In The 4th Kamphaeng Phet Rajabhat University Student National Conference on December 22, 2017*. Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet. (in Thai)
- Savo, I., Dragan, M. and Miladin, B. 2012. Specificities of fruit freeze drying and product prices. **Economics of Agriculture** (59)3: 461-471.
- Sripawatakul, O., Tamtin, M. and Kosawatpat., P. 2021. The product development of fish rice- seasoning fish supplemented with green caviar. **Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology** 9(2): 69-82. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2015. **Dried fruits and vegetables (TCPS136/ 2015)** . Thai Community Product Standards. Available Source: <http://tcps.tisi.go.th/public/StandardList.aspx>, April 25, 2023. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2019. **Rice seasoning from vegetables (TCPS459/2012)**. Thai Community Product Standards. Available Source: <http://tcps.tisi.go.th/public/StandardList.aspx>, April 25, 2023. (in Thai)
- Watanachai, P. and Suktanarak, S. 2022. Development of basil-rice seasoning (Furikake) product supplemented with chaya leaves. **VRU Research and Development Journal Science and Technology** 17(2): 131- 140. (in Thai)



Research Article

ข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยาขึ้นรูปด้วยแผ่นความร้อน : องค์ประกอบและค่าดัชนีน้ำตาล

Puffed Brown Rice from Hom Chaiya using Heated Plate: Composition and Glycemic Index

สุภาพร อภิรัตน์านุสรณ์ *

Supaporn Apirattananusorn *

สาขาวิชานวัตกรรมอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

Program in Food Innovation and Nutrition, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Muang, Suratthani 84100, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-07

Revised: 2024-05-28

Accepted: 2024-08-16

Keywords:

Hom Chaiya rice;

puffed brown rice;

glycemic index;

glycemic load

The purpose of this research was to determine the proximate composition of Hom Chaiya rice, and glycemic index (GI) and glycemic load (GL) using *in vitro* starch digestion model of puffed brown rice from Hom Chaiya produced with a heated plate. The moisture content was found to be greater in raw white rice (14.40%) and raw brown rice (13.80%) than that in puffed brown rice (4.07%). Raw brown rice and puffed brown rice contained significantly ($p < 0.05$) higher levels of protein, fat, dietary fiber, and ash contents of 8.69-8.76%, 2.76-2.87%, 3.65-3.89%, and 1.16-1.25%, respectively - than raw white rice, which contained 8.05% 1.30%, 2.28%, and 0.70%, respectively. The carbohydrate content of puffed brown rice (79.6%) was higher than that of raw white rice (73.27%) and raw brown rice (69.50%). Cooked white rice contained 85.21% starch, which was higher than that in cooked brown rice (78.98%) and puffed brown rice (82.11%). Puffed brown rice showed a slower starch digestion rate than both cooked white rice and cooked brown rice. The GI value of puffed brown rice was 75.43, lower than that of cooked white rice (97.00) and cooked brown rice (89.89). In addition, the GL value of puffed brown rice was 18.27, lower than that of cooked white rice (40.32) and cooked brown rice (45.30). Therefore, consumption of Hom Chaiya puffed brown rice is likely to be beneficial for individuals seeking to control blood sugar level based on its GI and GL values.

* Corresponding author.

E-mail address: supapornapi@yahoo.com

Cite this article as:

Apirattananusorn, S. 2025. Puffed brown rice from Hom Chaiya rice by heated plate : Composition and glycemic index. *Recent Science and Technology* 17(3): 261749.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีข้าวหอมไชยา ค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index, GI) ค่ามวลน้ำตาล (Glycemic load, GL) โดยใช้วิธีแบบจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร (*In vitro* starch digestion) ของข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยาที่ขึ้นรูปด้วยแผ่นให้ความร้อน พบว่าความชื้นในข้าวขาวดิบ (ร้อยละ 14.40) และข้าวกล้องดิบ (ร้อยละ 13.80) มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องพอง (ร้อยละ 4.07) ข้าวกล้องดิบและข้าวกล้องพองมีโปรตีน ไขมัน โยอาหาร และเถ้า ร้อยละ 8.69-8.76, 2.76-2.87, 3.65-3.89 และ 1.16-1.25 ตามลำดับ สูงกว่าข้าวขาวดิบที่มีร้อยละ 8.05, 1.30, 2.28 และ 0.70 ตามลำดับ ข้าวกล้องพองมีคาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ 79.6) สูงกว่าข้าวขาวดิบ (ร้อยละ 73.27) และข้าวกล้องดิบ (ร้อยละ 69.50) ข้าวขาวหุงสุกมีปริมาณสตาร์ชร้อยละ 85.21 มากกว่าข้าวกล้องหุงสุก (ร้อยละ 78.98) และข้าวกล้องพอง (ร้อยละ 82.11) ข้าวกล้องพองมีอัตราการย่อยสตาร์ชช้ากว่าข้าวขาวหุงสุก และข้าวกล้องหุงสุก และมีค่า GI เท่ากับ 75.43 ต่ำกว่าข้าวขาวหุงสุก (97.00) และข้าวกล้องหุงสุก (89.89) นอกจากนี้ข้าวกล้องพองมีค่า GL เท่ากับ 18.27 ต่ำกว่าข้าวขาวหุงสุกและข้าวกล้องหุงสุกที่มีค่าเท่ากับ 40.32 และ 45.30 ตามลำดับ ดังนั้นการบริโภคข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยามีแนวโน้มส่งผลดีต่อผู้ที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดตามค่าของ GI และ GL

คำสำคัญ: ข้าวหอมไชยา, ข้าวกล้องพอง, ค่าดัชนีน้ำตาล, ค่ามวลน้ำตาล

1. บทนำ

ข้าวเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย และเป็นอาหารหลักของผู้คนโดยเฉพาะในประเทศทวีปเอเชีย เช่น ไทย เวียดนาม ลาว กัมพูชา เกาหลี และญี่ปุ่น เป็นต้น วิสาหกิจชุมชนอนุรักษ์พันธุ์ข้าวหอมไชยาเป็นวิสาหกิจชุมชนที่มีการปลูกข้าวและอนุรักษ์พันธุ์ข้าวพื้นเมืองเพื่อสืบทอดภูมิปัญญาการปลูกข้าวโดยนำข้าวที่เก็บเกี่ยวได้เก็บไว้บริโภคและจำหน่าย รวมทั้งส่งเสริมการนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าความหลากหลายให้กับสินค้าการอนุรักษ์พันธุ์ข้าวพื้นเมืองนับว่าเป็นการเพิ่มความมั่นคงทางเศรษฐกิจและยังเป็นการรักษาความหลากหลายทางพันธุกรรมที่บ่งบอกถึงสภาพทางภูมิศาสตร์ของแต่ละท้องถิ่นได้เป็นอย่างดี (Kaewkaenkoon *et al.*, 2017)

ข้าวหอมไชยาเป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมืองที่ปลูกในพื้นที่อำเภอไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี แต่เดิมมีการเพาะปลูกต่อเนื่องกันมายาวนานจากรุ่นสู่รุ่น จนภายหลังมีการพัฒนาพันธุ์ข้าวที่เติบโตและเก็บเกี่ยวได้เร็วกว่าข้าวหอมไชยาจึงทำให้เกษตรกรหันไปปลูกข้าวชนิดนั้นแทน ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงของสังคมทำให้พื้นที่ทำนาและผู้สืบทอดการทำนาลดน้อยลง ข้าวหอมไชยาจึงเริ่มสูญหายไป อย่างไรก็ตามยังมีชาวอำเภอไชยาที่มีความต้องการอนุรักษ์พันธุ์ข้าวชนิดนี้ไว้ให้รุ่นลูกหลาน จึงมีการรวมกลุ่มกันเป็นวิสาหกิจชุมชนอนุรักษ์พันธุ์ข้าวหอมไชยา และสร้างศูนย์เรียนรู้อนุรักษ์พันธุ์ข้าวหอมไชยาขึ้น มีสมาชิกรวมกลุ่มกันปลูกข้าวหอมไชยาโดยมีพื้นที่เพาะปลูกรวมทั้งหมดเพียง 12 ไร่ (Somkeatkun and Ruengdet, 2020) เพื่อร่วมมือร่วมใจกันช่วยกันฟื้นฟูพันธุ์ข้าวหอมไชยามีให้สูญหายไป และช่วยกันผลักดันให้ข้าวหอมไชยาได้รับการรับรองเป็นสินค้าบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ หรือสินค้า GI (Geographical Indication)

ข้าวพอง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำข้าวสารหรือข้าวกล้อง เช่น ข้าวเจ้า ข้าวเหนียว ที่หุงหรือึ่งให้สุก มาผ่านการทำให้แห้ง ทอดหรือคั่วให้พอง กรณีที่ติดกันเป็นชั้นต้องแยกออก

ได้ง่ายด้วยมือ มีค่า a_w ต่ำ ไม่เกิน 0.6 (Thai Industrial Standards Institute, 2019) ข้าวพองยังคงได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากข้าวพองมีราคาไม่แพง บริโภคได้ง่าย ข้าวยังคงเป็นเมล็ดที่มีความกรอบนอก นุ่มภายใน ข้าวพองยังมีสตาร์ชทนต่อการย่อยสูงกว่าข้าวไม่พองทั่วไป จึงเหมาะเป็นอาหารว่างสำหรับผู้บริโภคที่คำนึงถึงปริมาณแคลอรีที่ได้รับ (Sonsomboonsuk *et al.*, 2024) ข้าวกล้องเป็นข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสี จึงยังคงมีสารอาหารต่าง ๆ มากกว่าข้าวขัดขาว ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการผลิตข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยาโดยนำมาผลิตเป็นข้าวพองแบบไม่ทอดน้ำมัน ใช้หลักการการระเหยน้ำออกอย่างรวดเร็วทำให้เมล็ดข้าวสุกและเกิดพองตัวขึ้นด้วยเครื่องทำข้าวพองที่ขึ้นรูปด้วยแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ใช้เวลาในการผลิตที่รวดเร็วกว่าการทอดด้วยน้ำมัน (Bupata *et al.*, 2020) ผลผลิตทันทีที่ได้มีความกรอบปราศจากน้ำมันและนำมาบริโภคเป็นอาหารว่างได้ กระบวนการผลิตข้าวพองนี้อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการทนต่อการย่อยของสตาร์ชข้าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบของข้าวหอมไชยา และผลของการแปรรูปข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยาที่มีผลต่อค่าดัชนีน้ำตาลและค่ามวลน้ำตาล การบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลและค่ามวลน้ำตาลต่ำสามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดไม่ให้สูงเกินไป ป้องกันการเกิดโรคเบาหวานได้ งานวิจัยนี้เป็นการส่งเสริมให้เห็นคุณค่าของข้าวหอมไชยา ทำให้ผู้บริโภคหันมาบริโภคและเกษตรกรหันมาเพาะปลูกข้าวหอมไชยากันมากขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและการแปรรูปข้าวพอง

2.1.1 วัตถุดิบ

ข้าวหอมไชยา ได้แก่ ข้าวขาวดิบ (Raw white rice) และข้าวกล้องดิบ (Raw brown rice) (Figure 2 (a), (b)) ได้รับจากวิสาหกิจชุมชนอนุรักษ์พันธุ์ข้าวหอมไชยา เพาะปลูกบริเวณตำบล

ทุ่ง อำเภอไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี (เป็นข้าว ปี พ.ศ. 2563 เป็นปีที่ศึกษา)

2.1.2 การแปรรูปข้าวพอง

นำข้าวกล้องหอมไชยามาแปรรูปเป็นข้าวพองด้วยเครื่องทำข้าวพอง (Puffed rice machine ไม่ปรากฏยี่ห้อ) ขนาด 480 x 320 x 560 mm กำลังไฟฟ้า 1.4 กิโลวัตต์ แม่พิมพ์ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67 mm (Figure 1) อาศัยหลักการขึ้นรูปด้วยแผ่นให้ความร้อน ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 250 องศาเซลเซียส นำข้าวกล้องดิบจำนวน 500 กรัม ใส่ในกรวยของเครื่องทำข้าวพอง เมื่ออุณหภูมิถึงระดับที่ตั้งไว้ จึงปล่อยข้าวลงมาในแม่พิมพ์ แล้วอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนเป็นระยะเวลา 4-5 วินาที จนได้เป็นแผ่นข้าวพอง จากนั้นนำมาแยกออกจากกันด้วยมือได้เป็นข้าวกล้องพอง (Puffed brown rice) ที่ยังมีรูปทรงเป็นเมล็ด (Figure 2 (c))

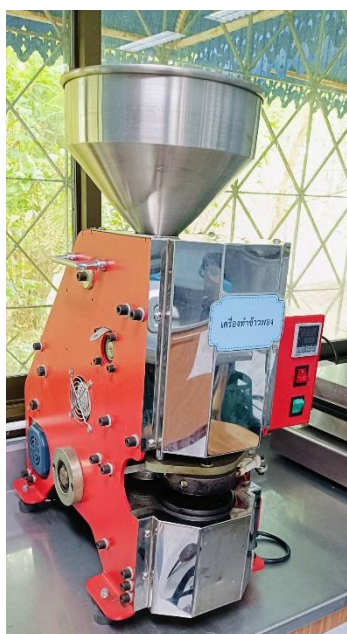


Figure 1 Puffed rice machine



(a) Raw white rice (b) Raw brown rice (c) Puffed brown rice

Figure 2 Hom Chaiya rice

2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ค่าสี และอัตราส่วนการพองตัว

นำข้าวขาวดิบ ข้าวกล้องดิบ และข้าวกล้องพอง มาวิเคราะห์องค์ประกอบตามวิธี AOAC (2016) ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน โยอาหาร เถ้า และคาร์โบไฮเดรต (ได้จากการคำนวณ) วัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี (ยี่ห้อ Minolta รุ่น CR-400) แสดงค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) และค่าความเป็นสีน้ำเงิน-สีเหลือง (b^*) และวิเคราะห์อัตราส่วนการพองตัวของข้าวกล้องพองโดยดัดแปลงวิธีจาก Segnini *et al.* (2004) (อัตราส่วนการพองตัว = ปริมาตรของข้าวกล้องพอง/ปริมาตรของข้าวกล้องดิบ)

2.3 การหาค่าปริมาณสารทั้งหมด ค่าดัชนีน้ำตาล และค่ามวลน้ำตาล

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวขาวหุงสุกและข้าวกล้องหุงสุก

นำข้าวดิบจำนวน 80 กรัม ล้างด้วยน้ำ 240 กรัม เป็นเวลา 30 วินาที เติมน้ำเปล่าจนมีน้ำหนัก 280 กรัม นำไปหุงข้าวจนสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าอัตโนมัติ (ยี่ห้อ Sharp รุ่น KS-COM18)

2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารทั้งหมด (Total starch) โดยใช้ Total starch test kit (Megazyme, Ireland) ตามวิธี AOAC 996.11 และ AACC 76-13.01

ซึ่งตัวอย่างที่บดละเอียดแล้ว 100 มิลลิกรัม เติมน้ำตาล ความเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำละลาย 2 โมลาร์ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร กวนตัวอย่างด้วยแท่งแม่เหล็กคนสารในอ่างน้ำแข็งจนกระทั่งตัวอย่างละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 600 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเอนไซม์ Thermostable α -amylase ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ตามด้วยเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส 0.1 มิลลิลิตร นำไปย่อยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร นำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล D-กลูโคส โดยใช้ตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลาย Glucose determination reagent (Glucose oxidase/ peroxidase; GOPOD reagent) ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร ตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง (Visible spectrophotometer ยี่ห้อ Metertech รุ่น SP880) ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร เทียบกับสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร คำนวณปริมาณสารทั้งหมดดังสมการ

$$\text{สตาร์ชทั้งหมด (กรัม/ 100 กรัม)} = \Delta A \times F \times \frac{100}{0.1} \times \frac{1}{1000} \times \frac{100}{w} \times \frac{162}{180}$$

โดยที่

ΔA = ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อเทียบกับ blank
 F = Factor ที่ใช้เปลี่ยนหน่วยจากการดูดกลืนแสงเป็นไมโครกรัมของน้ำตาลกลูโคส
 $100/0.1$ = Volume correction (0.1 mL taken from 100 mL)
 $1/1000$ = ค่าการเปลี่ยนหน่วยจากไมโครกรัมเป็นมิลลิกรัม
 W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างในหน่วยมิลลิกรัม
 $= \text{Weight} \times [(100 - \text{Moisture content})/100]$
 $100/W$ = ค่าการเปลี่ยนหน่วยเป็น %
 $162/180$ = Factor สำหรับเปลี่ยน Free D-glucose เป็น Anhydro-glucose

2.3.3 การวิเคราะห์หาค่าดัชนีน้ำตาล และค่ามวลน้ำตาล

ตรวจวิเคราะห์หาค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index, GI) และค่ามวลน้ำตาล (Glycemic load, GL) โดยดัดแปลงตามวิธีของ Goñi *et al.* (1997) Sopade and Gidley (2009) และ Na-Nakorn *et al.* (2019) ใช้วิธีแบบจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร ด้วยการย่อยในหลอดทอง (*In vitro* starch digestion) โดยชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดแล้ว 0.5 กรัม เติมสารละลายเอนไซม์ α -amylase (Porcine pancreatic α -amylase, A-3176, Sigma-Aldrich, 250 หน่วยต่อมิลลิกรัม, 20 มิลลิโมลาร์ โซเดียมบัฟเฟอร์ pH 6.9 ผสมกับ 6.7 มิลลิโมลาร์ โซเดียมคลอไรด์) ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ Pepsin (P-6887, Sigma-Aldrich) 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร, 0.02 โมลาร์ กรดไฮโดรคลอริก pH 2 ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร แล้วนำไปย่อยในอ่างน้ำบ่มเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Julabo รุ่น SW22) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และหยุดการทำงานของเอนไซม์ด้วยสารละลาย 0.02 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมสารละลายเอนไซม์ผสมระหว่าง Pancreatin (P-1750, Sigma-Aldrich, 2 หน่วยต่อมิลลิลิตร, 0.2 โมลาร์ NaOAc, pH 6) และ Amyloglucosidase (A-7420, Sigma-Aldrich, 28 หน่วยต่อมิลลิลิตร, 0.2 โมลาร์ NaOAc, pH 6) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร จากนั้นสุ่มตัวอย่างปริมาณ 100 ไมโครลิตร มาตรวจหาปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง Glucose meter (ยี่ห้อ Accu-Chek รุ่น Performa) ตามระยะเวลาที่ 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที โดยเวลาที่ 0 นาที คือการสุ่มตัวอย่างมาก่อนเติมสารละลายเอนไซม์ผสม และนำค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในแต่ละระยะเวลาที่ได้ มาคำนวณหาร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยในแต่ละเวลา โดยเทียบกับปริมาณสตาร์ชทั้งหมดที่ได้ คำนวณตามวิธีการของ Na-Nakorn *et al.* (2019) และ Sopade and Gidley (2009) ตามสมการ First-order kinetic ดังนี้

$$C_t = C_\infty (1 - e^{-kt})$$

โดยที่

C_∞ = ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยที่เวลา 240 นาที
 C_t = ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยที่เวลาต่าง ๆ
 k = อัตราการย่อยต่อนาที
 t = เวลาในการย่อย (นาที)

คำนวณหาค่า Hydrolysis index (HI) โดยนำค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Area under curves, AUC) ของตัวอย่างเทียบกับค่า AUC ของขนมปังขาว (Reference food) ดังนี้

$$HI = \frac{AUC_{\text{sample}}}{AUC_{\text{white bread}}} \times 100$$

นำค่า HI มาคำนวณหาค่า GI ดังสมการ

$$GI = 39.51 + (0.570 \times HI)$$

นำค่า GI มาคำนวณค่า GL จากปริมาณ 180 g per serving ดังสมการ

$$GL = GI \times \frac{\text{Available carbohydrate per serving (g)}}{100}$$

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ Completely randomized design (CRD) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple rang test โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS version 21

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมี ค่าสี และอัตราส่วนการพองตัวของข้าวหอมไชยา

ข้าวหอมไชยาที่เป็นข้าวขาวดิบบและข้าวกล้องดิบบมีความชื้นร้อยละ 14.40 และ 13.80 ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (Table 1) ข้าวกล้องเป็นข้าวที่ขัดสีเอาข้าวเปลือกออก และยังคงมีส่วนของจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวหรือรำข้าวติดเมล็ดอยู่ บริเวณจมูกข้าวและรำข้าวมีส่วนของโปรตีน ไขมัน โยอาหาร แร่ธาตุและวิตามิน อยู่จำนวนมาก (Sangkod *et al.*, 2021; Sivakamasundari *et al.*, 2021; Phanruang *et al.*, 2022) ดังนั้น จะเห็นว่าข้าวกล้องดิบบจากข้าวหอมไชยาจึงมีปริมาณโปรตีน ไขมัน โยอาหาร และเถ้า เท่ากับร้อยละ 8.69, 2.87, 3.89, และ 1.25 ตามลำดับ มากกว่าข้าวขาวดิบบอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ยกเว้นปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดข้าวขาวเช่นเดียวกับข้าวชนิดอื่นทั่วไป (Luh *et al.*, 1991) ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าในข้าวกล้องมีค่าใกล้เคียงกับข้าวกล้องพันธุ์พื้นเมืองในจังหวัดตรังที่มีการรายงานไว้ว่ามีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 6.38-8.79, 1.63-2.41 และ 1.25-1.75 ตามลำดับ (Chooklin *et al.*, 2017) เมื่อนำข้าวกล้องดิบมาแปรรูปเป็นข้าวกล้องพองพบว่ามีความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 4.07 มีปริมาณโปรตีน ไขมันใยอาหาร และเถ้า ใกล้เคียงกับข้าวกล้องดิบคือร้อยละ 8.76, 2.76, 3.65 และ 1.16 ตามลำดับ ยกเว้นคาร์โบไฮเดรตที่มีค่าสูงกว่าคือมีร้อยละ 79.6 เนื่องจากมีความชื้นน้อยกว่าข้าวขาวดิบ มีค่าสี L^* 95.33 ค่า a^* -0.14 และค่า b^* 25.31 (Table 2) มีลักษณะเป็นเมล็ดสีขาว ข้าวกล้องดิบมีลักษณะเป็นเมล็ดสีน้ำตาลอ่อน โดยมีค่า

สี L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 85.45, 1.26 และ 13.02 ตามลำดับ Chooklin *et al.* (2017) รายงานว่าข้าวกล้องมีค่าสี L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 60.81-66.08, 4.78-6.19 และ 19.45-24.78 ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกหรือรงควัตถุที่อยู่บริเวณรำข้าว ส่วนข้าวกล้องพองที่ทำจากข้าวกล้องดิบมีค่า a^* และ b^* เท่ากับ 0.98 และ 11.70 ใกล้เคียงกับข้าวกล้องดิบ แต่มีค่าความสว่างน้อยกว่าข้าวกล้องดิบ คือมีค่า L^* เท่ากับ 72.18 ข้าวกล้องพองที่ได้มีความกรอบกรอบเหมือนข้าวพองทั่วไป มีอัตราส่วนการพองตัวเท่ากับ 4.22 ± 0.84 สอดคล้องกับการพองตัวของข้าวขาวหอมปทุมธานี 1 ที่ขึ้นรูปด้วยแผ่นให้ความร้อนมีค่า $3.22-5.12$ ขึ้นอยู่กับความชื้นของข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการให้ความร้อน (Bupata *et al.*, 2020)

Table 1 Proximate composition of Hom Chaiya rice

Composition (%)	Raw white rice	Raw brown rice	Puffed brown rice
Moisture	14.40±0.49 ^b	13.80±0.19 ^b	4.07±0.44 ^a
Protein	8.05±0.15 ^a	8.69±0.17 ^b	8.76±0.25 ^b
Fat	1.30±0.09 ^a	2.87±0.09 ^b	2.76±0.14 ^b
Dietary fiber	2.28±0.07 ^a	3.89±0.34 ^b	3.65±0.10 ^b
Ash	0.70±0.02 ^a	1.25±0.06 ^b	1.16±0.07 ^b
Carbohydrate	73.27±0.16 ^b	69.50±0.10 ^a	79.6±0.20 ^c

Mean values (dried wt.) of 3 replicate measurement $\pm$ standard deviation with different superscript letters along the same row are significantly different at $p < 0.05$

Table 2 Color values of Hom Chaiya rice

Color values	Raw white rice	Raw brown rice	Puffed brown rice
L^*	95.33±01.75 ^c	85.45±1.78 ^b	72.18±02.93 ^a
a^*	-0.14±0.04 ^a	1.26±0.10 ^b	0.98±00.44 ^b
b^*	25.31±0.09 ^b	13.02±0.09 ^a	11.70±0.14 ^a

Mean values of 3 replicate measurement $\pm$ standard deviation with different superscript letters along the same row are significantly different at $p < 0.05$

Table 3 Starch content, GI and GL value of Hom Chaiya rice

Parameter	Cooked white rice	Cooked brown rice	Puffed brown rice
% Starch (dried wt.)	85.21±0.44 ^c	78.98±0.01 ^a	82.11±0.16 ^b
GI	97.00±0.82 ^c	89.89±0.86 ^b	75.43±0.33 ^a
GL	40.32±0.34 ^b	45.30±0.43 ^c	18.27±0.08 ^a

Mean values of 3 replicate measurement $\pm$ standard deviation with different superscript letters along the same row are significantly different at $p < 0.05$

3.2 ปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ค่าดัชนีน้ำตาล และค่ามวลน้ำตาล

ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดในข้าวหอมไชยา พบว่าข้าวขาวหุงสุกมีค่าร้อยละ 85.21 มีค่ามากกว่าข้าวกล้องหุงสุกที่มีสตาร์ชร้อยละ 78.98 (Table 3) ข้าวกล้องหุงสุกโดยทั่วไปมีปริมาณไขมันใยอาหาร และเถ้า ที่มากกว่าข้าวขาวหุงสุกจึงทำให้มีปริมาณสตาร์ชน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวชนิดเดียวกัน (Wongpiyachon *et al.*, 2017; Kaur *et al.*, 2016) แต่พบว่าข้าวกล้องพองจากข้าวกล้องหอมไชยามีปริมาณสตาร์ชร้อยละ 82.11 สูงกว่าข้าวกล้องหุงสุก (ร้อยละ 78.98) อาจเนื่องมาจากการทำข้าวกล้องพองที่ใช้อุณหภูมิสูง (250 องศาเซลเซียส) ทำให้เม็ดสตาร์ชแตกตัวและกระจายตัวออกมาได้ดี

ค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index) หรือค่า GI เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณน้ำตาลในเลือดที่เพิ่มขึ้นหลังจากการรับประทานอาหารเทียบกับกลูโคสโดยให้ค่าของกลูโคสที่วัดได้เทียบเท่ากับ 100 สามารถแบ่งอาหารตามค่า GI ได้ 3 ชนิด ได้แก่ อาหารที่มีค่า GI ต่ำ ($GI \leq 55$) อาหารที่มีค่า GI ปานกลาง ($GI = 56-69$) และอาหารที่มีค่า GI สูง ($GI \geq 70$) (Sethupathy *et al.*, 2020) เมื่อทดสอบความสามารถในการย่อยของข้าวโดยใช้วิธีแบบจำลองการย่อยในกระเพาะอาหารด้วยการย่อยในหลอดทดลองโดยคำนวณเป็นร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อย (% Digested starch) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ (Digestion time) เทียบกับขนมปัง (White bread) พบว่าข้าวกล้องพองที่ทำจากข้าวกล้องหอมไชยา (PBR) มีอัตราการย่อยสตาร์ชช้ากว่าข้าวกล้องหุงสุก (CBR) และข้าวขาวหุงสุก (CWR) เมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที (Figure 3) อาจมีผลมาจากระดับการเกิดเจลลิตในเซชัน ลักษณะการพองตัวของเม็ดสตาร์ช การเกิดผลึกใหม่ของสตาร์ช องค์ประกอบของเมล็ดข้าว ได้แก่ โปรตีน และไขมัน ที่สามารถไปเกาะจับกับโมเลกุลของอะไมโลส เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เกาะเกี่ยวกับโปรตีนหรือไขมันเกิด

เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความคงทนต่อการย่อย รวมถึงปริมาณของอะไมโลส ที่มีผลทำให้น้ำตาลถูกย่อยได้ช้าลง และมีผลต่อการลดระดับน้ำตาลในเลือดได้ มีรายงานว่าข้าวหอมไชยามีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 18.82 และมีโปรตีนร้อยละ 8.66-9.78 และอุดมไปด้วยวิตามิน (เอ อี บี 1 และ บี 2) แร่ธาตุ (เหล็ก สังกะสี และแคลเซียม) แกมมาโอริซานอล กรดแกมมา-อะมิโนบิวทีริก (GABA) และสารพฤกษเคมีต่าง ๆ (Rattanadet, 2019; Zhiqiang *et al.*, 2019; Itagi *et al.*, 2023; Venkatachalam and Charoenphun, 2023) ข้าวกล้องมีสารออกฤทธิ์ตามธรรมชาติที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย Panlasigui and Thompson (2006) รายงานว่าการบริโภคข้าวกล้องที่มีค่า GI ต่ำกว่าข้าวขาวสามารถป้องกันการเกิดโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ในคนทั่วไป และสามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวานได้

จากการทดลองพบว่าข้าวขาวหุงสุกมีค่า GI เท่ากับ 97.00 สูงกว่าข้าวกล้องหุงสุกที่มีค่า GI 89.89 และข้าวกล้องพองที่มีค่า 75.43 (Table 3) ข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยา มีค่า GI ใกล้เคียงกับข้าวพองจากข้าวขาวที่รายงานไว้ว่ามีค่า GI เท่ากับ 74 (Kaur *et al.*, 2016) จึงเป็นไปได้ว่าการบริโภคข้าวพองช่วยให้การย่อยเป็นกลูโคสช้าลงมากกว่าการบริโภคข้าวหุงสุก ส่วนค่ามวลน้ำตาล (Glycemic load) หรือค่า GL เป็นปริมาณน้ำตาลหรือคาร์โบไฮเดรตในอาหารที่จะทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงขึ้นต่อจำนวนหนึ่งหน่วยบริโภค มีอยู่ 3 ระดับ คืออาหารที่มีค่า GL ต่ำ (≤ 10) อาหารที่มีค่า GL ปานกลาง (11-19) และอาหารที่มีค่า GL สูง (≥ 20) (Venn and Green, 2007) ในที่นี้จะเห็นว่าการบริโภคข้าวกล้องพอง จำนวน 180 กรัม มีค่า GL เท่ากับ 18.27 ต่ำกว่าข้าวขาวหุงสุกและข้าวกล้องหุงสุกที่มีค่า 40.32 และ 45.30 ตามลำดับ

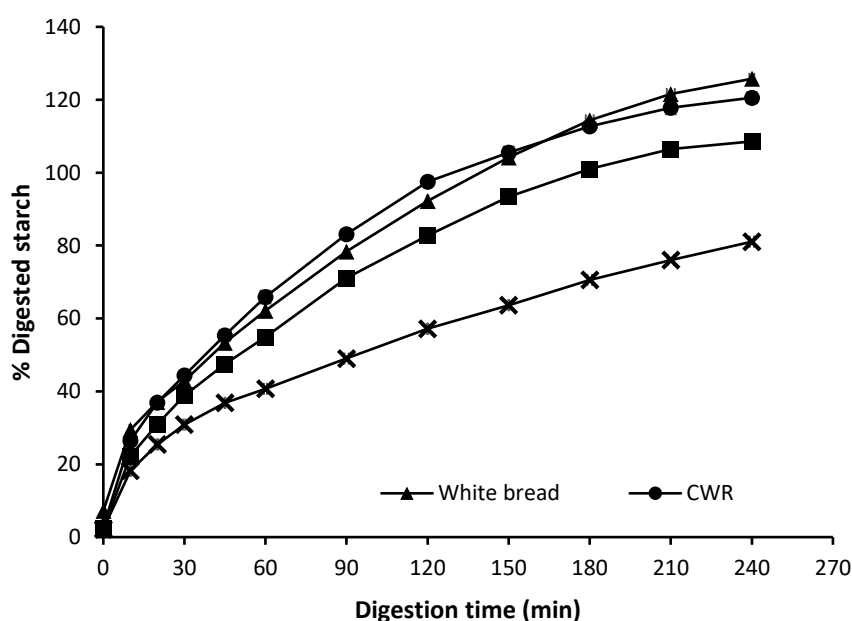


Figure 3 *In vitro* starch digestibility of CWR (Cooked white rice), CBR (Cooked brown rice) and PBR (Puffed brown rice) compared with white bread (Reference sample) during 240 min

4. สรุป

การศึกษาการทำข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยาโดยการขึ้นรูปด้วยแผ่นให้ความร้อนมีผลต่อระดับการย่อยของสตาร์ชในระบบจำลองการย่อย โดยมีผลทำให้มีอัตราการย่อยสตาร์ชในสภาวะจำลองช้ากว่าข้าวกล้องหุงสุก และข้าวขาวหุงสุก และมีค่า GI และ ค่า GL ที่ต่ำกว่าด้วย คือมีค่า 75.43 และ 18.27 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการบริโภคข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยามีแนวโน้มที่ช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด โดยทำให้การย่อยเป็นกลูโคสช้าลงมากกว่าการบริโภคข้าวหุงสุกทั่วไป ถึงแม้ว่าข้าวกล้องพองจากข้าวหอมไชยายังคงเป็นอาหารที่มีค่า GI สูง ($GI \geq 70$) แต่ก็มีค่า GL ปานกลาง ($GL = 11-19$) อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาลงเพิ่มเติมในสิ่งมีชีวิต (*In vivo* method) รวมถึงมีการทดสอบทางด้านกายภาพ เช่น เนื้อสัมผัส และประเมินทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องพอง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขานวัตกรรมอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และกองบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และงานบริการวิชาการในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2016. **Official Methods of Analysis of AOAC International** (20th ed). Gaithersburg, USA.
- Bupata, C., Pathaveerat, S. and Sanchatjate, P. 2020. Study on puffing of rice using a rice cake machine. **Thai Society of Agricultural Engineering Journal** 26(2): 37-46. (in Thai)
- Chooklin, S., Muadsri, T. and Purintrapibal P. 2017. Nutritional values of Trang indigenous brown rice. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 12(2): 285-296. (in Thai)
- Goñi, I., Garcia-Alonso, A. and Saura-Calixto, F. 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. **Nutrition Research** 17(3): 427-437.
- Itagi, H., Sartagoda, K.J.D., Pratap, V., Roy, P., Tiozon, R.N., Regina, A. and Sreenivasulu, N. 2023. Popped rice with distinct nutraceutical properties. **LWT - Food Science and Technology** 173: 114346.
- Kaur, B., Ranawana, V. and Henry, J. 2016. The glycaemic index of rice and rice products : A review, and table of GI values. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 56: 215-236.
- Kaewkaenkoon, K., Pattamang, W., Pang-On, N., Lapjit, F.P., Phumchantuk, P., Borisutdhi, Y. and Choenkwan, S. 2017. In-situ rice genetic conservation through local communities : A lesson on conservation in Northeast Thailand. **Khon Kaen Agriculture Journal** 45 (Suppl. 1): 1528-1533. (in Thai)
- Luh, B.S., Barber, S. and Benedito de Barber, C. 1991. Rice bran : Chemistry and technology, pp. 732-781. In Luh, B.S., ed. **Rice utilization**. Springer Publishers, New York.
- Na-Nakorn, K., Kulrattanarak, T., Hamaker, B.R. and Tongta, S. 2019. Starch digestion kinetics of extruded reformed rice is changed in different ways with added protein or fiber. **Food and Function** 10(8): 4577-4583.
- Panlasigui, L.N. and Thompson, L.U. 2006. Blood glucose lowering effects of brown rice in normal and diabetic subjects. **International Journal of Food Sciences and Nutrition** 57(3-4): 151-158.
- Phanruang, S., Thongnoi, P. and Buabdee, O. 2022. Development of rice germ powder fortified protein. **PSRU Journal of Science and Technology** 7(1): 129-139. (in Thai)
- Rattanadet, W. 2019. Impact of germination on the chemical profile of HomChaiya Rice Wort and Beer. Master of Science, Prince of Songkla University, Hatyai Campus.
- Sangkod, U., Junrod, K., Aiamsaard, K., Thampitak, K. and Hwanhlem, N. 2021. Chemical characteristics of rice bran and its growth enhancement of probiotic *Pediococcus acidilactici* V202. **Naresuan Agriculture Journal** 18(2): 1-11. (in Thai)
- Segnini, S., Pedreschi, F. and Djemek, P. 2004. Volume measurement method of potato chips. **International Journal of Food Properties** 7(1): 37-44.
- Sethupathy, P., Suriyamoorthy, P., Moses, J.A. and Chinnaswamy, A. 2020. Physical, sensory, in-vitro starch digestibility and glycaemic index of granola bars prepared using sucrose alternatives. **International Journal of Food Science & Technology** 55(1): 348-356.
- Sivakamasundari, S. K., Priyanga, S., Moses, J. A. and Anandharamakrishnan, C. 2021. Impact of processing techniques on the glycemic index of rice. **Critical**

Reviews in Food Science and Nutrition 62(12): 3323-3344.

Somkeatkun, W. and Ruengdet, K. 2020. The farming promotion approaches of local Chaiya native rice in Chaiya district, Suratthani province. **Journal of Liberal Arts and Management Science Kasetsart University** 7(2): 37-53. (in Thai)

Sonsomboonsuk, S., Junyusen, T., Moolkaew, P., Junyusen, P., Treeamnuk, T., Taengsopha, P., Chatchavanthatri, N., Nawong, S. and Pakawanit, P. 2024. Effects of cooking methods on the physicochemical, textural and microstructural properties of hot salt puffed germinated brown rice. **Journal of Agriculture and Food Research** 15: 101001.

Sopade, P.A. and Gidley, M.J. 2009. A Rapid in-vitro digestibility assay based on glucometry for investigating kinetics of starch digestion. **Starch/Stärke** 61(5): 245-255.

Thai Industrial Standards Institute. 2019. **OTOP Standard 743/2019 Puffed rice**. Ministry of Industry. (in Thai)

Venkatachalam, K. and Charoenphun, N. 2023. Influence of Pomelo (*Citrus maxima*) Pericarp essential oil on the physicochemical properties of HomChaiya rice (*Oryza sativa* L. cv. HomChaiya) flour-derived edible films. **Membranes** 13(4): 435.

Venn, B.J. and Green, T.J. 2007. Glycemic index and glycemic load: measurement issues and their effect on diet-disease relationships. **European Journal of Clinical Nutrition** 61(Suppl. 1): s122-s131.

Wongpiyachon, S., Songchitsomboon, S., Wasusun, A., Sukviwat, W. and Maneenin, P. 2017. Glycemic index of 12 Thai rice varieties. **Thai Rice Research Journal** 8(2): 54-69. (in Thai)

Zhiqiang, J., Fenglin, B., Yanbin, C. and Bianxia, B. 2019. Interactions between protein, lipid and starch in foxtail millet flour affect the *in vitro* digestion of starch. **CyTA-Journal of Food** 17(1): 640-647.



Research Article

ผลของการหมักต่อต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ
และการต้านอนุมูลอิสระในสะตอและหน่อไม้ไผ่ตง

Effect of Fermentation on Physical and Chemical Characteristics, Bioactive Compounds,
and Antioxidant Activity in Bitter Bean and Bamboo Shoot

สุกัญญา ไหมเครือแก้ว^{a*}, สุภาพร อภิรัตน์นุสรณ์^a, ชลิดา เลื่อมใสสุข^b, วรณพิชญ์ จุลกัลป์^c และ สุพรรณิการ์ ศรีบัวทอง^a
Sukanya Maicaurkaew^{a*}, Supaporn Apirattananusorn^a, Chalida Lueamsaisuk^b, Wannapit Junlakan^c
and Supannikar Sribuathong^a

^a สาขาวิชานวัตกรรมอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

^a Department of Food Food innovation and Nutrition, Faculty of Science and Technology Suratthani Rajabhat University, Muang, Suratthani 84100, Thailand.

^b สาขาวิชาธุรกิจอาหาร คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

^b Department of Food Bussiness, Faculty of Management Science, Suratthani Rajabhat University, Muang, Suratthani 84100, Thailand.

^c สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

^c Department of Occupational health and safety, Faculty of Science and Technology Suratthani Rajabhat University, Muang, Suratthani 84100, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-06-29

Revised: 2024-10-01

Accepted: 2024-10-07

Keywords:

fermentation;

bioactive compound;

antioxidant;

bitter bean;

bamboo shoot

Fermentation is a folk wisdom used to extend the shelf life of food and make it taste better. In addition, fermentation produces probiotic bacteria that are beneficial to the body. This research aims to study the effects of fermentation on the physical and chemical characteristics, bioactive compounds, and antioxidant activity in bitter bean (*Parkia speciosa*) and bamboo shoots (*Dendrocalamus asper*). Bitter bean and bamboo shoots were fermented under controlled laboratory conditions using a brine solution consisting of 3 % salt and 40 % rice wash. The solution was brought to a boil and allowed to cool before being poured over the prepared samples in sterile containers. The fermentation process was carried out over a period of 14 days with the containers sealed. Bitter bean and bamboo shoots were fermented in a laboratory setting and compared with market-sourced fermented bitter bean and bamboo shoots, as well as fresh bitter bean and bamboo shoots. The results showed that that fermentation led to decreased lightness (L^*) and yellowness (b^*), but increased redness (a^*). Additionally, fermentation reduced pH while increasing ash and acid content compared to fresh bamboo shoots ($p < 0.05$). Furthermore, fermentation significantly boosted antioxidant activity, total phenolic content, total tannins, GABA, and beta-carotene levels ($p < 0.05$). However, it caused a significant reduction in vitamin C, chlorophyll A, B, and total chlorophyll levels ($p < 0.05$). In summary, fermenting bitter bean and bamboo shoots affected the physical and chemical characteristics, as well as the bioactive compound and antioxidant activity properties.

© 2025 Maicaurkaew, S., Apirattananusorn, S., Lueamsaisuk, C., Junlakan, W. and Sribuathong, S. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: Sukanya-011@hotmail.com

Cite this article as:

Maicaurkaew, S., Apirattananusorn, S., Lueamsaisuk, C., Junlakan, W. and Sribuathong, S. 2025. Effect of Fermentation on Physical and Chemical Characteristics, Bioactive Compounds, and Antioxidant Activity in Bitter Bean and Bamboo Shoot. *Recent Science and Technology* 17(3): 263787.

บทคัดย่อ

การหมักดองเป็นภูมิปัญญาชาวบ้านเพื่อใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร ทำให้อาหารมีรสชาติดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดจุลินทรีย์โปรไบโอติกที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการหมักดองต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและการต้านอนุมูลอิสระของสะตอและหน่อไม้ไผ่ดอง โดยนำสะตอและหน่อไม้ไผ่มาทำการหมักดองในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบกับสะตอและหน่อไม้ไผ่ดองที่ขายในท้องตลาด และสะตอสดและหน่อไม้ไผ่สด การหมักดองสะตอและหน่อไม้ไผ่ในห้องปฏิบัติการโดยใช้น้ำดองที่มีเกลือร้อยละ 3 นำข้าวข้าวร้อยละ 40 นำไปต้มให้เดือด ทิ้งไว้ให้เย็น เทให้ท่วมสะตอและหน่อไม้ในขวด ปิดฝา ทำการหมักดอง เป็นเวลา 14 วัน ผลการศึกษาพบว่า การหมักดองสะตอและหน่อไม้ไผ่ดองส่งผลต่อ ค่าสี ค่าความสว่าง (L^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง และมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น pH ที่ต่ำลง และปริมาณกรด และเถ้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับหน่อไม้ไผ่สด ($p < 0.05$)ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณแทนนินทั้งหมด ทาบ และเบต้าแคโรทีน เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และการหมักดองมีผลให้ปริมาณวิตามินซี ปริมาณคลอโรฟิลล์ A, B และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสรุปการหมักดองสะตอและหน่อไม้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและการต้านอนุมูลอิสระ

คำสำคัญ: การหมักดอง, สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ, สารต้านอนุมูลอิสระ, สะตอ, หน่อไม้ไผ่ดอง

1. บทนำ

อาหารพื้นบ้านของทางภาคใต้ส่วนใหญ่จะใช้ผักพื้นบ้านเป็นวัตถุดิบในประกอบอาหาร ผักพื้นบ้านเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวทั้งกลิ่นและรสชาติ บางชนิดหาทานได้ยากเนื่องจากมีผลผลิตตามฤดูกาล ผักพื้นบ้านนอกจากอุดมด้วยคุณค่าทางด้านโภชนาการและสรรพคุณด้านสมุนไพรแล้ว การบริโภคผักพื้นบ้านยังเป็นการสืบสานวัฒนธรรมและภูมิปัญญาท้องถิ่นของแต่ละพื้นที่ โดยจะมีความแตกต่างกันออกไปตามสภาพแวดล้อมและธรรมชาติซึ่งมีการสืบทอดหรือถ่ายทอดกันต่อมาเป็นรุ่น ๆ (Wamanon *et al.*, 1996) ผักพื้นบ้านเป็นอีกหนึ่งภูมิปัญญาไทยที่ได้เลาะแสวงหาพืชผักที่มีอยู่ตามธรรมชาติในท้องถิ่นมาเป็นอาหารทั้งในรูปแบบที่บริโภคเป็นผักสดและผักดอง ผักพื้นบ้านประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตในรูปของแป้ง น้ำตาลกลูโคส โปรตีน กรดไขมันพวกเชลลูโลส และสารอื่น ๆ เป็นต้น กรดไขมันพวกเชลลูโลสพบมากในส่วนใบและก้านของผัก ร่างกายไม่สามารถย่อยได้ ดังนั้นเยื่อใยหลังการย่อยจึงเหลือเป็นกากที่สามารถอุ้มน้ำได้มาก จึงมีประโยชน์ต่อการขับถ่าย ป้องกันท้องผูกช่วยในการดูดซับสารพิษบางชนิดได้ (Sakkatamnu, 1998) ผักพื้นบ้านบางชนิดเช่น ใบมันปูยังพบว่ามีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant)

การนำผักพื้นบ้านมาหมักดอง นับเป็นภูมิปัญญาชาวบ้านที่จะสามารถเก็บรักษาผักเอาไว้ได้นาน ๆ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์โปรไบโอติกที่มีประโยชน์ต่อร่างกายเกิดขึ้นด้วยซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคผักดอง เมล็ดสะตอเป็นแหล่งโปรตีนที่ดี โดยมีโปรตีนดิบ 6.0-27.5 กรัมต่อเมล็ด 100 กรัม สะตอแสดงศักยภาพสูงในการเป็นแหล่งของเปปไทด์ออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ กระบวนการหมักช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสะตอ เนื่องจากมีเปปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้เป็นส่วนผสมที่มีแนวโน้มสูงในการใช้พัฒนาอาหารและเครื่องดื่มเชิงหน้าที่ (functional foods and beverages) (Muhialdin *et al.*, 2020)

หน่อไม้เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญและเป็นแหล่งอาหารเชิงหน้าที่ (functional food) การนำผลิตภัณฑ์หน่อไม้หมักมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์จะเป็นการอนุรักษ์ภูมิปัญญาดั้งเดิม สร้างรายได้ และบรรลุเป้าหมายการพัฒนา การหมักหน่อไม้ไม่เพียงแต่ทำให้รสชาติ กลิ่น เนื้อสัมผัส และรูปลักษณะดีขึ้นเท่านั้น แต่ยังทำให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและยืดอายุการเก็บรักษาได้อีกด้วย (Singhal *et al.*, 2021; Das *et al.*, 2013) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาพบว่าผักพื้นบ้านหลายชนิดได้เริ่มลดปริมาณลงและหายาก อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงจากสังคมเกษตรไปสู่สังคมอุตสาหกรรม เพื่อให้คนรุ่นหลังเห็นถึงประโยชน์ทางด้านคุณค่าผักพื้นบ้าน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการอนุรักษ์พันธุ์ผักพื้นบ้านรวมถึงการสืบทอดภูมิปัญญาชาวบ้าน อีกทั้งการหมักเป็นกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพที่สามารถปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการและลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหารได้โดยใช้เอนไซม์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ (Zhao *et al.*, 2021) ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของการหมักดองต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและการต้านอนุมูลอิสระของสะตอและหน่อไม้ไผ่ดอง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

นำตัวอย่างผักพื้นบ้านจากเกษตรกรในท้องถิ่นในจังหวัดสุราษฎร์ธานีได้แก่สะตอ (สะตอสด สะตอดองในห้องปฏิบัติการ และสะตอดองในท้องตลาด) และหน่อไม้ไผ่ดอง (หน่อไม้ไผ่ดองสด หน่อไม้ไผ่ดองในห้องปฏิบัติการ และหน่อไม้ไผ่ดองในท้องตลาด) มาศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ การต้านอนุมูลอิสระ และองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 การดองผักพื้นบ้าน

คัดแยกผักที่เน่าเสีย แดก หรือนิ่มเละออก จากนั้นจึงคัดเลือกขนาดที่เหมาะสมในการดอง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดดินที่ติดมากับตัวอย่างผัก ซึ่งเป็นแหล่งของ

แบบที่เรียกว่าเป็นสาเหตุทำให้ผักดองที่ได้ไม่กรอบ ตัดแต่งและหันให้มีรูปร่างตามต้องการ บรรจุผักในขวดแก้วปากกว้างที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว จากนั้นเทน้ำดองลงในขวด ซึ่งน้ำดองที่ใช้จะมีส่วนผสมดังนี้ คือ เกลือเม็ดร้อยละ 3 น้ำขาวข้าว ร้อยละ 40 (อัตราส่วน น้ำ: ข้าวสารเท่ากับ 500 มิลลิลิตร: 200 กรัม) น้ำที่ใช้ต้องสะอาดปราศจากสิ่งเจือปน โดยเฉพาะต้องไม่มีการปนเปื้อนสารประกอบของเหล็ก ซึ่งจะทำให้ผักดองมีสีคล้ำ นำไปต้มในน้ำเดือด ตั้งทิ้งให้อุ่นก่อนนำมาเทจนท่วมผัก เช็ดปากขวดด้วยผ้าสะอาด ปิดฝาให้สนิท ใช้ระยะเวลาในการหมักดอง 14 วัน ทำการหมักดองตัวอย่างละ 3 ขั้ว

2.2 การศึกษาผลของการหมักดองที่มีต่อคุณลักษณะทางกายภาพเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการต้านอนุมูลอิสระ

2.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมี

การวิเคราะห์ค่าสี ด้วยระบบ Hunter lab โดยวัดค่า L^* , a^* และ b^* ด้วยเครื่องวัดค่าสี (ยี่ห้อ Konica Minota รุ่น CR-400) วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) (AOAC, 2000) ด้วยเครื่องวัดค่า pH (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น FE20/LE407) วัดค่าปริมาณกรด (AOAC, 2000) ปริมาณความชื้น (moisture) (AOAC, 2000) a_w (Water activity measurement) ด้วยเครื่องวัดค่า a_w (ยี่ห้อ Rotronic รุ่น HygroLab C1) และปริมาณเถ้า (AOAC, 2000)

2.2.2 การเตรียมสารสกัดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และการวิเคราะห์หาปริมาณแทนนิน ดัดแปลงตามวิธีการของ Nuntharatanapong *et al.* (2018)

บดตัวอย่างพืช (ตัวอย่างสด) 30 กรัม นำมาสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 80 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำการสกัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องเขย่าอ่างควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ M-LAB รุ่น WBN 15) ระยะเวลา 60 นาที จากนั้นนำมารองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ส่วนของเหลวที่กรองได้ไประเหยด้วยเครื่องระเหยแบบสูญญากาศ (ยี่ห้อ heidolph รุ่น Hei-VAP Value Digital) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนตัวทำละลายระเหยหมด

2.2.3 การเตรียมตัวอย่าง

นำสารสกัดที่แห้งไปละลายในตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 80 จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 5 มิลลิลิตร

2.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด อ้างอิงตามวิธีการของ Singleton *et al.* (1999)

นำสารสกัด 0.5 มิลลิลิตร ผสมร่วมกับ Folin Ciocalteu reagent ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นเติมสารละลาย sodium carbonate ร้อยละ 20 ปริมาตร 0.5

มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 5 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่มืดนาน 1 ชั่วโมง เขย่าเป็นช่วง ๆ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร โดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 80 เป็น Blank คำนวณปริมาณสารฟีนอลิก อ้างอิงจากกราฟมาตรฐานของ gallic acid โดยแสดงปริมาณในหน่วย มิลลิกรัมของ gallic acid ต่อ 100 กรัมของสารสกัด (mg GAE/100 g extract)

2.2.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity) ตามวิธีของ Hatano *et al.* (1988)

นำสารสกัดเอทานอลปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำละลาย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) ความเข้มข้น 60 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายเอทานอลปริมาตร 3,900 ไมโครลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากัน ทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างและชุดควบคุมที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer (ยี่ห้อ PG INSTRUMENTS รุ่น T60 UV-Visible Spectrophotometer) โดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 80 เป็น Blank และแทนสารสกัดในชุดควบคุม คำนวณหาค่าร้อยละของความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระตามสมการ

$$\begin{aligned} &\text{ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (\%)} \\ &= \frac{(\text{ODชุดควบคุม} - \text{ODตัวอย่าง}) \times 100}{\text{ODชุดควบคุม}} \end{aligned}$$

เมื่อ OD ชุดควบคุม คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุมที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร

OD ตัวอย่าง คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร

2.2.6 การศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์ อ้างอิงวิธีการของ Arnon (1949)

นำตัวอย่างผักมาทำการตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ปริมาตร 100 มิลลิกรัม หลีกเลียงการใช้เนื้อเยื่อบริเวณเส้นใบและขอบใบ บดให้ละเอียด สกัดด้วยอะซิโตนปริมาตร 20 มิลลิลิตร จนเนื้อเยื่อเปลี่ยนเป็นสีขาว กรองเอากากออก ปรับปริมาตรของสารละลายด้วยอะซิโตนให้เท่ากับ 30 มิลลิลิตร จากนั้นหุ้มภาชนะบรรจุสารละลายคลอโรฟิลล์ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการสูญเสียคลอโรฟิลล์จากการโดนแสง นำสารละลายคลอโรฟิลล์ที่สกัดด้วยอะซิโตนไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 645 และ 663 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer โดยใช้อะซิโตนเป็น Blank และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (A) และคลอโรฟิลล์บี (B) จากสูตร

$$\text{Chlorophyll A (mg/ml)} = \frac{[12.7 (A663) - 2.69 (A645) \times V \text{ (ml)}]}{\text{mg}}$$

$$\text{Chlorophyll B (mg/ml)} = \frac{[22.9 (A645) - 4.68 (A663) \times V \text{ (ml)}]}{\text{mg}}$$

$$\text{Total Chlorophyll (mg/ml)} = \text{Chlorophyll A} + \text{B}$$

เมื่อ	A645	คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 645 นาโนเมตร
	A663	คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร
	V	คือ ปริมาตรของสารละลาย
	mg	คือ น้ำหนักของตัวอย่าง

2.2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณแทนนิน ดัดแปลงจาก Namchoti *et al.* (2003)

เจือจางสารสกัด 10 เท่า ด้วยน้ำกลั่น นำสารสกัดที่เจือจางแล้ว 0.05 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย Folin-Denis Reagent ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร และสารละลาย sodium carbonate ร้อยละ 30 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 762 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer โดยใช้ น้ำกลั่น เป็น Blank นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเทียบหาปริมาณแทนนินกับกราฟมาตรฐาน Tannic acid รายงานผลการวิเคราะห์ในหน่วย มิลลิกรัมของ Tannic acid ต่อ 100 กรัมของสารสกัด (mg Tannic/100 g extract)

2.2.8 การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินซี อ้างอิงตามวิธีการของ Kampfenkel *et al.* (1995)

นำตัวอย่างผักพื้นบ้าน(ตัวอย่างสด) 5 กรัม เติมสาร Meta-phosphoric acid ร้อยละ 5 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร บั่นให้ละเอียด กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นนำตัวอย่างผักพื้นบ้านบรีโกลสด ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติม indophenol ร้อยละ 0.02 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เติม Thiourea ร้อยละ 2 ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร และเติม Dinitrophenyl-hydrazine (DNP) ร้อยละ 2 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร (blank ไม่ต้องเติม DNP แต่ให้เติมภายหลังการบ่ม) เขย่าให้เข้ากัน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 3 ชั่วโมง จากนั้นเติม Sulfuric acid ร้อยละ 85 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ส่วนหลอด blank เติม DNP ร้อยละ 2 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร และบ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยเทียบกับ blank ซึ่งใช้ Meta-phosphoric acid ร้อยละ 5 แทนสารตัวอย่าง รายงานผลการวิเคราะห์ในหน่วย mg / 100 g DW. โดยเปรียบเทียบกับ

กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Ascorbic acid กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร

2.2.9 การวิเคราะห์สารกาบา อ้างอิงวิธีของ Varanyanond *et al.* (2005)

ชั่งตัวอย่างแห้ง 1-5 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร นำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พร้อมเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสด้านบนมาวิเคราะห์หาสารกาบาโดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ใช้ γ -amino-n-butyric acid (Sigma-Aldrich, Germany) เป็นสารมาตรฐาน ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

สภาวะที่ใช้ในการหาสารกาบา ด้วยเครื่อง HPLC คือ
 Elution Chromatography : Gradient elution
 Mobile phase : A=0.02M Acetic acid: Acetonitrile (9:1)
 :B=Acetic acid: Methanol: Acetonitrile
 (1:4.5:4.5)
 Column : Poroshell120 EC-C18 4.6 X 50 mm X 2.7
 Micro (Agilent)
 Detector : 254 nm ref 550 nm (DAD)
 Flow rate : 1.0 ml/min
 Injection volume : 10 μ L

2.2.10 การวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์ ตามวิธีของ Merken and Beecher (2000)

ชั่งตัวอย่างอาหารแห้งที่บดละเอียดแล้วมาประมาณ 5-10 กรัม หลังจากนั้นเติมสารละลายเมทานอลที่มีองค์ประกอบของ tert-butylhydroquinone (TBHQ) ร้อยละ 62.5 ปริมาตร 0.5 กรัม ต่อลิตร และเติม 10 มิลลิลิตรของ 6 นอร์มอล hydrochloric acid นำไปสกัด (reflux) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น และนำสารละลายนั้นไปผ่านเครื่อง ultrasonic เป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองขนาด 2.5 ไมครอน แล้วกรองสารละลายอีกครั้งด้วย syringe filter ขนาด 0.2 ไมครอน ก่อนนำสารละลายดังกล่าวไปฉีดเข้าเครื่อง HPLC ใช้ Caffeic acid (C0625), p-coumarin acid (C9008), Ferulic acid (128708), Sinapic (D7927), Myricetin (M6760), Quercetin (Q4951), Luteolin (L9283), Naringenin (N5893), Hesperetin (H4128), Kaemferol (60010), Apigenin (10798) ของ Sigma-Aldrich, USA เป็นสารมาตรฐาน ความเข้มข้น 1-50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยมีระยะเวลาการดำเนินการต่อ 1 cycle หรือ retention time 70 นาที ต่อ 1 ตัวอย่าง

สภาวะที่ใช้ในการหาปริมาณฟลาโวนอยด์ ด้วยเครื่อง HPLC คือ

Elution Chromatography : Gradient elution

Mobile phase : 0.05% trifluoroacetic acid (TFA) ใน water, 0.05% TFA ใน methanol และ 0.05% TFA ใน acetonitrile (w/w)

Column : C18 (Eclipse XDB-C18, 4.6x250mm, 5 μ m column, Agilent, Germany) พร้อมด้วย guard column (Eclipse XDB-C18 cartridge, 4.6x12.5 mm, 5 μ m, Grace division, USA)

Detector : 210, 280, 325, 338 และ 368 nm

Flow rate : 0.6 ml/min

2.2.11 การวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีน ตามวิธีของ Speek *et al.* (1986)

ชั่งตัวอย่างอาหารแห้งที่บดละเอียดมาประมาณ 5-10 กรัม หลังจากนั้นเติมสารละลาย ascorbic acid ร้อยละ 10 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ 50 มิลลิลิตรของ 2 นอร์มอล potassium hydroxide ใน ethanol ร้อยละ 95 จากนั้นนำตัวอย่างไปต้มให้เดือดที่เรียกว่า Saponification ประมาณ 30 นาที เพื่อขจัดไขมันออก หลังจากนั้นตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติมเฮกเซน (hexane) ปริมาตร 70 มิลลิลิตร นำตัวอย่างดังกล่าวมาเขย่าติดต่อกันเป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นดูดเอาสารละลายส่วนบนใส่ลงในขวดแก้วที่มี potassium hydroxide ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 5 แล้วเติม hexane ปริมาตร 35 มิลลิลิตร ลงไปแล้วเขย่าติดต่อกัน 2 นาที ทำซ้ำสองครั้ง จะเห็นสารละลายแยกออกเป็นสองชั้น ปล่อยให้สารละลายชั้นล่างออก หลังจากนั้นเติม sodium chloride ร้อยละ 10 แล้วล้างด้วยน้ำจนกระทั่งไม่มีต่างหลงเหลืออยู่ในสารละลายตัวอย่าง นำสารละลายดังกล่าวไปทำให้แห้งด้วย rotary evaporator หลังจากนั้นนำสารที่ได้จากการระเหยแห้งไปละลายด้วย chloroform ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลาย methanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายดังกล่าวไปฉีดเข้าเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณเบต้าแคโรทีน ใช้ β -carotene (C9750, Sigma-Aldrich, USA) เป็นสารมาตรฐาน ความเข้มข้น 0.1- 2.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยมีระยะเวลาการดำเนินการต่อ 1 cycle หรือ retention time 12 นาทีต่อ 1 ตัวอย่าง

สภาวะที่ใช้ในการหาปริมาณเบต้าแคโรทีน ด้วยเครื่อง HPLC คือ

Elution Chromatography : Gradient elution

Mobile phase : Acetonitrile (CH₃ CN): Tetrahydrofuran (THF): Methanol (CH₃ OH): Triethylamine (TEA): Ammonium acetate (CH₃COONH₄) ใน อัตราส่วน 80: 14: 6: 0.1: 0.012 (v/v/v/v and w/v)

Column : C18 (Vydac 201 TP, C18 4.6 x 250 mm, 5 μ m column, Grace division, USA) พร้อมด้วย guard column (cartridge C18 4.6 x 7.5 mm, 5 μ m, Grace division, USA)

Detector : 450 nm ,

Flow rate : 1.0 ml/min

2.3 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Rang Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของการหมักต้องต่อองค์ประกอบทาง กายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและการต้านอนุมูลอิสระของผักพื้นบ้าน

3.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและการต้านอนุมูลอิสระของสะตอ

การวิเคราะห์ทางกายภาพ จากการทดลองการหมักต้อง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสะตอ โดยสะตอที่ผ่านการหมักต้องในห้องปฏิบัติการและสะตอต้องในห้องตลาดจะมีค่าความสว่าง (L*) และความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลง และมีค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสะตอสด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (Table 1) ทั้งนี้เนื่องมาจากในสะตอมีเอนไซม์และสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเมื่อปอกเปลือกไว้และสัมผัสกับอากาศจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าความสว่างและและค่าความเป็นสีเหลืองลดลงและมีค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น (Rattanapanon, 2014)

การวิเคราะห์ทางเคมี จากการทดลองการหมักต้องมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสะตอ โดยสะตอที่ผ่านการหมักต้องในห้องปฏิบัติการและสะตอต้องในห้องตลาดมี pH ที่ต่ำกว่าสะตอสด และพบปริมาณกรด และปริมาณเถ้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับสะตอสด ($p<0.05$) (Table 1) โดยเมื่อเปรียบเทียบสะตอที่ผ่านการหมักต้องในห้องปฏิบัติการและสะตอต้องในห้องตลาด พบว่าสะตอต้องในห้องปฏิบัติการมีปริมาณกรดสูงกว่าสะตอต้องในห้องตลาด ในขณะที่ค่า pH มีค่าลดลง ($p<0.05$) เนื่องจากกระบวนการหมักต้องโดยจุลินทรีย์กลุ่มแลคติกที่จะทำให้สารประกอบคาร์โบไฮเดรตในสะตอ ได้แก่ น้ำตาล และน้ำข้าวข้าวที่เติมลงไปถูกเปลี่ยนเป็นกรดแลคติก และการที่สะตอในห้องปฏิบัติการมีปริมาณกรดสูงกว่าอาจเนื่องมาจากปริมาณเกลือ ปริมาณน้ำข้าวข้าว และระยะเวลาการหมักอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มแลคติกมากกว่า จึงสามารถผลิตกรดได้มากกว่า (Charoensiri and Kongkhachai, 2008) ซึ่ง Panyoyai and Saejao (2024) รายงานผลของเกลือที่มี

ต่อการหมักและคุณภาพของกะหล่ำปีต้องปรุงรส โดยพบว่าปริมาณเกลือที่ต่างกันร้อยละ 2.5 ถึง 7.5 ให้ความเข้มข้นของกรดที่ต่างกันและระยะเวลาที่ใช้ในการหมักก็มีผลกับปริมาณกรดด้วยปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง เนื่องจากกระบวนการหมักทำให้เกิดสภาวะที่เป็นกรด มีผลทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปฟิโอฟอรไบด์ (Pheophorbide) (Pareek *et al.*, 2017) ปริมาณเถ้าที่เพิ่มสูงขึ้นในสโตนองมีผลมาจากปริมาณเกลือที่ใช้ในการดองมีการแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อของสโตนอง สำหรับค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) พบว่าสโตนองสด สโตนองจากห้องปฏิบัติการและสโตนองจากท้องตลาดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (Table 1) มีค่า 0.96 ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง แต่เมื่อดูร่วมกับปริมาณกรดและ ค่า pH จะเห็นได้ว่าสโตนองมีกรดสูงและค่า pH ต่ำกว่า 4.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่จุลินทรีย์ที่สร้างสารพิษไม่สามารถเจริญได้ (Rattanapanon, 2014)

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จากการทดลองการหมักดองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสโตนอง โดยสโตนองที่ผ่านการหมักดองในห้องปฏิบัติการและสโตนองทางการค้าพบว่า มีปริมาณวิตามินซีต่ำกว่าสโตนองสด ในขณะที่สโตนองพบเบต้าแคโรทีน (β -carotene) สารฟีนอลิก แทนนินและสารต้านอนุมูลอิสระมีค่าสูงกว่าสโตนองสด ($p<0.05$) (Figure 1) จากการวิเคราะห์กาวาด้วยเครื่อง HPLC พบว่า สารกาวาในสโตนองในห้องปฏิบัติการพบปริมาณกาวาที่สูงกว่าสโตนองสด การเพิ่มขึ้นของปริมาณกาวา เนื่องจากสภาวะที่เป็นกรดเล็กน้อย (H^+) ไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ glutamate decarboxylase ทำให้เกิดการเปลี่ยนกรดกลูตามิกไปเป็นกาวา จึงส่งผลทำให้มีปริมาณกาวาเพิ่มขึ้น (Shep *et al.*, 1999) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นที่สารสกัดมีประสิทธิภาพในการยับยั้งที่ร้อยละ 50 (IC_{50}) ที่มีค่าต่ำเมื่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีค่าสูงขึ้น (Table 2) โดยเมื่อเปรียบเทียบสโตนองในห้องปฏิบัติการกับสโตนองในท้องตลาด

พบว่าสโตนองในห้องปฏิบัติการมีปริมาณวิตามินซี ปริมาณฟีนอลิก และสารต้านอนุมูลอิสระ สูงกว่าสโตนองในท้องตลาด ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะการหมักดองในห้องปฏิบัติการเหมาะสมและอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์แลคติกสามารถผลิตกรดและทำให้เกิดการสลายโครงสร้างของผนังเซลล์พืชจึงมีการปลดปล่อย และ/หรือทำให้เกิดการสังเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่าง ๆ เพิ่มขึ้น (Katina *et al.*, 2007; Đorđević *et al.*, 2010; Hur *et al.*, 2014) อีกทั้งการหมักดองจะทำให้เซลล์ของสโตนองอ่อนตัวมีการแทรกซึมของเกลือเข้าไปในเซลล์จึงอาจทำให้เซลล์แตกเพิ่มมากขึ้นและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ปริมาณฟีนอลิก สารต้านอนุมูลอิสระ แทนนิน และเบต้าแคโรทีน จึงสามารถออกมาจากเซลล์ได้มากขึ้นกว่าสโตนองสด ผลของการหมักต่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพืช แคโรทีนอยด์ที่เกี่ยวข้อง สภาวะการหมักและกิจกรรมของเอนไซม์ในสายพันธุ์จุลินทรีย์ เนื่องจากเอนไซม์บางชนิดเอื้อต่อการสกัดแคโรทีนอยด์ (Rattanapanon, 2014; Zhao *et al.*, 2021)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการดองมีผลทำให้สารต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงปริมาณสารฟีนอลิก และเบต้าแคโรทีนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miller and Rice-Evans (1997) รายงานว่าหลังกระบวนการหมักพืชจะมีปริมาณฟีนอลทั้งหมดเพิ่มขึ้นและมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของการต้านอนุมูลอิสระอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ทั้งนี้รายงานการวิจัยของ Kuaznierewicz *et al.* (2008) ซึ่งรายงานว่าการหมักของกะหล่ำปลีส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และการหมักดองส่งผลต่อการลดลงของปริมาณวิตามินซี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Di Cargo *et al.* (2011) รายงานว่าวิตามินซีจะมีค่าลดลงเมื่อทำการหมักเป็นระยะเวลาสั้นขึ้น

Table 1 Physical and Chemical Quality Analysis of Bitter bean

Analysis		Bitter bean	Fermented bitter bean (laboratory)	Fermented bitter bean (local market)
Color	L*	60.51±0.18 ^a	56.87±0.27 ^b	60.98±0.16 ^a
	a*	-18.35±0.17 ^b	-4.17±0.04 ^a	-4.09±0.09 ^a
	b*	36.01±0.68 ^b	31.25±0.03 ^c	26.84±0.22 ^a
pH		5.34±0.01 ^a	3.46±0.01 ^c	3.86±0.02 ^b
Total acidity (% DW.)		0.37±0.15 ^c	15.28±0.84 ^a	4.87±0.04 ^b
Water activity (a_w) ^{ns}		0.96±0.00	0.96±0.00	0.96±0.00
Ash (% DW.)		4.53±0.15 ^c	21.09±0.98 ^b	24.14±1.56 ^a
Chlorophyll (mg/ml)	A	0.29±0.01 ^a	0.05±0.01 ^c	0.13±0.01 ^b
	B	0.48±0.01 ^a	0.03±0.01 ^c	0.07±0.02 ^b
	Total	0.77±0.01 ^a	0.09±0.02 ^c	0.20±0.03 ^b

Treatments with the superscript (a,b,c...) in each row were significantly different ($p<0.05$)

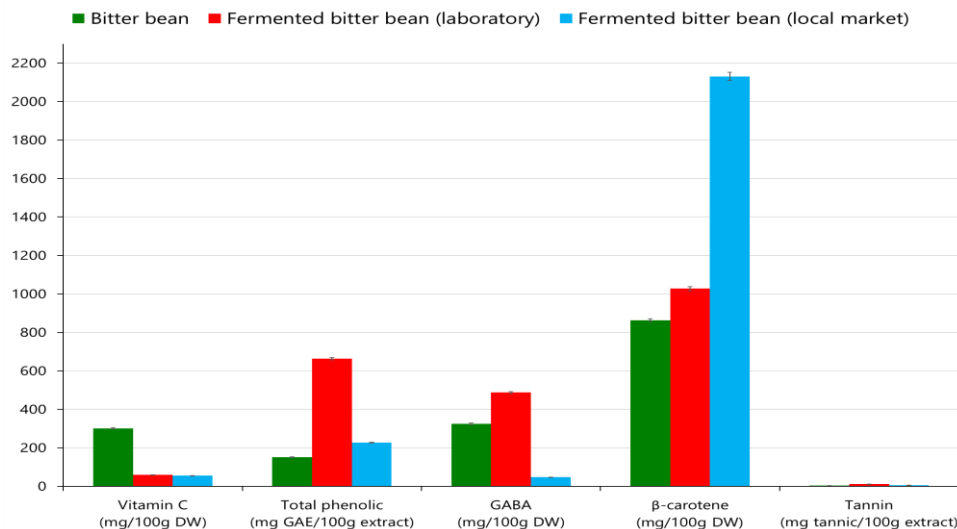
ns = not significantly different

Table 2 DPPH scavenging activity, IC₅₀ and Flavonoid of Bitter bean

Analysis		Bitter bean	Fermented bitter bean (laboratory)	Fermented bitter bean (local market)
DPPH scavenging activity (%)		77.72±0.12 ^c	84.10±0.43 ^a	81.37±1.18 ^b
IC ₅₀ (mg/ml)		138.11±0.40 ^a	40.30±0.62 ^b	40.50±0.45 ^b
Flavonoid (mg/100 g DW.)	Apigenin	Nd	Nd	Nd
	Hesperetin	Nd	Nd	Nd
	Kaemferol	Nd	Nd	Nd
	Luteolin	Nd	Nd	Nd
	Myricetin	Nd	Nd	Nd
	Naringenin	Nd	Nd	Nd
	Quercitin	Nd	Nd	Nd

Treatments with the superscript (a,b,c,...) in each row were significantly different ($p<0.05$)

IC₅₀ = the concentration value at which the extract has 50% inhibitory efficiency, Nd คือ Not detected

**Figure 1** Bioactive compound of Bitter bean and fermented bitter bean.

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการต้านอนุมูลอิสระของหน่อไม้ไผ่ตง

ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและการต้านอนุมูลอิสระของหน่อไม้ แบ่งผลการทดลอง 3 ด้าน ประกอบด้วย การวิเคราะห์ทางด้านกายภาพ เคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการต้านอนุมูลอิสระของหน่อไม้ไผ่ตง

การวิเคราะห์ทางกายภาพ จากการทดลองการหมักดอง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของหน่อไม้ไผ่ตง โดยหน่อไม้ไผ่ตงที่ผ่านการหมักดองในห้องปฏิบัติการและหน่อไม้ดองในท้องตลาดจะมีค่าความสว่าง (L*) และความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลง และมีค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับหน่อไม้ไผ่ตงสด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (Table 3) โดยเมื่อเปรียบเทียบหน่อไม้ไผ่ตงดองในท้องตลาดมีค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) สูงกว่าหน่อไม้ดองในห้องปฏิบัติการ มีค่าความสว่าง

(L*) ต่ำกว่า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากในหน่อไม้ไผ่ตงมีเอนไซม์และสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเมื่อปอกเปลือกไว้และสัมผัสกับอากาศจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเกิดขึ้น จึงทำให้ค่าความสว่างลดลงและมีค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้น (Rattanapanon, 2014) การวิเคราะห์ทางเคมี จากการทดลองการหมักดองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของหน่อไม้ไผ่ตง โดยหน่อไม้ไผ่ตงที่ผ่านการหมักดองในห้องปฏิบัติการและหน่อไม้ดองในท้องตลาดมี pH ที่ต่ำกว่า หน่อไม้สดและมีปริมาณกรด และเถ้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับหน่อไม้ไผ่ตงสด ($p<0.05$) สำหรับค่า a_w ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยเมื่อเปรียบเทียบหน่อไม้ไผ่ตงที่ผ่านการหมักดองในห้องปฏิบัติการและหน่อไม้ดองในท้องตลาด พบว่าหน่อไม้ไผ่ตงดองในท้องตลาดมีปริมาณกรดต่ำกว่าหน่อไม้ไผ่ตงในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่ค่า pH มีค่าลดลง ($p<0.05$) เนื่องจากกระบวนการหมักดองโดยจุลินทรีย์กลุ่มแลคติก

ที่จะทำให้สารประกอบคาร์โบไฮเดรตในหน่อไม้ ได้แก่ น้ำตาล และ น้ำขาวข้าวที่เติมลงไปถูกเปลี่ยนเป็นกรดแลคติก (Charoensiri and Kongkhachuichai, 2008) สำหรับปริมาณเถ้าที่เพิ่มสูงขึ้นในหน่อไม้ ต้องมีผลมาจากปริมาณเกลือที่ใช้ในการดองมีการแทรกซึมเข้าไป ในเนื้อเยื่อของหน่อไม้

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จากการทดลองการหมักดองมี ผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ของหน่อไม้ไผ่ดอง โดยหน่อไม้ไผ่ดองที่ผ่านการหมักดองในห้องปฏิบัติการและหน่อไม้ไผ่ดองในตลาด พบว่ามีปริมาณวิตามินซี ต่ำกว่าหน่อไม้ไผ่ดองสด ในขณะที่หน่อไม้ไผ่ดองดองในตลาดและในห้องปฏิบัติการ พบ สารประกอบฟีนอลิก ปริมาณแทนนิน และสารต้านอนุมูลอิสระ มีค่าสูงกว่าหน่อไม้ไผ่ดองสด ($p<0.05$)(Table 4) (Figure 2) โดย จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่าสารกาบาในหน่อไม้ไผ่ดองในห้องปฏิบัติการมีปริมาณสารกาบาที่สูงขึ้นกว่าหน่อไม้สด การเพิ่มขึ้นของปริมาณกาบาในสภาวะที่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เนื่องจากสภาวะที่เป็นกรดเล็กน้อย (H^+) ไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ glutamate decarboxylase ทำให้เกิดการเปลี่ยนกรดกลูตามิกไปเป็นกาบา จึงส่งผลทำให้มีปริมาณกาบาเพิ่มมากขึ้น (Shep *et al.*, 1999) เมื่อเปรียบเทียบหน่อไม้ดองในห้องปฏิบัติการกับหน่อไม้ดองในตลาดพบว่หน่อไม้ดองในตลาดมีปริมาณวิตามินซี สารประกอบฟีนอลิก และกาบา ต่ำกว่าหน่อไม้ดองในห้องปฏิบัติการ แต่พบเบต้าแคโรทีน (β -carotene) สูงกว่าหน่อไม้ดองในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้อาจ

เนื่องจากปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นส่งผลถึงความสามารถในการต้านทานอนุมูลอิสระของหน่อไม้ดองเพิ่มขึ้น อีกทั้งการดองจะทำให้เซลล์ของหน่อไม้อ่อนตัวมีการแทรกซึมของเกลือเข้าไปในเซลล์จึงอาจทำให้เซลล์แตกเพิ่มมากขึ้นและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ปริมาณฟีนอลิก สารต้านอนุมูลอิสระ แทนนิน และเบต้าแคโรทีน จึงสามารถออกมาจากเซลล์ได้มากขึ้นกว่าหน่อไม้ไผ่ดองสด (Rattanapanon, 2014)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการดองมีผลทำให้สารต้านอนุมูลอิสระรวมถึงปริมาณสารฟีนอลิก ปริมาณแทนนิน และ β -carotene เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Katina *et al.*, (2007) and Đorđević *et al.* (2010) รายงานว่าการหมักทำให้เกิดการสลายโครงสร้างของผนังเซลล์พืชอาจปลดปล่อย และ/หรือทำให้เกิดการสังเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่าง ๆ การหมักจึงเป็นวิธีการเพิ่มปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ โดยการปล่อยฟลาโวนอยด์และมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นจึงมีผลให้ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Miller and Rice-Evans, 1997) ทั้งนี้รายงานการวิจัยของ Kuaznierewicz *et al.* (2008) ซึ่งรายงานว่าการหมักของกะหล่ำปลี ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และการหมักดองส่งผลต่อการลดลงของปริมาณวิตามินซี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Di Cargo *et al.* (2011) รายงานว่าวิตามินซีจะมีค่าลดลง เมื่อทำการหมักเป็นระยะเวลาสั้น

Table 3 Physical and Chemical Quality Analysis of Bamboo shoot

Analysis		Bamboo shoot	Fermented bamboo shoot (laboratory)	Fermented bamboo shoot (local market)
Color	L*	89.91±0.15 ^a	83.01±0.09 ^b	77.79±0.80 ^c
	a*	0.27±0.07 ^b	-0.52±0.02 ^c	1.54±0.11 ^a
	b*	12.34±0.25 ^a	5.98±0.07 ^c	7.38±0.09 ^b
pH		5.32±0.01 ^a	3.49±0.01 ^c	3.59±0.01 ^b
Total acidity (% DW.)		1.53±0.05 ^c	5.34±0.53 ^a	3.17±0.01 ^b
Water activity (a_w) ^{ns}		0.97±0.01	0.96±0.01	0.89±0.07
Ash (% DW.)		11.51±1.14 ^c	27.78±2.13 ^b	33.65±3.62 ^a
Chlorophyll (mg/ml)	A	Nd	Nd	Nd
	B	Nd	Nd	Nd
	Total	Nd	Nd	Nd

Treatments with the superscript (a,b,c...) in each row were significantly different ($p<0.05$)

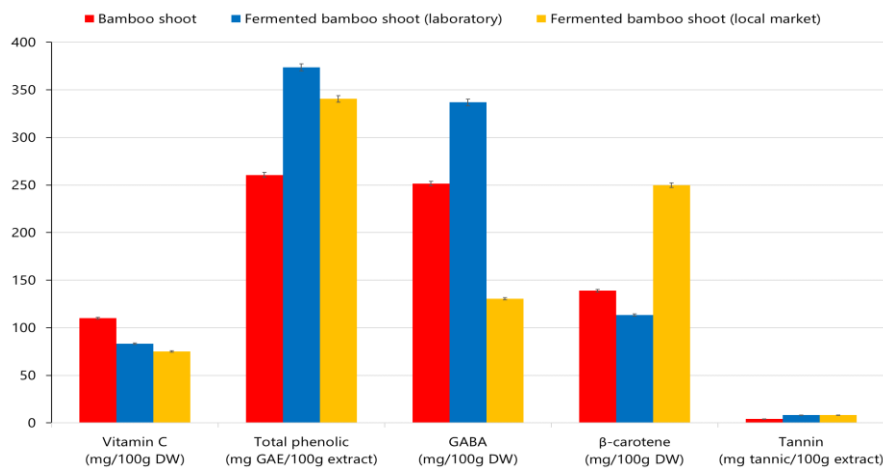
Nd = Not detected

Table 4 DPPH scavenging activity, IC₅₀ and Flavonoid of Bamboo shoot

Analysis		Bamboo shoot	Fermented bamboo shoot (laboratory)	Fermented bamboo shoot (local market)
DPPH scavenging activity (%)		17.35±1.73 ^b	54.68±1.53 ^a	52.23±3.70 ^a
IC ₅₀ (mg/ml)		107.02±1.23 ^a	23.04±0.73 ^b	25.13±0.39 ^b
Flavonoid (mg/100 g DW.)	Apigenin	Nd	Nd	Nd
	Hesperetin	Nd	Nd	Nd
	Kaemferol	Nd	Nd	Nd
	Luteolin	Nd	Nd	Nd
	Myricetin	Nd	Nd	Nd
	Naringenin	Nd	Nd	Nd
	Quercitin	Nd	Nd	Nd

Treatments with the superscript (a,b,c,...) in each row were significantly different ($p<0.05$)

IC₅₀ = the concentration value at which the extract has 50% inhibitory efficiency, Nd คือ Not detected

**Figure 2** Bioactive compound of bamboo shoot and fermented bamboo shoot

4. สรุป

สะตอและหน่อไม้ที่ผ่านการหมักดองมีค่าความสว่าง (L*) และความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลง และมีค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้กระบวนการหมักดองส่งผลต่อ pH ปริมาณกรด และปริมาณเถ้า ของผักพื้นบ้านที่ผ่านการหมักดองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนค่า a_w ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยการดองส่งผลให้ผักพื้นบ้านมีค่า pH ลดต่ำลง ปริมาณกรดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ สะตอและหน่อไม้ที่ผ่านการหมักดองจะส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณแทนนินทั้งหมด ปริมาณเบต้าแคโรทีน และปริมาณสารกาบา เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยสะตอและหน่อไม้ที่ผ่านการหมักดองจะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้สูงกว่าแบบสด และการหมักดองมีผลให้ปริมาณวิตามินซี ปริมาณคลอโรฟิลล์ A, B และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ข้อเสนอแนะ เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้มีเวลาจำกัดไม่สามารถศึกษาปัจจัยที่ส่งผลในการหมักดองทุกพารามิเตอร์ในการศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาในด้านกลุ่มของเชื้อที่พบ ที่เป็นกลุ่มโพรไบโอติก (Probiotic) ได้แก่ กลุ่มของแบคทีเรียผลิตกรดแลคติก ทั้งในด้านสายพันธุ์ที่พบ จำนวนเชื้อที่มี รวมทั้งการคัดเลือกหัวเชื้อแลคติกจากห้องปฏิบัติการเพื่อยกระดับผักดองพื้นบ้านและในการคัดเลือกผักดองจากท้องตลาดควรเลือกจากผู้ประกอบการหรือวิสาหกิจชุมชนที่มีการผลิตผักดองเพื่อจะได้ทราบถึงกระบวนการหมักทุกขั้นตอนเพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผักดองในห้องปฏิบัติการได้จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมัก รวมทั้งการประเมินอายุการเก็บรักษาในสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสม การวิจัยและพัฒนาเพื่อส่งเสริมยกระดับผักดองพื้นบ้านต่าง ๆ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้ผักพื้นบ้าน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว) ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี สำหรับสถานที่ทำการวิจัย และเกษตรกรในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่อำนวยความสะดวกในการจัดเก็บสละและหน่อไม้ในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in beta vulgaris. **Plant physiology** 24: 1-15.
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International** (17th ed). Maryland, USA.
- Charoensiri, R. and Kongkhachuichai, R. 2008. **Nutrition and fruit** (1st ed). Nutrition Research Institute, Mahidol University and the Nutrition Promotion Foundation. (in Thai)
- Di Cargo, R., Minervini, G., Rizzello, C.G., De Angelis, M. and Gobbetti, M. 2011. Effect of lactic acid fermentation on antioxidant, texture, color and sensory properties of red and green smoothies. **Food Microbiology** 28: 1062-1071.
- Das, A., Nath, D., Kumari, S. and Saha, R. 2013. Effect of fermented bamboo shoot on the quality and shelf life of nuggets prepared from desi spent hen. **Veterinary World** 6(7): 419.
- Đorđević, T. M., Šiler-Marinković, S. S. and Dimitrijević-Branković, S.I. 2010. Effect of fermentation on antioxidant properties of some cereals and pseudo cereals. **Food Chemistry** 119(3): 957-963.
- Hatano, T., Kagawa, H., Yasuhara, T. and Okuda, T. 1988. Two new flavonoids and other constituents in licorice root: their relative astringency and radical scavenging effects. **Chemical and Pharmaceutical Bulletin** 36: 2090-2097.
- Hur, S.J., Lee, S.Y., Kim, Y.C., Choi, I. and Kim, G.B. 2014. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods. **Food Chemistry** 160: 346-356.
- Kampfenkel, K., Van Montagu, M. and Inzé, D. 1995. Extraction and determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue. **Analytical Biochemistry** 225(1): 165-167.
- Katina, K., Liukkonen, K. H., Norja, A. K., Adlercreutz, H., Heinonen, S. M., Lampi, A. M., Pihlava J. M. and Poutanen, K. 2007. Fermentation-induced changes in the nutritional value of native or germinated rye. **Journal of Cereal Science** 46(3): 348-355.
- Kuaznierewicz, B., Smiechowska, A., Bartoszek, A. and Namiesnik, J. 2008. The effect of heating and fermenting on antioxidant properties of white cabbage. **Food chemistry** 108: 853-861.
- Merken, H.M. and Beecher, G.R. 2000. Liquid chromatographic method for the separation and quantification of prominent flavonoid aglycones. **Journal of Chromatography A** 897: 177-184.
- Miller, N. and Rice-Evans, C. 1997. Factors influencing the antioxidant activity determined by the ABTS radical cation assay. **Free Radical Research** 26: 195-199.
- Muhialdin, B.J., Abdul Rani, N.F. and Meor Hussin, A.S. 2020. Identification of antioxidant and antibacterial activities for the bioactive peptides generated from bitter beans (*Parkia speciosa*) via boiling and fermentation processes. **LWT** 131: 109776.
- Namchoti, C., Phasuk, S. and Thakonphakdee, P. 2003. Efficacy of Feronia limonia Swingle branch crude extract as antioxidant. **RMUTP Research Journal Special Issue** 5: 251-260. (in Thai)
- Nuntharatanapong, N., Riam-amatakun, W., Satapattayanont, P., Phetthai, R. and Atikij, R. 2018. Antioxidant, cytotoxicity and cytoprotective activity of *Polyalthia cerasoides* branch aqueous extract. **Isan Journal of Pharmaceutical Sciences** 14(4) 142-152. (in Thai)
- Pareek, S., Sagar N.A., Sharma, S., Kumar V., Agarwal, T., González-Aguilar, G.A. and Yahia, E.M. 2017. **Fruit and Vegetable Phytochemicals**. Elhadi M Yahia, USA.
- Panyoyai, N. and Saejao, K. 2024. Effect of salt on fermentation and quality of flavoured cabbage cores. **Journal of Agricultural Research and Extension** 27(2): 61-70. (in Thai)
- Rattanapanon, N. 2014. **Food Chemistry**. Odeon Store, Bangkok. (in Thai)

- Sakkatamnu, P. 1998. **The value of dietary fiber in preventing and curing all diseases.** Ruamthong Publishing House, Bangkok. (in Thai)
- Shep, B.J., Bown, A.W. and McLean, M.D. 1999. Metabolism and functions of γ -aminobutyric acid. **Trends in plant science** 4(11): 446-452.
- Singleton, V.L., Orthofer, R. and Lamuela-Raventos, R.M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. **Methods Enzymology** 299: 152-178.
- Singhal, P., Satya, S. and Naik, S.N. 2021. Fermented bamboo shoots: A complete nutritional, anti-nutritional and antioxidant profile of the sustainable and functional food to food security. **Food Chemistry: Molecular Sciences** 3: 100041.
- Speek, A. J., Temalilwa, C. R. and Schrijver, J. 1986. Determination of β -carotene content and vitamin A activity of vegetables by high-performance liquid chromatography and spectrophotometry. **Food Chemistry** 19(1) :65-74.
- Varayanond, W., Tungtrakul, P., Surojanametakul, V., Wattanasiritham, L. and Luxiang, W. 2005. Effects of water soaking on gamma-aminobutyric acid (GABA) in germ of different Thai rice varieties. **Kasetsart Journal: Natural Science** 39(3): 411-415.
- Wamanon, M., Rerkngam, P. and Chantarak, S. 1996. **Local vegetables of the southern region.** Organization Printing House Veterans Aid, Bangkok. (in Thai)
- Zhao, Y. S., Eweys, A. S., Zhang, J. Y., Zhu, Y., Bai, J., Darwesh, O. M., Zhang, H. B. and Xiao, X. 2021. Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components. **Antioxidants** 10(12): 2004.

Research Article

ผลของสภาวะการต้มและการทำแห้งต่อคุณภาพของลูกประ
Effects of Boiling and Drying Conditions on the Quality
of Pra Seed (*Elateriospermum tapos* Blume)

ดลฤดี พิชัยรัตน์* และ นพรัตน์ มะเห

Donrudee Pichairat* and Nopparat Mahae

สาขาวิชาอุตสาหกรรมอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150
Program in Food Industry, Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya Trang Campus, Sikao, Trang 92150, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-29

Revised: 2024-09-25

Accepted: 2024-10-07

Keywords:

Pra seed;

boiling;

drying

The experiment was conducted to determine the effect of different boiling and drying conditions on the quality of Pra seed (*Elateriospermum tapos* Blume). The conditions examined the concentration of the solution used for boiling (2% sodium chloride and 0%, 0.5%, 1.0%, and 1.5% citric acid), boiling time (15, 20, and 30 minutes), and drying temperature (60, 80, and 100 °C). The objective was to identify the optimal process for producing dried Pra seed. The findings indicated that the concentration of the boiling solution, boiling time, and drying temperature significantly affected the color, moisture, fat, and protein content change and reduced the total cyanide content in Pra seed ($p \leq 0.05$). The optimal method for producing dried Pra seed involved boiling the seed in a solution consisting of 2% salt and 1% citric acid (w/v). The ratio of Pra seed to solution was 1:5 (w/v). The boiling process occurred at a temperature of 90 ± 5 °C for 20 minutes. Subsequently, the seed was dried in a tray dryer at 80 °C for 210 minutes. The dried Pra seed had a higher L^* value and fat content, lower moisture content, and total cyanide content than raw Pra seed. The moisture content of the dried Pra seed was 3.78%, while the fat and protein contents were 29.43% and 14.10% of the dry weight, respectively. It had a total cyanide content of 47.79 mg/kg dry weight. Additionally, it contained phenolic content of 46.52 mg gallic acid equivalents per 100 g dry weight, DPPH radical scavenging capacity of 8.83 mg ascorbic acid equivalents per 100 g dry weight, and ferric reducing antioxidant power of 5.92 mg gallic acid equivalents per 100 g dry weight. These findings indicated that the dried Pra seed produced was high-quality, safe, and suitable for consumption.

* Corresponding author.

E-mail address: donrudee.j@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Pichairat, D. and Mahae, N. 2025. Effects of Boiling and Drying Conditions on the Quality of Pra Seed (*Elateriospermum tapos* Blume). *Recent Science and Technology* 17(3): 261507.

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของสภาวะการต้มและการทำแห้งที่มีต่อคุณภาพลูกประ โดยศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ต้ม (สารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ระยะเวลาในการต้ม (15, 20 และ 30 นาที) และอุณหภูมิในการทำแห้ง (60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อคุณภาพของลูกประ เพื่อทราบกรรมวิธีที่เหมาะสมในการผลิตลูกประอบแห้ง ผลจากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ต้ม ระยะเวลาในการต้ม และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน และการลดลงของปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยกรรมวิธีที่เหมาะสมในการผลิตลูกประอบแห้ง คือ การต้มลูกประในสารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อัตราส่วนของลูกประและสารละลายที่ใช้ต้ม 1:5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 90 ± 5 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที และทำแห้งในตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 210 นาที ลูกประอบแห้งที่ผลิตได้มีค่าความสว่าง (L^*) และปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น และมีปริมาณความชื้นและปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดลดลง เมื่อเทียบกับลูกประสด โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละ 3.78 โดยน้ำหนัก มีปริมาณไขมันและโปรตีนร้อยละ 29.43 และ 14.10 โดยน้ำหนักแห้ง มีปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด 47.79 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง รวมถึงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริกเท่ากับ 46.52 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิก/100 กรัม น้ำหนักแห้ง 8.83 มิลลิกรัมสมมูลวิตามินซี/100 กรัม น้ำหนักแห้ง และ 5.92 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิก/100 กรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งลูกประอบแห้งที่ผลิตได้มีคุณภาพและความปลอดภัยที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการบริโภค

คำสำคัญ: ลูกประ, การต้ม, การทำแห้ง

1. บทนำ

ต้นประ (*Elateriospermum tapos* Blume) เป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceae มีลักษณะเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ที่พบขึ้นตามธรรมชาติในเขตป่าดิบชื้นของประเทศมาเลเซียและภาคใต้ของประเทศไทย (Jantarit *et al.*, 2009; Charoensuk *et al.*, 2012) ในประเทศไทยพบต้นประบริเวณเทือกเขาพนมดงรัก ในเขตอุทยานแห่งชาติเขานันและอุทยานแห่งชาติเขาลวง จังหวัดนครศรีธรรมราช และบริเวณเทือกเขาบรรทัด ในเขตอุทยานแห่งชาติเขาปู่-เขาย่า เขตรอยต่อระหว่างจังหวัดนครศรีธรรมราช ตรังและพัทลุง (Makpan, 2018; Mompiboon *et al.*, 2018) ต้นประให้ผลผลิตปีละ 1 ครั้งในช่วงเดือนสิงหาคมถึงกันยายน (Ngamriabsakul and Kommen, 2009) ผลของต้นประมีลักษณะเป็นพุดคล้ายผลยางพารา ภายในมีเมล็ด 3-4 เมล็ดต่อผล ซึ่งเมล็ดประหรือลูกประมีรูปร่างยาวรี มีเปลือกแข็งสีน้ำตาลเข้มเป็นมันหุ้ม และมีเยื่อหุ้มเมล็ดบาง ๆ เนื้อข้างในมีสีขาวนวล มีรสชาติดมและขมเล็กน้อย (Mompiboon *et al.*, 2018) นิยมบริโภคทางภาคใต้โดยนำมาประกอบอาหาร เช่น ใช้ใส่ในแกงส้ม แกงไตปลา นำไปเผาไฟทำน้ำพริก รวมทั้งนำไปดอง คั่ว อบหรือฉาบน้ำตาล (Jitnupong, 2016; Nounmusig *et al.*, 2023) มีรายงานการศึกษาที่พบว่าลูกประมีปริมาณโปรตีนและเยื่อใยสูง ทั้งยังเป็นแหล่งของกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยลูกประสดมีปริมาณโปรตีน ไขมันและเยื่อใยร้อยละ 12.48, 38.36 และ 10.54 โดยน้ำหนักตามลำดับ (Nounmusig *et al.*, 2023) ขณะที่แบ่งจากลูกประมีองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) และกรดแอลฟา-ลิโนเลนิก (α -linolenic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (Choonhahirun, 2010) อย่างไรก็ตาม

ในลูกประมีสารไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycosides) คือ อะมิกดาลิน (amygdalin) ซึ่งเมื่อสลายตัวเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (hydrogen cyanide) จะมีความเป็นพิษและทำให้เกิดพิษ การบริโภคลูกประจึงต้องนำไปให้ความร้อนด้วยการต้ม คั่วหรืออบ เพื่อลดปริมาณไซยาไนด์ ก่อนนำไปผลิตเป็นอาหารประเภทต่าง ๆ (Ngamriabsakul and Kommen, 2009; Choonhahirun, 2010)

การแปรรูปลูกประด้วยการต้มและทำแห้งให้อยู่ในรูปของลูกประอบแห้ง เป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยให้ลูกประมีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการบริโภคและช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของลูกประให้เก็บไว้ได้นาน ทำให้มีลูกประบริโภคตลอดทั้งปีและสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า ทั้งนี้ เนื่องจากการต้มเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไซยาไนด์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในพืช (Zhang *et al.*, 2019) ขณะที่การทำแห้งเป็นการลดปริมาณความชื้นและค่าออกเตอรแอดติวิตีของอาหารให้อยู่ในระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (Chinnasarn and Krasaechol, 2020) จึงสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของลูกประได้ และยังเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ในลูกประได้ มีรายงานการศึกษาที่พบว่า การให้ความร้อนแก่ลูกประและพืชอื่น ๆ ที่มีปริมาณไซยาไนด์สูงด้วยวิธีการลวก ต้ม และอบแห้ง สามารถช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ในพืช ช่วยลดพิษและทำให้เกิดความปลอดภัยต่อการบริโภคได้ (Ngamriabsakul and Kommen, 2009; Kaewsuwan and Nuichan, 2018; Thaweewong and Anuntagool, 2022) โดย Ngamriabsakul and Kommen (2009) ศึกษาปริมาณไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ในรูปของอะมิกดาลินในลูกประสดและลูกประที่ผ่านการต้มในน้ำเดือดนาน 15 นาที พบว่า การต้มส่งผลให้ลูกประมีปริมาณอะมิกดาลินลดลงจาก 660 ppm เหลือเพียง

100 ppm เมื่อเทียบกับลูกประตด เช่นเดียวกับ Kaewsuwan and Nuichan (2018) ศึกษาผลของระยะเวลาในการลวกต่อคุณลักษณะของลูกประตหลังอบ โดยลวกลูกประตในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 5 และ 10 นาที และอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการลวกและการอบลูกประตสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในลูกประตได้ โดยการลวกลูกประตนาน 10 นาที ให้ลูกประตหลังอบที่มีปริมาณไซยาไนด์คงเหลือน้อยที่สุด ขณะที่ Thaweewong and Anuntagool (2022) ศึกษาการอบแห้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่อระดับอุณหภูมิในการทำแห้งที่เพิ่มขึ้น ปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลง โดยการทำให้แห้งที่อุณหภูมิดังกล่าวสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลังได้ร้อยละ 69.8, 78.5 และ 76.3 ตามลำดับ นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาที่พบว่าการใช้สารละลายเกลือและกรดซิตริกในการต้มสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายสารไซยาไนด์ในพืชได้ โดย Rana *et al.* (2012) ศึกษาการต้มหน่อไม้ในสารละลายเกลือ (NaCl) พบว่าระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้หน่อไม้มีปริมาณไซยาไนด์ลดลง อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงดันออสโมติกของสารละลายที่ลดลง โดยการต้มหน่อไม้ในสารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 3 นาน 20 นาที สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ลงได้ถึงร้อยละ 98.03 และผลการศึกษาของ Jaiwunglok (2009) ที่พบว่า การต้มหน่อไม้ในสารละลายผสมระหว่างเกลือร้อยละ 0.3 และกรดซิตริกร้อยละ 0.4 (pH=2.4) ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารทาร์ซิฟัลลิน ซึ่งเป็นสารไซยาไนด์ในถัสดที่พบในหน่อไม้ได้ดีกว่าการต้มในน้ำปกติ (pH=7.5) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายเกลือหรือสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกในการต้มสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารไซยาไนด์ในพืชได้ การต้มลูกประตในสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกจึงสามารถช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการต้มและการทำให้แห้งเป็นวิธีการที่ช่วยสามารถช่วยลดปริมาณสารไซยาไนด์ในลูกประตทำให้ลูกประตมีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการบริโภคและเก็บไว้ได้นาน แต่อาจก่อให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการอันเนื่องมาจากการใช้สารละลายในการต้มที่ไม่เหมาะสมและการได้รับความร้อนจากวิธีการแปรรูปดังกล่าว การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการต้มและการทำให้แห้งจึงสามารถช่วยรักษาคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการของลูกประตไว้ได้ ทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณไซยาไนด์ในลูกประตได้

ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะนำลูกประตซึ่งเป็นวัตถุดิบในท้องถิ่นมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ลูกประตอบแห้งโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารวมวิธีที่เหมาะสมในการผลิตลูกประตอบแห้ง โดยการศึกษาระดับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ต้มระยะเวลาในการต้ม และอุณหภูมิในการทำแห้งลูกประตที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ลูกประตอบแห้งที่มีคุณภาพดีและเก็บรักษาไว้ได้นาน อันเป็นการเพิ่มมูลค่าและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากลูกประตได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างลูกประต

ลูกประตที่เก็บได้ในช่วงฤดูกาล (เดือน ส.ค.-ก.ย. 2566) ในพื้นที่ตำบลน้ำพุ อำเภอมือง จังหวัดตรัง นำมาคัดแยกขนาดและคัดลูกที่แตกหรือเสียออก จากนั้นนำไปล้างน้ำและแกะเอาเปลือกแข็งหุ้มเมล็ดออก เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง

2.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ต้มต่อคุณภาพของลูกประต

นำลูกประตที่เตรียมได้ตามวิธีการในข้อ 1 มาต้มในสารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนของลูกประตต่อสารละลายที่ใช้ต้ม 1:5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการต้มที่อุณหภูมิ 90±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 นาที เมื่อครบกำหนดเวลานำลูกประตขึ้น ทำให้เย็นในน้ำเย็นและแกะเอาเปลือกเมล็ดออก จากนั้นนำไปล้างน้ำให้สะอาด วางพักไว้ให้สะเด็ดน้ำ บดละเอียดด้วยเครื่องบดสับอาหาร (Philips, HR1393, Thailand) แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพภายหลังการต้ม ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ด้วยเครื่องวัดสี (Microscan EZ, Hunter Lab, U.S.A) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (Sartorius, Docu-pH+/p11, Germany) ปริมาณความชื้นเกลือ (NaCl) ไชมันและโปรตีน ตามวิธีของ AOAC (2000) และวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด ด้วยวิธี Pyridine Pyrazorone method ตามวิธีของ O'Brien *et al.* (1991) คัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมที่ใช้ต้มลูกประต โดยพิจารณาจากคุณภาพของลูกประตภายหลังการต้ม

2.3 การศึกษาผลของระยะเวลาในการต้มต่อคุณภาพของลูกประต

นำลูกประตมาต้มในสารละลายความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในข้อ 2 โดยใช้อัตราส่วนของลูกประตต่อสารละลายที่ใช้ต้ม 1:5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการต้มที่อุณหภูมิ 90±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15, 20 และ 30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลานำลูกประตขึ้น ทำให้เย็นในน้ำเย็นและแกะเอาเปลือกเมล็ดออก จากนั้นนำไปล้างน้ำให้สะอาด วางพักไว้ให้สะเด็ดน้ำ บดละเอียดด้วยเครื่องบดสับอาหาร (Philips, HR1393, Thailand) แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพภายหลังการต้ม ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ด้วยเครื่องวัดสี (Microscan EZ, Hunter Lab, U.S.A) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (Sartorius, Docu-pH+/p11, Germany) ปริมาณความชื้น เกลือ (NaCl) ไชมันและโปรตีน ตามวิธีของ AOAC (2000) และวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด ด้วยวิธี Pyridine Pyrazorone method ตามวิธีของ O'Brien *et al.* (1991) คัดเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ต้มลูกประต โดยพิจารณาจากคุณภาพของลูกประตภายหลังการต้ม

2.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่อคุณภาพของลูกประ

ลูกประต้มที่เตรียมได้ตามวิธีการที่เหมาะสมจากผลการศึกษาในข้อ 2 และ 3 นำมาหั่นเป็นชิ้นบางตามแนวยาวของลูกประ และแบ่งลูกประเป็น 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 500 กรัม นำมาทำแห้งในตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส จนมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำกว่า 0.6 นำลูกประอบแห้งที่ได้มาบดละเอียดด้วยเครื่องบดสับอาหาร (Philips, HR1393, Thailand) แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์คุณภาพเพื่อหาอุณหภูมิทำแห้งที่เหมาะสม ดังนี้ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ด้วยเครื่องวัดสี (Microscan EZ, Hunter Lab, U.S.A) ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Aqua Lab, Series 3, U.S.A) ปริมาณความชื้น ไขมัน และโปรตีน ตามวิธีของ AOAC (2000) ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด ด้วยวิธี Pyridine Pyrazorone method ตามวิธีของ O'Brien *et al.* (1991) และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเตรียมสารสกัดจากลูกประ (ดัดแปลงจาก Prakash *et al.*, 2018) โดยใช้ลูกประบดละเอียด 10 กรัมต่อเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สกัดด้วยเครื่องเขย่า (shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,000 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที กรองสารสกัดที่ได้ผ่านกระดาษกรอง นำไปตรวจหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic contents) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีของ Zhang *et al.* (2013) โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน และตรวจวัดความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยวิเคราะห์ความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ DPPH (2,2-Diphenyl-1-picryl-hydrazyl) ตามวิธีของ Zhang *et al.* (2013) โดยใช้วิตามินซีเป็นสารมาตรฐาน และวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริก (Ferric Reducing Antioxidant Power, FRAP) ตามวิธีของ Benzie and Strain (1996) โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน ด้วยเครื่อง

Spectrophotometer (UV- 1601 spectrophotometer, Shimadzu, Japan) เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแห้งลูกประ โดยพิจารณาจากคุณภาพของลูกประภายหลังการทำแห้ง

2.5 การคำนวณหาค่าร้อยละการลดลงของปริมาณไซยาไนด์ (Reduction of cyanide (%))

การลดลงของปริมาณไซยาไนด์ (ร้อยละ) คำนวณจากสูตร

$$[(\text{ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประสด} - \text{ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประหลังต้ม/ทำแห้ง}) \times 100] / \text{ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประสด}$$

2.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ต้มต่อคุณภาพของลูกประ

การต้มเป็นวิธีการสำคัญที่ใช้ในการเตรียมลูกประเพื่อให้มีคุณภาพที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยต่อการบริโภค เนื่องจากสามารถช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ในลูกประ (Choonhahirun, 2010) ที่เป็นสาเหตุของการเกิดพิษและก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ต้มต่อคุณภาพของลูกประ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 Physical and chemical qualities of Pra seed boiled in salt and citric acid solution at various concentrations (boiling at 90 °C, 15 min)

Qualities	Raw	Boiling solution (w/v)			
		2% salt	2% salt	2% salt	2% salt
			and 0.5% citric acid	and 1% citric acid	and 1.5% citric acid
- Color					
L*	50.20±0.04 ^d	68.69±0.21 ^c	70.20±0.07 ^b	70.13±0.04 ^b	70.62±0.01 ^a
a*	2.64±0.05 ^a	0.85±0.04 ^b	0.65±0.01 ^c	0.48±0.02 ^d	0.45±0.02 ^d
b*	15.31±0.06 ^b	17.99±0.09 ^a	18.02±0.06 ^a	17.96±0.08 ^a	18.08±0.02 ^a
- Moisture (%)	25.34±0.01 ^e	31.19±0.15 ^a	30.59±0.05 ^c	30.23±0.04 ^d	30.77±0.12 ^b
- pH	6.30±0.01 ^b	6.41±0.01 ^a	6.13±0.02 ^c	5.82±0.01 ^d	5.63±0.01 ^e
- NaCl (%)	0.49±0.06 ^b	0.65±0.06 ^a	0.69±0.12 ^a	0.65±0.06 ^a	0.63±0.07 ^a
- Fat (% dw)	29.83±0.27 ^e	39.72±0.14 ^a	35.33±0.14 ^b	34.85±0.03 ^c	33.60±0.16 ^d

Table 1 (Continuous)

Qualities	Raw	Boiling solution (w/v)			
		2% salt	2% salt and 0.5% citric acid	2% salt and 1% citric acid	2% salt and 1.5% citric acid
- Protein (% dw)	14.71±0.25 ^a	14.51±0.11 ^a	14.00±0.06 ^b	14.12±0.04 ^b	13.97±0.10 ^b
- Total cyanide content (mg/kg dw)	120.87±0.04 ^a	105.34±0.30 ^b	87.72±0.27 ^c	85.28±0.05 ^d	80.68±0.36 ^e
Reduction of cyanide (%)		12.85	27.43	29.44	33.25

Remark: Values with different letters in the same row are significantly different ($p \leq 0.05$).

ผลจากการศึกษา พบว่า การต้มมีผลให้น้ำตาลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากเดิมที่มีสีขาวอมน้ำตาลเปลี่ยนเป็นสีขาวนวล และมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มขึ้น เมื่อนำมาตรวจวัดค่าสี พบว่า มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น แต่มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดลง เมื่อเทียบกับลูกประสด ($p \leq 0.05$) และพบว่า การต้มลูกประในสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกส่งผลให้ลูกประมีค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น และมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดลง ตามระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของลูกประที่ต้มในสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าการต้มลูกประในสารละลายผสมระหว่างเกลือและกรดซิตริกสามารถช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลในลูกประได้ โดยเมื่อระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายผสมที่ใช้ในการต้มลูกประเพิ่มขึ้น เนื้อลูกประมีความเป็นสีขาวมากขึ้น ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thammachai (2006) ที่พบว่าการแช่มะเดื่อฝรั่งในสารละลายกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้ผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งที่มีค่าความสว่าง (L^*) สูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกเพิ่มขึ้น ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการลดสีที่มีคุณสมบัติเป็นสารจับโลหะ จึงสามารถจับกับทองแดงที่เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดส และช่วยลดค่าความเป็นกรด-ด่างได้ ทำให้ไม่เหมาะต่อการทำงานของเอนไซม์ จึงสามารถช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ และกรดซิตริกยังมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์

ด้านคุณภาพทางเคมี พบว่าการต้มลูกประในสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ให้ลูกประที่มีปริมาณความชื้นและปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ลดลงเมื่อเทียบกับลูกประสด ($p \leq 0.05$) โดยลูกประจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงตามระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) แต่จะมีปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและมีปริมาณเกลือ (NaCl) ที่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากการได้รับความ

ร้อนจากการต้ม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนเพกตินและเพกตินในผนังเซลล์ และทำให้เยื่อหุ้มเซลล์อ่อนตัวลง จึงเพิ่มความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้น (Yuenyongputtakal, 2013; Charoenphun and Meemuk, 2018) ทำให้น้ำและสารบางอย่างที่อยู่ในเซลล์ของลูกประแพร่ออกมาในสารละลายที่ใช้ต้มได้มากขึ้น และสารละลายที่ใช้ต้มบางส่วนแพร่เข้าไปในเซลล์ของลูกประได้ ประกอบกับการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายผสมที่ใช้ต้ม ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสารละลายที่ใช้ต้มกับเนื้อเยื่อของลูกประ ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดีขึ้น จึงเพิ่มโอกาสการแพร่ของกรดซิตริกในสารละลายที่ใช้ต้มเข้าไปในเซลล์ของลูกประได้มากขึ้น ลูกประหลังต้มจึงมีปริมาณความชื้นและปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับลูกประสด และมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงตามระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายที่ใช้ต้มที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kunjaetong *et al.* (2018) ที่พบว่าการต้มกล้วยน้ำว้าหุ้มส่งผลให้โครงสร้างของโปรตีนเพกตินในผนังเซลล์ถูกย่อยเป็นเพกทิน ทำให้น้ำที่ใช้ในการต้มแทรกซึมเข้าไปในเนื้อกล้วยได้มากขึ้น ส่งผลให้กล้วยมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกล้วยที่ไม่ผ่านการต้ม และผลการศึกษาของ Yuenyongputtakal *et al.* (2013) ที่พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟตในสารละลายออสโมติก ส่งผลให้สาหร่ายผักกาดทะเลหลังแช่หรือลวกในสารละลายออสโมติกมีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนระหว่างสารละลายออสโมติกกับเนื้อเยื่อของสาหร่าย จึงเกิดแรงขับให้มีการถ่ายเทมวลสาร ทำให้การแพร่ของเฟอร์รัสไอออนเข้าไปในเนื้อเยื่อของสาหร่ายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่าการต้มลูกประในสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ส่งผลให้ลูกประมีปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับลูกประสด แต่เมื่อระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายที่ใช้ต้มเพิ่มขึ้น ปริมาณไขมันในลูกประมีแนวโน้มลดลง ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกับปริมาณโปรตีนที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายที่ใช้ต้มเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มระดับความเข้มข้นของกรดซิตริก

ในสารละลายที่ใช้ต้มเป็นร้อยละ 1.5 ให้ลูกประที่มีปริมาณไขมันและโปรตีนต่ำสุด ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการได้รับความร้อนจากการต้มที่มีผลทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพ (Zhang *et al.*, 2019) และการถ่ายโอนมวลสารอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสารละลายที่ใช้ต้มกับเนื้อเยื่อของลูกประ โดยเมื่อระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายที่ใช้ต้มเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการแพร่ของสารที่อยู่ภายในเซลล์ของลูกประออกมาในสารละลายที่ใช้ต้มได้มากขึ้น (Yuenyongputtakal, 2013) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bhoen and Suwonsichon (2013) ที่พบว่าการเตรียมแก่นตะวันผงก่อนการทำแห้งด้วยวิธีการลวกในน้ำเดือดให้แก่นตะวันผงที่มีปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) และมีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) ขณะที่การเตรียมแก่นตะวันผงด้วยการแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ให้แก่นตะวันผงที่มีปริมาณโปรตีนและไขมันน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการเตรียม เมื่อพิจารณาปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด พบว่า การต้มลูกประในสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ส่งผลให้ลูกประที่มีปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดลดลงเมื่อเทียบกับลูกประสด ($p \leq 0.05$) โดยลูกประจะมีปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดลดลงตามระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายที่ใช้ต้มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการต้มมีผลให้ไซยาไนด์ในพืชที่อยู่ในรูปไซยาโนจินิกไกลโคไซด์ (cyanogenis glucoside) และไซยาโนไฮดริน (cyanohydrin) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง (intermediate product) ที่เกิดจากการสลายตัวของไซยาโนจินิกไกลโคไซด์ถูกไฮโดรไลซ์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ได้มากขึ้น ซึ่งไฮโดรเจนไซยาไนด์มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Bolarinwa, *et al.*, 2015; Pokhariya *et al.*, 2018) จึงเกิดการระเหยได้ง่ายและสลายตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อได้รับความร้อนจากการต้ม นอกจากนี้ การต้มยังมีผลให้ผนังเซลล์พืชถูกทำลายทำให้สารประกอบไซยาไนด์แพร่ออกมาในสารละลายที่ใช้ต้มได้ (Rawat *et al.*, 2015) ลูกประที่ผ่านการต้มจึงมีปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดลดลง นอกจากนี้ การลดลงของปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประเมื่อระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกในสารละลายที่ใช้ต้มเพิ่มขึ้นนั้น เป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ต้มกับภายในเนื้อเยื่อของลูกประที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้น สารประกอบไซยาไนด์จึงแพร่ออกมาในสารละลายที่ใช้ต้มได้มากขึ้นและสลายตัวด้วยความร้อนและสภาวะที่เป็นกรดยังส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารไซยาโนจินิกไกลโคไซด์ให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้มากขึ้น

(Teerapapthamkul *et al.*, 2011) สอดคล้องกับผลจากการศึกษาของ Jaiwunglok (2009) ที่พบว่าสารทาร์ซิฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นสารไซยาโนจินิกไกลโคไซด์ที่พบในหน่อไม้ จะสลายตัวได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด โดยการต้มหน่อไม้ในสารละลายผสมระหว่างเกลือร้อยละ 0.3 และกรดซิตริกร้อยละ 0.4 ($pH=2.4$) ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารทาร์ซิฟอสฟอรัสได้ดีกว่าการต้มในน้ำปกติ ($pH=7.5$) และผลการศึกษาของ Ngamriabsakul and Kommen (2009) ที่พบว่าการต้มสามารถลดปริมาณไซยาโนจินิกไกลโคไซด์ (amygdalin) ในลูกประจาก 660 ppm เหลือเพียง 25 ppm ขณะที่การต้มลูกประในน้ำเดือดนาน 15 นาที ให้ลูกประที่มีปริมาณไซยาโนจินิกไกลโคไซด์คงเหลือถึง 100 ppm ทั้งนี้เป็นเพราะลูกประต้องผ่านกระบวนการต้มเพื่อลดปริมาณสารไซยาไนด์บางส่วน และสารไซยาไนด์ที่เหลือจะลดลงจากกรดที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นในกระบวนการหมัก ซึ่งจะไปย่อยสลายสารไซยาโนจินิกไกลโคไซด์ไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Singhal *et al.*, 2021) แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เป็นกรดสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในลูกประได้ ซึ่งการต้มลูกประในสารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้ร้อยละ 12.85, 27.43, 29.44 และ 33.25 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปริมาณไซยาไนด์ในลูกประสดเริ่มต้น ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้น เมื่อพิจารณาคุณภาพของลูกประภายหลังการต้มในสารละลายเกลือผสมกรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า สารละลายที่เหมาะสมสำหรับใช้ต้มลูกประ คือ สารละลายที่มีส่วนผสมของเกลือร้อยละ 2 และกรดซิตริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากให้ลูกประภายหลังการต้มที่มีค่าความสว่าง (L^*) ที่ดี ทั้งยังมีค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณไซยาไนด์ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับลูกประที่ต้มในสารละลายผสมที่ระดับความเข้มข้นอื่น ๆ โดยยังคงรักษาปริมาณโปรตีนและไขมันไว้ได้

3.2 ผลของระยะเวลาในการต้มต่อคุณภาพของลูกประ

การต้มลูกประในสารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ระยะเวลาในการต้มส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของลูกประเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อระยะเวลาในการต้มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ลูกประมีแนวโน้มค่าความเป็นเหลือง (b^*) ลดลง แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของลูกประ ($p > 0.05$) ลูกประหลังต้มมีค่าความสว่าง (L^*)

Table 2 Physical and chemical qualities of Pra seed boiled in 2% salt and 1% citric acid solution at various times

Qualities	Raw	Time (min)		
		15	20	30
- Color				
L*	51.66±0.18 ^b	70.79±0.09 ^a	70.68±0.23 ^a	70.84±0.07 ^a
a*	2.91±0.03 ^a	0.74±0.01 ^b	0.74±0.08 ^b	0.75±0.02 ^b
b*	17.14±0.03 ^c	19.23±0.04 ^a	19.06±0.18 ^{ab}	18.98±0.08 ^b
- Moisture (%)	23.66±0.18 ^d	31.49±0.01 ^c	32.68±0.09 ^b	34.73±0.32 ^a
- pH	6.31±0.01 ^a	5.80±0.01 ^b	5.63±0.01 ^c	5.27±0.01 ^d
- NaCl (%)	0.46±0.03 ^b	0.67±0.07 ^a	0.71±0.01 ^a	0.73±0.04 ^a
- Fat (% dw)	26.73±0.19 ^c	31.42±0.67 ^b	32.16±0.35 ^b	33.18±0.25 ^a
- Protein (% dw)	13.88±0.09 ^b	14.24±0.12 ^a	14.19±0.06 ^a	14.36±0.20 ^a
- Total cyanide content (mg/kg dw)	121.10±0.30 ^a	88.08±0.35 ^b	55.88±0.36 ^d	56.78±0.08 ^c
Reduction of cyanide (%)		27.27	53.86	53.11

Remark: Values with different letters in the same row are significantly different ($p \leq 0.05$).

อยู่ในช่วง 70.68-70.84 มีค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) อยู่ในช่วง 0.74-0.75 และ 18.98-19.23 ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวเป็นผลมาจากคุณสมบัติของกรดซิตริกในการช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการสุกของลูกประที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการต้มเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bhojen and Suwonsichon (2013) ที่พบว่าการเตรียมแก่นตะวันด้วยลูกในน้ำเดือดหรือแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ก่อนการอบแห้งสามารถช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของแก่นตะวันผงได้ โดยระยะเวลาการลวกหรือแช่ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าความสว่าง (L*) ของแก่นตะวันผงเพียงเล็กน้อย

ด้านคุณภาพทางเคมี พบว่า ระยะเวลาในการต้มส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณไขมัน และปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยระยะเวลาในการต้มที่เพิ่มขึ้นทำให้ลูกประได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลายมากขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เอื้อต่อการถายโอนมวลสารได้มากขึ้น (Yuenyongputtakal, 2013; Charoenphun and Meemuk, 2018) จึงมีผลให้สารละลายที่ใช้ต้มแพร่เข้าไปภายในเซลล์ของลูกประได้มากขึ้น ขณะที่น้ำและสารประกอบภายในเซลล์แพร่ออกมาในสารละลายที่ใช้ต้มได้มากขึ้นทำให้ลูกประภายหลังการต้มมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นและมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงตามระยะเวลาในการต้มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันระยะเวลาในการต้มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารไซยาไนด์ในลูกประถูกทำลายได้มากขึ้น โดยเมื่อระยะเวลาในการต้มเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที เป็น 20 นาที การลดลงของปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27.27 เป็นร้อยละ 53.86 เมื่อเทียบกับปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประดิบเริ่มต้น และไม่พบความแตกต่างปริมาณ

ไซยาไนด์ทั้งหมดในลูกประที่ต้มที่เวลา 20 นาทีและ 30 นาที สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhang *et al.* (2019) ที่พบว่าอัลมอนต์ขมมีปริมาณไฮโดรเจนไซยาไนด์ลดลงตามระยะเวลาในการต้มที่เพิ่มขึ้นที่ทุกระดับอุณหภูมิ (90, 100 และ 130 องศาเซลเซียส) เนื่องจากความร้อนจะกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้ไซยาโนจินไกลโคไซด์ (amygdalin) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ได้มากขึ้น ซึ่งไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็นกรดอ่อนที่ระเหยได้ง่ายและเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อต้มในน้ำเดือด โดยการต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 50 นาที สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้ถึงร้อยละ 98.3 และผลการศึกษาของ Pokhariya *et al.* (2018) ที่พบว่าการต้มหน่อไม้ในน้ำเดือดส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนไซยาไนด์ในหน่อไม้ลดลงตามระยะเวลาในการต้มที่เพิ่มขึ้น โดยการต้มหน่อไม้ นาน 5 นาที สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้ร้อยละ 63.56 เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการต้มเป็น 15 และ 25 นาที สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้ร้อยละ 83.35 และ 94.72 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณไขมันพบว่าปริมาณไขมันในลูกประมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการต้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความร้อนจากการต้มในสภาวะที่เป็นกรดไปทำลายผนังเซลล์รวมถึงพันธะต่าง ๆ ภายในเซลล์ของลูกประ จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยไขมันให้อยู่ในรูปอิสระเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการต้มเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ตรวจวัดปริมาณไขมันในลูกประได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือและโปรตีนในลูกประที่ต้มที่ระยะเวลาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bhojen and Suwonsichon (2013) ที่พบว่าการเตรียมแก่นตะวันก่อนการอบแห้งด้วยการลวกในน้ำเดือด เมื่อระยะเวลาในการลวกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไขมันในแก่นตะวันผงเพิ่มขึ้น แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน ดังนั้น จากผลการศึกษาข้างต้น เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่เหมาะสม

ในการต้มลูกประจากคุณภาพด้านต่าง ๆ พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการต้มลูกประ คือ 20 นาที เนื่องจากให้ลูกประที่มีปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดต่ำสุด ทั้งยังมีค่าสีและคุณภาพในระดับที่ดีเมื่อเทียบกับการต้มที่ระยะเวลาอื่น ๆ รวมทั้งใช้ระยะเวลาในการต้มที่ไม่นานมากนัก

3.3 ผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่อคุณภาพของลูกประ

การทำแห้งลูกประที่ผ่านการต้มในสารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร นาน 20 นาที ด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส จนมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำกว่า 0.6 พบว่า การทำแห้งลูกประด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งต่างกัน โดยการทำแห้งลูกประที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำแห้ง 360, 210 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในการทำแห้งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้น้ำในอาหารที่ทำแห้งถูกระเหยออกมาได้มากขึ้น จึงใช้

ระยะเวลาในการทำแห้งน้อยลง (Sirijariyawat *et al.*, 2015; Suphamityotin, 2018) เมื่อนำมาตรวจวัดคุณภาพทางกายภาพและเคมีได้ผลแสดงดังตารางที่ 3 ด้านค่าสี พบว่า การทำแห้งส่งผลให้ลูกประเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากเดิมที่มีสีขาวนวลเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล และจะมีสีเข้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการทำแห้งที่สูงขึ้น โดยลูกประอบแห้งมีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง แต่จะมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิในการทำแห้งที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับลูกประสด อันเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Maillard reaction) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่ง (Siyunglek *et al.*, 2019) ซึ่งอุณหภูมิในการทำแห้งที่สูงขึ้นจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ดี (Sirijariyawat *et al.*, 2015) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pichairat *et al.* (2016) ที่ศึกษาการทำแห้งเห็ดแครงด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้เห็ดแครงแห้งมีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง และมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง

Table 3 Physical and chemical qualities of dried Pra seed at various drying temperatures

Qualities	Raw	Drying temperature ($^{\circ}\text{C}$)		
		60	80	100
- Color				
L^*	67.33 $\pm$ 0.07 ^c	73.00 $\pm$ 0.03 ^a	72.21 $\pm$ 0.16 ^b	64.69 $\pm$ 0.45 ^d
a^*	2.18 $\pm$ 0.03 ^c	1.31 $\pm$ 0.01 ^d	3.48 $\pm$ 0.10 ^b	8.55 $\pm$ 0.13 ^a
b^*	22.73 $\pm$ 0.06 ^c	21.14 $\pm$ 0.02 ^d	25.36 $\pm$ 0.05 ^b	28.41 $\pm$ 0.18 ^a
- a_w	0.970 $\pm$ 0.01 ^a	0.420 $\pm$ 0.01 ^c	0.429 $\pm$ 0.01 ^b	0.431 $\pm$ 0.03 ^b
- Moisture (%)	26.58 $\pm$ 0.18 ^a	3.73 $\pm$ 0.14 ^b	3.78 $\pm$ 0.08 ^b	3.84 $\pm$ 0.12 ^b
- Fat (% dw)	25.12 $\pm$ 0.42 ^c	29.69 $\pm$ 0.16 ^a	29.43 $\pm$ 0.03 ^a	27.76 $\pm$ 0.31 ^b
- Protein (% dw)	14.06 $\pm$ 0.05 ^b	14.19 $\pm$ 0.05 ^a	14.10 $\pm$ 0.02 ^{ab}	14.19 $\pm$ 0.06 ^a
- Total cyanide content (mg/kg dw)	150.89 $\pm$ 0.15 ^a	48.49 $\pm$ 0.04 ^b	47.79 $\pm$ 0.01 ^c	43.46 $\pm$ 0.20 ^d
Reduction of cyanide (%)		67.86	68.33	71.20
- Total phenolic content (mg GAE/100 g dw)	42.48 $\pm$ 0.11 ^c	38.40 $\pm$ 0.03 ^d	46.52 $\pm$ 0.19 ^b	52.23 $\pm$ 0.12 ^a
- DPPH (mg AAE/100 g dw)	8.57 $\pm$ 0.06 ^c	6.84 $\pm$ 0.03 ^d	8.83 $\pm$ 0.03 ^b	16.45 $\pm$ 0.04 ^a
- FRAP (mg GAE/100 g dw)	6.52 $\pm$ 0.02 ^b	5.34 $\pm$ 0.04 ^d	5.92 $\pm$ 0.03 ^c	6.77 $\pm$ 0.07 ^a

Remark: Values with different letters in the same row are significantly different ($p \leq 0.05$).

ด้านคุณภาพทางเคมี พบว่าการทำแห้งส่งผลให้ลูกประมามีค่าวอเตอร์แอคติวิตีและปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับลูกประสด ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการระเหยน้ำออกในระหว่างการทำแห้ง โดยลูกประอบแห้งทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) และปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 0.420-0.431 และร้อยละ 3.73-3.84 โดยน้ำหนักตามลำดับ ขณะเดียวกันการทำแห้งส่งผลให้ลูกประอบแห้งที่ได้มีปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับลูกประสด และจะมีปริมาณไขมันลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มสูงขึ้น ($p \leq 0.05$) อันเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในระหว่างการทำแห้ง (Singhal *et al.*, 2022) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Supanpayak *et al.* (2020) ที่พบว่าการทำแห้งสำหรับผักกาดทะเลด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณไขมันของสาหร่ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามไม่พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนในลูกประ อันเป็นผลเนื่องมาจากการทำแห้ง ($p > 0.05$) และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณโซเดียมในตัวอย่างพบว่าการทำแห้งส่งผลให้ลูกประมีปริมาณโซเดียมในตัวอย่างทั้งหมดลดลง เนื่องจากการสลายตัวด้วยความร้อน และลูกประจะมีปริมาณโซเดียมในตัวอย่างทั้งหมดลดลงตามระดับอุณหภูมิในการทำแห้งที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ลูกประมีปริมาณโซเดียมในตัวอย่างทั้งหมดลดลงร้อยละ 67.86, 68.33 และ 71.20 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปริมาณโซเดียมในตัวอย่างทั้งหมดในลูกประสด ผลการศึกษาข้างต้นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thaweewong and Anuntagool (2022) ที่พบว่าการอบแห้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย ที่มีปริมาณโซเดียมไม่แตกต่างกัน แต่จะมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งมันสำปะหลังในช่วงแรก (0-40 นาที) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปเป็นไฮโดรเจนโซเดียม ขณะที่การอบแห้งช่วงหลัง (40-240 นาที) ทำให้เกิดการระเหยน้ำและสลายตัวของไฮโดรเจนโซเดียม ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจึงมีปริมาณโซเดียมลดลง และ Zhang *et al.* (2019) ที่พบว่าการอบอัลมอนต์ขมที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโซเดียมในอัลมอนต์ลดลง เนื่องจากความร้อนมีผลต่อการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายโซเดียมในจินโกไลด์ให้เปลี่ยนมาอยู่ในรูปไฮโดรเจนโซเดียม และทำให้น้ำอัลมอนต์เกิดการระเหยออก ซึ่งไฮโดรเจนโซเดียมที่ถูกกำจัดออกไปพร้อมกับการระเหยของน้ำ ปริมาณโซเดียมจึงลดลง ด้านปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่า การทำแห้งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของลูกประอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับลูกประสด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากความ

ร้อนทั้งจากการต้มและการทำแห้งรวมถึงระยะเวลาที่ได้รับความร้อน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในทิศทางที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยพบว่าลูกประที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด รองลงมาคือลูกประที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ขณะที่ลูกประที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) ที่ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้การทำแห้งที่อุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้เกิดความร้อนเพียงพอในการทำลายพันธะสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในรูปที่จับอยู่กับสารอื่น (bound form) ให้อยู่ในรูปอิสระหรือในรูปที่ละลายได้มากขึ้น รวมทั้งก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนโพลีฟีนอลในขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดในระหว่างการทำแห้ง จึงทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกมีคุณสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงทำให้คุณสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นด้วย (Yuenyongputtakal *et al.*, 2017) ลูกประที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมากกว่า จึงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงกว่าลูกประที่ทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า ขณะที่การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกอันเนื่องมาจากความร้อนและการเกิดออกซิเดชัน (Singhal *et al.*, 2022) ลูกประที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้งนานที่สุด จึงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำสุด สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Singhal *et al.* (2022) ที่ศึกษาการทำแห้งหน่อไม้ด้วยวิธีที่ต่างกัน ได้แก่ การทำแห้งด้วยการตากแดด (30-37 องศาเซลเซียส) การทำแห้งด้วยเตาอบ (60 องศาเซลเซียส) การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (70 องศาเซลเซียส) และการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ จนมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 พบว่า การทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดให้หน่อไม้ที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดต่ำสุด เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานจึงทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกอันเนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชันสูงสุด ขณะที่การทำแห้งด้วยไมโครเวฟแม้จะใช้เวลาน้อย แต่ทำให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิสูง จึงให้หน่อไม้ที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดต่ำและมีความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำที่สุด ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้น เมื่อพิจารณาคุณภาพของลูกประอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแห้งลูกประ คือ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ลูกประที่มีสีไม่เข้มจนเกินไป มีปริมาณไขมันและ

โปรตีนที่ระดับสูง และมีปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับลูกประที่แห้งที่อุณหภูมิอื่น ๆ ทั้งยังใช้ระยะเวลาในการทำแห้งที่ไม่นานเกินไป โดยปริมาณไซยาไนด์ที่ได้รับจากการบริโภคลูกประอบแห้งที่เตรียมจากการต้มในสารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 90 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และทำแห้งในตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กก./วัน ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) และองค์การอนามัยโลก (WHO) ที่กำหนดให้รับสารไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กก./วัน (Teerapapthamkul *et al.*, 2011) (กำหนดปริมาณการบริโภคลูกประอบแห้งที่ 60 กรัม/วัน และใช้ค่าน้ำหนักตัวเฉลี่ยที่ 60 กิโลกรัม) อย่างไรก็ตาม ลูกประอบแห้งผลิตขึ้นเพื่อต้องการยืดอายุการเก็บรักษาของลูกประและเพื่อให้ได้ลูกประที่มีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งกระบวนการผลิตดังกล่าวอาจช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ในลูกประลง ทำให้มีความปลอดภัยในการบริโภคเพิ่มขึ้น

4. สรุป

การศึกษามูลของสภาวะการต้มและการทำแห้งต่อคุณภาพลูกประ เพื่อทราบกรรมวิธีที่เหมาะสมในการผลิตลูกประอบแห้งที่มีคุณภาพและเก็บรักษาไว้ได้นาน พบว่ากรรมวิธีที่เหมาะสมในการผลิตลูกประอบแห้ง คือ การต้มลูกประที่แยกเอาเปลือกแข็งหุ้มเมล็ดออกแล้วในสารละลายผสมระหว่างเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนของลูกประและสารละลายที่ใช้ต้ม 1: 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 90 ± 5 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที นำลูกประมาหั่นเป็นชิ้นบางและทำแห้งในตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 210 นาที ซึ่งการต้มและการทำแห้งส่งผลให้ลูกประมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ปริมาณความชื้นและปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดลดลง โดยมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีเท่ากับ 0.429 มีปริมาณความชื้นร้อยละ 3.78 โดยน้ำหนัก มีปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด 47.79 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ลูกประอบแห้งที่ผลิตได้จึงมีคุณภาพและความปลอดภัยที่เหมาะสมกับการบริโภค และเก็บรักษาไว้ได้นาน

5. เอกสารอ้างอิง

AOAC. 2000. **Official methods of analysis of AOAC international** (17thed). AOAC International, Arlington.

- Bolarinwa, I.F., Orfila, C. and Morgan, M.R.A. 2015. Determination of amygdalin in apple seeds, fresh apples and processed apple juices. **Food Chemistry** 170: 437-442.
- Benzie, I.F.F. and Strain, J.J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power : The frap assay. **Analytical Biochemistry** 239(1): 70-76.
- Bhoyen, K. and Suwonsichon, S. 2013. Effects of blanching and acid treatments on chemical and physical properties of Jerusalem artichoke powder. pp.178-185. *In The 51st Kasetsart University Annual Conference*. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Charoenphun, N. and Meemuk, N. 2018. Effects of different blanching methods on quality of orange sweet potatoes. **Thai Science and Technology Journal** 26(6): 981-992. (in Thai)
- Charoensuk, A. , Jaroensutasinee, M. , Srisang, W. and Jaroensutasinee, K. 2012. Parah forest clusters at Khao Nan national park, Thailand. **Walailak Journal of Science and Technology** 9(4): 475-480.
- Chinnasarn, S. and Krasaechol, N. 2020. Effect of pretreatment and drying conditions on quality of dried Green Caviar product. **The Journal of KMUTNB** 30(4): 668-677. (in Thai)
- Choonhahirun, A. 2010. Proximate composition and functional properties of Pra (*Elatiospermum tapos* Blume) seed flour. **African Journal of Biotechnology** 9(36) : 5946-5949.
- Jaiwunglok, P. 2009. Effects of temperature and pH on taxiphyllin degradation in bamboo shoot. Master thesis (Food Engineering), King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- Jantarit, S., Wattanasit, S. and Sotthibandhu, S. 2009. Canopy ants on the briefly deciduous tree (*Elatiospermum tapos* Blume) in a tropical rainforest, southern Thailand. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 31(1): 21-28.
- Jitnupong, S. 2016. Changes in rights of access and withdrawal in Pra forest, and conflict: A case study of Pra forest, Khao Nan national park, Noppitam district, Nakhon Si Thammarat province. **Asian Journal of Arts and Culture** 16(1): 115-142. (in Thai)
- Kaewsuwan, W. and Nuichan, L. 2018. Effect of blanching time on characteristic of dried Pra seed. pp. 1117-

1125. In **The 8th Phayao Research Conference**. University of Phayao, Phayao. (in Thai)
- Kunjaetong, T., Sangnark, A. and Siriwong, N. 2018. Effect of boiling and steaming time of unripen banana on their physicochemical and functional properties, pp. 797-804. In **The 56th Kasetsart University Annual Conference**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Makpan, W. 2018. Survey of quantity and valuation of Pra at Buddha cave community: A boundary between Nakhon Si Thammarat and Trang provinces. **KKU Science Journal** 46(2): 317-323. (in Thai)
- Mompiboon, P., kaewsuan, W., Tripatch, A. and Wattananavin, T. 2018. Development of food processing technology from Pra seed (*Elateriospermum tapos* Blume) for commercial. **Wichcha Journal** 37: 114-128. (in Thai)
- Ngamriabsakul, C. and Kommen, H. 2009. The preliminary detection of cyanogenic glycosides in Pra (*Elateriospermum tapos* Blume) by HPLC. **Walailak Journal of Science and Technology** 6(1): 141-147.
- Nounmusig, J., Detchphetchtharak, P., Kongthong, J., Pethuan, S. and Yodpijit, S. 2023. Development of alternative milk from Parah seed (*Elateriospermum tapos*) . **Wichcha Journal** 42(2): 80-93. (in Thai)
- O'Brien, G.M., Taylor, A.J. and Pouler, N.H. 1991. Improved enzymatic assay for cyanogen in fresh and processed cassava. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 56(3): 277-289.
- Pichairat, D., Mahae, N. and Lohalaksnadech, S. 2016. **Research Reports on Nutritional Value and Optimum Condition for the Production of Dried Split Gill (*Schizophyllum commune* Fr.)**. Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang. (in Thai)
- Pokhariya, P., Tangariya, P., Sahoo, A., Awasthi, P. and Pandey, A. 2018. Reducing hydrocyanic acid content, nutritional and sensory quality evaluation of edible bamboo shoot based food products. **International Journal of Chemical Studies** 6(4): 1079-1084.
- Prakash, A., Vadivel, V., Banu, S.F., Nithyanand, P., Lalitha, C. and Brindha, P. 2018. Evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of solvent extracts of agro-food by-products (cashew nut shell, coconut shell and groundnut hull). **Agriculture and Natural Resources** 52: 451-459.
- Rana, B., Awasthi, P. and Kumbhar, B.K. 2012. Optimization of processing conditions for cyanide content reduction in fresh bamboo shoot during NaCl treatment by response surface methodology. **Journal of Food Science and Technology**. 49(1):10-109.
- Rawat, K., Nirmala, C. and Bisht, M.S. 2015. Processing techniques for reduction of cyanogenic glycosides from bamboo shoots, pp. 818-829. In **The 10th World Bamboo Congress**. World Bamboo, Korea.
- Singhal, P., Satya, S. and Naik, S.N. 2021. Fermented bamboo shoots: A complete nutritional, anti-nutritional and antioxidant profile of the sustainable and functional food to food security. **Food Chemistry: Molecular Sciences** 3: 100041.
- Singhal, P., Satya, S. and Naik, S.N. 2022. Effect of different drying techniques on the nutritional, antioxidant and cyanogenic profile of bamboo shoots. **Applied Food Research** 2: 100036.
- Sirijariyawat, A., Phuetsing, S. and Polviluy, C. 2015. Effect of drying temperature on quality of *Spirogyra* sp. **KKU Science Journal** 43(3): 459-468. (in Thai)
- Siyunglek, M., Techakriengkrai, T. and Siriwong, N. 2019. Preparation and application of dried almond residue for substitution of almond flour in macaron. **Thai Science and Technology Journal** 28(9): 1572-1584. (in Thai)
- Suphamityotin, P. 2018. Drying of carrot pomace and utilization in the bread for improving nutrition values. **KKU Science Journal** 46(1): 93-101. (in Thai)
- Supanpayak, J., Chalermchaiwat, P. and Limsuwan, T. 2020. Effect of drying condition on the quality of Sea Lettuce (*Ulva rigida*) and its application in crispy snack. **KKU Science Journal** 48(2): 227-235. (in Thai)
- Teerapapthamkul, S., Thongpho, S., Jamsri, W., Promprasit, P., Unahalekhaka, J. and Chinwattanawong, P. 2011. Risk assessment of cyanide in bamboo shoots. **Bulletin of the department of medical science** 53(2): 67-79. (in Thai)
- Thaweewong, P. and Anuntagool, J. 2022. Effect of drying on cyanide content in cassava, pp. 92-100. In **The 60th Kasetsart University Annual Conference**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

- Thammachai, K. 2006. Quality of common figs dehydrated by tray dryer. Master thesis (Food Science and Technology), Chiang Mai University. (in Thai)
- Yuenyongputtakal, W. 2013. Factors influencing on dewatering by osmotic dehydration of fruits and vegetables. **Burapha Science Journal** 18(1): 226-223. (in Thai)
- Yuenyongputtakal, W., Thimthong, D. and Bangsri, W. 2013. Effect of Pre-treatment Method and Iron Content Enrichment on Sea Lettuce (*Ulva rigida*) in Osmosis Process. **Thai Science and Technology Journal** 21(5): 461-473. (in Thai)
- Yuenyongputtakal, W., Limroongreungrat, K., Chaipanand, P. and Srimuang, T. 2017. Effect of hot air drying temperature and time on qualities of enoki mushroom (*Flammulina velutipes*) powder produced from uncommonly consumed part. **Thai Science and Technology Journal** 25(6): 1001-1014. (in Thai)
- Zhang, R., Zeng, Q., Deng, Y., Zhang, M., Wei, Z., Zhang Y. and Tang, X. 2013. Phenolic profiles and antioxidant activity of litchi pulp of different cultivars cultivated in southern China. **Food Chemistry** 136(3-4): 1169-1176.
- Zhang, L., Zhao, M., Chen, J., Wang, M. and Yu, X. 2019. Reduction of cyanide content of bitter almond and its oil using different treatments. **International Journal of Food Science and Technology** 54: 3083-3090.

Research Article

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตและคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ
ของวันสวรค์จากกากลูกหม่อนโดยเชื้อ *Acetobacter xylinum*

A Study on the Optimum Conditions for Producing Bacterial Cellulose and Its Antioxidant
Properties from Mulberry Pomace by *Acetobacter xylinum*

ตัทนัม สมวงศ์^{a*}, นูรามาลี ดีนามอ^b และ วรธมน วัฒนายน^a

Tasneem Somwong^{a*}, Nuramalee Deenamo^b and Wassamon Wathanayon^a

^a สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 96000

^a Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Princess of Naradhiwas, Meang, Naradhiwas 96000, Thailand.

^b สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 96000

^b Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Princess of Naradhiwas, Meang, Naradhiwas 96000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-02-12

Revised: 2024-10-31

Accepted: 2024-11-13

Keywords:

bacterial cellulose;

agricultural waste;

mulberry pomace;

Acetobacter xylinum

Nata de Coco or cellulose produced by bacteria that create cellulose can be applied in various food applications. The objectives of this research were to study the optimal conditions for producing cellulose from mulberry pomace leftover from agricultural processing using *Acetobacter xylinum* strain and to study the antioxidant properties, comparing with cellulose from coconut juice. The experiment results showed that the optimal conditions for producing cellulose from mulberry pomace were an inoculum amount of 10% (v/v), a pH of 4.0 and incubation at 30 degrees Celsius for 14 days, which yielded the highest cellulose production. This was compared to cellulose production using coconut juice, which yield at 19.5±0.19 and 16.7±0.95 g/100 mL, respectively. A total soluble solids content was showed at 9.20±0.17 and 5.03±0.06 °Brix, respectively. When analyzing the physical quality of cellulose from mulberry pomace and coconut juice, it was found that cellulose from mulberry pomace had a significantly higher red color value (a*) with a statistical difference level of ($p<0.05$). The gel strength of cellulose from mulberry pomace was higher than that from coconut juice, measuring 28.27±0.35 and 19.67±0.37 newtons, respectively. Additionally, cellulose from mulberry pomace contained total monomeric anthocyanin at 853.09±5.37 mg equivalent to cyanidin-3-glucoside per 100 g of dry weight, total phenolic compound content at 131.16±0.466 mg equivalent to gallic acid per 100 g of dry weight, and total flavonoids at 214.0±0.37 mg equivalent to catechin per 100 grams of dry weight, and exhibited antioxidant properties (DPPH) with an IC50 value of 3.63±0.51 mg/mL.

* Corresponding author.

E-mail address: Tasneem.s@pnu.ac.th

Cite this article as:

Somwong, T., Deenamo, N. and Wathanayon, W. 2025. A Study on the Optimum Conditions for Production and Antioxidant Properties of Bacterial Cellulose from Mulberry Pomace by *Acetobacter xylinum*. *Recent Science and Technology* 17(3): 262167.

บทคัดย่อ

วันสวร์หรือเซลลูโลสที่ผลิตโดยแบคทีเรียที่สร้างเซลลูโลส โดยสามารถประยุกต์ใช้ในอาหารได้หลากหลาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวันสวร์จากกากลูกหม่อนที่เหลือจากการแปรรูปทางการเกษตร ด้วยเชื้อ *Acetobacter xylinum* และศึกษาคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระซึ่งเปรียบเทียบกับวันสวร์จากน้ำมะพร้าว ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวันสวร์จากกากลูกหม่อนพบว่า ปริมาณหัวเชื้อ 10% (v/v) ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.0 และบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน ให้ปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้มะพร้าวเท่ากับ 19.5 ± 0.19 และ 16.7 ± 0.95 กรัม/100 มิลลิลิตร ตามลำดับ และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเท่ากับ 9.20 ± 0.17 และ 5.03 ± 0.06 องศาบริกซ์ ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของวันสวร์จากกากลูกหม่อนและน้ำมะพร้าวพบว่า วันสวร์จากกากลูกหม่อนมีค่าสีแดง a^* เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และความแข็งแรงเจล (gel strength) วันสวร์จากกากลูกหม่อนสูงกว่าวันสวร์จากน้ำมะพร้าวเท่ากับ 28.27 ± 0.35 และ 19.67 ± 0.37 นิวตัน ตามลำดับ นอกจากนี้ในวันสวร์จากกากลูกหม่อนมีปริมาณสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 853.09 ± 5.37 มิลลิกรัมสมมูลของ cyanidin-3-glucoside ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณสารฟีนอลิกเท่ากับ 131.16 ± 0.466 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณสารฟลาโวนอยด์เท่ากับ 214.0 ± 0.37 มิลลิกรัมสมมูลของ catechin ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง และมีคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ได้ โดยมีค่า IC50 เท่ากับ 3.63 ± 0.51 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

คำสำคัญ: วันสวร์, วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร, กากลูกหม่อน, *Acetobacter xylinum*

1. บทนำ

วันสวร์ (Nata de coco) หรือเซลลูโลส (cellulose) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Acetobacter aceti* sub sp. *xylinum* เป็นสายพันธุ์ที่มีความสำคัญในการผลิตเซลลูโลส เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตเซลลูโลสปริมาณมากและมีคุณภาพที่ดี วันสวร์หรือเส้นใยเซลลูโลสมีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ที่ต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic bond ซึ่งเส้นใยมีขนาดเล็ก มีความบริสุทธิ์สูง อุดมไปด้วยน้ำตาลและต้านทานต่อแรงดึงสูง (Dejsungkranont, 2018) จากคุณสมบัติที่ดีข้างต้น วันสวร์จึงได้รับความนิยมนำไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มหลากหลายชนิด เช่น อาหารที่ให้พลังงานต่ำ อาหารคีโต และน้ำผลไม้ เพื่อเพิ่มลักษณะเนื้อสัมผัสแก่อาหารและมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย เนื่องจากเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ไม่สามารถย่อยเส้นใยเซลลูโลสได้ ทำให้ช่วยลดความเสี่ยงการเป็นมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Mesomya et al., 2006; Jagannath et al., 2008; Bunyakorn, 2017) ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตวันสวร์จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่เหลือทิ้งภายหลังจากการแปรรูปและมีราคาต่ำ อาทิ เช่น การผลิตวันสวร์จากน้ำคั้นเปลือกสับปะรด วันสวร์จากน้ำเปลือกมังคุด วันสวร์จากข้าวหมากปลายข้าวเหนียวดำ วันสวร์จากน้ำมะม่วงและน้ำแก้วมังกรพันธุ์เนื้อสีแดง เป็นต้น เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งและสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวันสวร์ ทำให้ช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิตได้ เนื่องจากมีราคาไม่แพง (Dejsakungkranont, 2018; Phromthep et al., 2018; Promwongpo et al., 2018; Jaturapiree et al., 2019; Samappito et al., 2023)

หม่อน (Mulberry) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Morus alba* Linn. เป็นพืชสมุนไพรที่อยู่ในวงศ์ Moraceae นิยมปลูกในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย โดยต้นหม่อนปลูกไว้เพื่อใช้เลี้ยงหนอน

ไหม โบหม่อน (Bombyx Mori) ถูกใช้เป็นแหล่งอาหารและลูกหม่อน (Mulberry Fruit) เป็นผลพลอยได้จากการเลี้ยงหนอนไหม ลูกหม่อนจะมีลักษณะเป็นผลแบบรวมในพวงเดียวกัน ในลูกหม่อนสุกจะมีลักษณะอวบ น้ำ รสชาติเปรี้ยวอมหวาน และสีของลูกหม่อนอ่อนจะมีสีแดงสด ส่วนผลสุกจะมีสีแดงเข้มอมม่วง ซึ่งสีของลูกหม่อนเกิดจากรงควัตถุชนิดสารประเภทแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีและมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ทั้งนี้มีสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่จะช่วยป้องกันการเกิดโรคเรื้อรังต่าง ๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคมะเร็ง และโรคหัวใจ เป็นต้น นอกจากนี้ในลูกหม่อนจะอุดมไปด้วยสารอาหารอื่น ๆ ที่มีคุณค่าทางโภชนาการ อาทิเช่น คาร์โบไฮเดรต 21.35 กรัม/100 กรัม ไขมัน 43.48 มิลลิกรัม/100 กรัม วิตามิน (B1) 50.65 กรัม/100 กรัม และวิตามิน (B6) 390.10 มิลลิกรัม/100 กรัม (Ercisli and Orhan, 2007; Pawloska et al., 2008; Roskhrua and Kitchaicharoen, 2020; Leelahemarantana and Tongchitpakdee, 2021) เนื่องจากลูกหม่อนมีอายุการเก็บรักษาสั้น บอบช้ำและเน่าเสียง่าย ลูกหม่อนจึงถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวและเครื่องสำอางประเภทต่าง ๆ มากมาย (Li et al., 2020) ประโยชน์ของการแปรรูปลูกหม่อนจะช่วยลดปัญหาการเน่าเสียและเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าทางการเกษตร แต่ในการแปรรูปลูกหม่อนผู้ผลิตมักจะนิยมเลือกใช้เฉพาะส่วนของน้ำเท่านั้นและส่วนของกากจะถูกทิ้ง

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จากกากลูกหม่อนที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปโดยการผลิตวันสวร์ในกระบวนการหมักจากเชื้อ *Acetobacter xylinum* โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักและวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพในวันสวร์จากกากลูกหม่อน เพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำกากลูกหม่อน (Mulberry pomace) สายพันธุ์ *Morus alba* Linn. ที่เหลือทิ้งหลังจากกระบวนการแปรรูปจากศูนย์วิจัยหม่อนไหมพิบูลทอง จังหวัดนครราชสีมา นำมาวางแผ่นบนตะแกรงเพื่อสะเด็ดน้ำและเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และน้ำมะพร้าวที่ได้จากมะพร้าวแก่สำหรับคั้นกะทิ ได้รับจากตลาดสดในเทศบาลเมือง จังหวัดนครราชสีมา นำมารองสีงสปกรด้วยผ้าขาวบาง แล้วเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.2 การเตรียมหัวเชื้อ *Acetobacter xylinum*

A. xylinum เป็นแบคทีเรียที่สำหรับกระบวนการผลิตวุ้นสวรรค์จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นำน้ำมะพร้าวที่กรองสีงสปกรออกแล้วปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำตาลซูโครส 5.0 กรัม แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20 นาที จากนั้นเติมแอมโมเนียมซัลเฟต ((NH₄)₂SO₄) 0.3 กรัม ต้มต่อไปอีก 1 นาที เมื่อครบเวลาปรับค่า pH ในน้ำมะพร้าวให้เท่ากับ 4.0 ด้วยกรดอะซิติก (acetic acid) ความเข้มข้น 1% (v/v) ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมเชื้อ *A. xylinum* 10% (v/v) ลงไปในอาหารที่เตรียมไว้ บ่มในตู้บ่มเชื้อ (INB 300 Incubator, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จะเกิดแผ่นวุ้นบนผิวหน้าอาหาร สำหรับเป็นกล้าเชื้อเริ่มต้นเพื่อเตรียมใช้ในการทดลองต่อไป ส่วนของกล้าเชื้อที่เหลือจะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *A. xylinum* ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ซึ่งดัดแปลงวิธีการจาก Chemama *et al.* (2020) นำตัวอย่างเชื้อปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที จากนั้นล้างตัวอย่างเซลล์ด้วยสารละลาย 0.5 M Phosphate buffer 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที นำตัวอย่างตรึงด้วยสารเคมี 2.5% (w/v) Glutaraldehyde (C₅H₈O₂) ใน 0.2 M PB เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาให้ล้างตัวอย่างด้วย 0.1 M PB และน้ำกลั่น 3 ครั้ง จากนั้นกำจัดน้ำออกจากตัวอย่างโดยใช้ Alcohol series จากความเข้มข้นต่ำไปจนถึงความเข้มข้นสูง (เอทานอล 50-100%) ความเข้มข้นละ 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Critical Point Drier และเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำเป็นเวลา 2 นาที และศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเชื้อที่ปรากฏภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.4 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตวุ้นสวรรค์จากกากลูกหม่อน

2.4.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกับข้อ 2 และปรับความเป็นกรด-ด่างด้วยกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 1% (v/v) ให้ pH เท่ากับ 3.0, 4.0 และ 5.0 จากนั้นเติมเชื้อ *A. xylinum* 10% (v/v) ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และวิเคราะห์ปริมาณเซลล์ได้

2.4.2 อุณหภูมิ (Temperature)

เติมเชื้อ *A. xylinum* 10% (v/v) ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกับข้อ 2 จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และวิเคราะห์ปริมาณเซลล์ได้

2.4.3 ปริมาณเชื้อเริ่มต้น (Inoculum)

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกับข้อ 2 และเติมหัวเชื้อ *A. xylinum* ปริมาตร 5, 10 และ 20 มิลลิลิตร ลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน และวิเคราะห์ปริมาณเซลล์ได้

2.5 การผลิตวุ้นสวรรค์จากกากลูกหม่อน

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า การใช้กากลูกหม่อน 100% เป็นวัตถุดิบในการผลิตวุ้นสวรรค์จะให้ผลผลิตต่ำกว่าการใช้กากลูกหม่อนผสมน้ำมะพร้าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้กากลูกหม่อนผสมกับน้ำมะพร้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตวุ้นสวรรค์โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้ ชั่งกากลูกหม่อน 10 กรัม ผสมกับในน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำตาลซูโครส 5.0 กรัม นำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20 นาที ใส่แอมโมเนียมซัลเฟต ((NH₄)₂SO₄) 0.3 กรัม ต้มต่อไปอีก 1 นาที เมื่อครบเวลาใส่กรดอะซิติกเพื่อปรับ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 4.1 ลงในอาหารขณะที่ยังร้อนและตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมกล้าเชื้อ *A. xylinum* และนำไปบ่มในสภาวะที่อุณหภูมิเหมาะสมโดยอ้างอิงข้อมูลจากข้อ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 14 วัน เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักนำวุ้นสวรรค์ที่ได้วัดความหนาด้วย Vernier Calipers (Plexpert, Canada) วิเคราะห์ปริมาณเซลล์ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง Analytical balance (Mettler-Toledo, Thailand) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำหมักด้วย Hand refractometer (Atago, India) วัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter (Mettler-Toledo, Thailand) วัดค่าสีของวุ้นสวรรค์ (L* a* b*) ด้วยเครื่อง Handy colorimeter (ColorFlex Ez45/0L, USA) โดยใช้ระบบ CIE Lab scale และวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของเจล (gel strength) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Ametek Brookfield CTX Texture Analyzer, Germany) ใช้หัววัดขนาด 12.7 มิลลิเมตร Cylinder probe (TA18 sphere) ทำการทดลอง 3 ซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย (Jaturapiree *et al.*, 2019; Samappito *et al.*, 2023)

2.6 การเก็บเกี่ยววันสวรรคตกาหลูกหม่อน

นำวันสวรรคตกาหลูกหม่อนที่ได้ล้างน้ำสะอาด 5 ครั้ง นำไปต้มในสารละลาย 0.1 M NaOH ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที จากนั้นล้างน้ำสะอาดและแช่ทิ้งไว้ 1 คืน นำวันสวรรคตล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆครั้งจนน้ำล้างมีค่า pH เท่ากับ 7 แล้วหั่นวันสวรรคตให้เป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋าขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ เซนติเมตร บรรจุใส่ถุงพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน (PE) และเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสก่อนนำตัวอย่างวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป (Bunyakorn, 2017; Dejsungkranont, 2018)

2.7 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวันสวรรคตกาหลูกหม่อน

นำตัวอย่างวันสวรรคตกาหลูกหม่อนที่ได้จากข้อ 6 ทำการสกัดสารโดยดัดแปลงจากวิธีการของ Rattana and Saengsanga (2020) ซึ่งตัวอย่าง 100 กรัม ใส่ในเอทานอล 1,000 ml แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษ Whatman® No.4 นำตัวอย่างของเหลวที่ได้จากการกรองระเหยเอทานอลด้วยเครื่อง rotary evaporate (Heidolph, Germany) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เก็บสารสกัดที่ได้จากการระเหยที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2.7.1 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total anthocyanin determination)

วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินในตัวอย่างวันสวรรคตกาหลูกหม่อนโดยวิธี pH differential method ปรับระดับความเจือจางของตัวอย่างสารสกัดลง 10 เท่า โดยหลอดที่หนึ่งเจือจางตัวอย่าง 0.05 มิลลิลิตร ด้วยบัฟเฟอร์ pH 1.0 (Potassium chloride เข้มข้น 0.025 โมล) 1.8 มิลลิลิตร หลอดที่สองเจือจางตัวอย่าง 0.05 มิลลิลิตร ด้วยบัฟเฟอร์ pH 4.5 (Sodium acetate เข้มข้น 0.4 โมล) 1.8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร ของทั้ง 2 หลอด คำนวณหาค่าปริมาณแอนโทไซยานินโดยเทียบกับ cyanidin-3-glucoside ด้วยสูตร (AOAC, 2002; Kanklai et al., 2021)

$$\text{Total Anthocyanin} = \frac{A \times MW \times DF \times 10^3}{\epsilon \times L}$$

$$A = [(A_{520}-A_{700}) \text{ at pH } 1.0] - [(A_{520}-A_{700}) \text{ at pH } 4.5],$$

$$MW = 449.2, L = 1, DF = \text{dilution factor}, \epsilon = 26,900$$

2.7.2 วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่างวันสวรรคตกาหลูกหม่อนโดยใช้วิธี total phenol assay ดัดแปลงวิธีจาก Zhang et al. (2023) เตรียมตัวอย่างสารสกัดที่จะทดสอบ

ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ผสมกับสาร Folin-Ciocalteu's phenol reagent (Loba, India) บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม 20% NaCO₃ ปริมาตร 1,000 ไมโครลิตร 10 นาที ที่อุณหภูมิห้องและวัดปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร นำค่าที่วัดได้เทียบกับกราฟมาตรฐานโดยใช้กรดแกลกติกเป็นสารมาตรฐาน รายงานผลเป็นปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลกติกต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง)

2.7.3 วิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total flavonoid content)

นำตัวอย่างสารสกัดวันสวรรคตกาหลูกหม่อนปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมกับสาร AlCl₃ ปริมาตร 500 ไมโครลิตร และ CH₃COONa ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง 15 นาที จากนั้นวัดปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร โดยผลการทดลองจะเทียบกับกราฟมาตรฐานของ catechin (มิลลิกรัมสมมูลของ catechin ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) (Kim et al., 2003)

2.7.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH scavenging assay)

ตรวจสอบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH โดยวิธีการดัดแปลงจาก Kanklai et al. (2021) เติมน้ำละลายความเข้มข้น 0.1 mM DPPH (2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazyl-hydrate) (Sigma-Aldrich™) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีตัวอย่างสารสกัดวันสวรรคตกาหลูกหม่อน เขย่าให้ผสมกันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยผลการทดลองจะนำมาเทียบกับกราฟมาตรฐานของวิตามินซี (Gallic acid) (Sigma-Aldrich™) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำค่าที่ได้คำนวณหาค่าฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ค่า 50% inhibitory concentration (IC₅₀) ใช้หน่วยมิลลิกรัมสมมูลของวิตามินซีต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง

2.8 การประเมินทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จทางสถิติ SPSS Version 23 โดยวางแผนการทดลองแบบ T-test และ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำและนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ที่กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตัวอย่างด้วยวิธี Duncan's New Multiple Rang Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *A. xylinum* ในรูปแบบ 3 มิติ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่า เซลล์มีขนาด $1.0 \times 1.5\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ รูปร่างแท่ง (bacilli) การเรียงตัวอยู่เป็นคู่และกระจาย ไม่มีแฟลเจลลาและไม่มีสปอร์ (Figure 1)

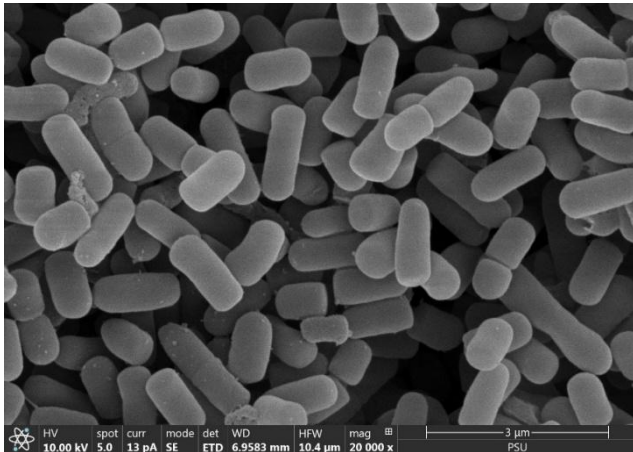


Figure 1 Morphology of *Acetobacter xylinum* by Scanning electron microscope (SEM) with the scale bar of $3\ \mu\text{m}$

3.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวุ้นสวรรค์

pH ที่เหมาะสมต่อการผลิตวุ้นสวรรค์พบว่า pH ที่ระดับ 4.0 มีความเหมาะสม ให้ปริมาณวุ้นสวรรค์สูงสุด โดยวิเคราะห์จากน้ำหนักแห้งของเซลล์มีค่าเท่ากับ 77.37 ± 2.09 กรัม/100 มิลลิลิตร รองลงมาคือ pH ที่ระดับ 3.0 และ 5.0 เท่ากับ 47.72 ± 2.47 กรัม/100 มิลลิลิตร และ 57.88 ± 2.15 กรัม/100 มิลลิลิตร (Figure 2a) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Raghunathan (2013) พบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตเซลล์จะอยู่ในช่วง pH 4.0-6.0 และหาก pH ต่ำกว่า 4.0 นั้นจะส่งผลต่อการผลิตเซลล์ลดลง เช่นเดียวกับ Promwongpo *et al.* (2018) ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการผลิตเซลล์จากน้ำมะม่วงเป็นวัตถุดิบพบว่า น้ำมะม่วงที่ปรับ pH เท่ากับ 4.0 สามารถผลิตเซลล์ได้สูงสุดเท่ากับ 43.83 ± 0.51 กรัม/ลิตร และการศึกษาของ Samappito *et al.* (2023) พบว่า *A. xylinum* สามารถผลิตวุ้นสวรรค์ได้มากที่สุดจากข้าวหมากปลายข้าวเหนียวดำเมื่อปรับค่า pH ในอาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 4.0 เช่นกัน

จากการศึกษาผลของระดับอุณหภูมิต่างๆที่เหมาะสมต่อการผลิตเซลล์ พบว่าอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เหมาะสมต่อ

การผลิตเซลล์มากที่สุด โดยแสดงผลของปริมาณเซลล์ต่อเท่ากับ 73.14 ± 0.35 กรัม/100 มิลลิลิตร รองลงมาคือ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 54.41 ± 2.44 กรัม/100 มิลลิลิตร และ 35 องศาเซลเซียส ไม่มีการสร้างเซลล์ เพราะอุณหภูมิสูงเกินไป ส่งผลให้เชื้อไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (Figure 2b) สอดคล้องกับการศึกษาของ Talawar *et al.* (2015) และ Son *et al.* (2001) พบว่า แบคทีเรียที่ผลิตเซลล์จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญและสร้างเซลล์อยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส ถ้าหากอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่านั้นจะไม่เหมาะสมต่อการเจริญและจะส่งผลให้ไม่มีการผลิตเซลล์ นอกจากนี้มีการรายงานการผลิตเซลล์โดยใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกากน้ำตาลที่ได้จากหัวบีทพบว่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลิตเซลล์ได้ปริมาณสูงที่สุดเท่ากับ 0.03 และ 0.023 กรัม/ลิตร ในขณะที่ระดับอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณเซลล์เพียง 0.015 กรัม/ลิตร (Çoban and Biyik, 2011) และการศึกษาของ Pham and Tran (2023) พบว่า แบคทีเรีย *A. xylinum* สร้างผลึกเซลล์จากสารละลายกากสับปะรดได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นั้นจะสร้างผลึกเซลล์ได้ดีที่สุด

จากการทดสอบปริมาณเชื้อเริ่มต้นพบว่า เชื้อเริ่มต้นมีผลต่อการสร้างเซลล์และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งเชื้อเริ่มต้น 10% (v/v) ให้ผลผลิตวุ้นสวรรค์ได้สูงสุดเท่ากับ 75.62 ± 1.90 กรัม/100 มิลลิลิตร รองลงมาคือ ปริมาตรเชื้อเริ่มต้น 20% (v/v) เท่ากับ 53.71 ± 1.73 กรัม/100 มิลลิลิตร ส่วนปริมาตรเชื้อเริ่มต้น 5% (v/v) ให้ผลผลิตน้อยที่สุดเท่ากับ 35.62 ± 1.65 กรัม/100 มิลลิลิตร ตามลำดับ (Figure 2c) สอดคล้องกับ Khemacheewakul (2017) พบว่าในกระบวนการหมักโดยเชื้อ *A. xylinum* ปริมาตรของเชื้อเริ่มต้นควรมีความเหมาะสมต่อปริมาตรของอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยปกติจะนิยมใส่เชื้อเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 มิลลิลิตร ปริมาตรเชื้อเริ่มต้นน้อยจะทำให้เชื้อปรับตัวในช่วง Lag phase นานเกินไป ทำให้มีโอกาสเกิดการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่ไม่ต้องการและส่งผลให้เชื้อเริ่มต้นที่มียูตายได้ หรือความเข้มข้นของอาหารที่มากเกินไปกว่าปริมาณเชื้อเริ่มต้นจะส่งผลให้สภาพของสารละลายภายนอกเซลล์มีความเข้มข้นสูงกว่าสารละลายภายในเซลล์ ทำให้สารละลายภายในเซลล์เคลื่อนที่ออกจากเซลล์และส่งผลให้เซลล์เหี่ยวตายได้ ในขณะเดียวกันหากมีปริมาณเชื้อเริ่มต้นมากเกินไป จะส่งผลให้กระบวนการสร้างวุ้นสวรรค์ลดลงเช่นกัน เพราะสารอาหารไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ (Chemama *et al.*, 2020)

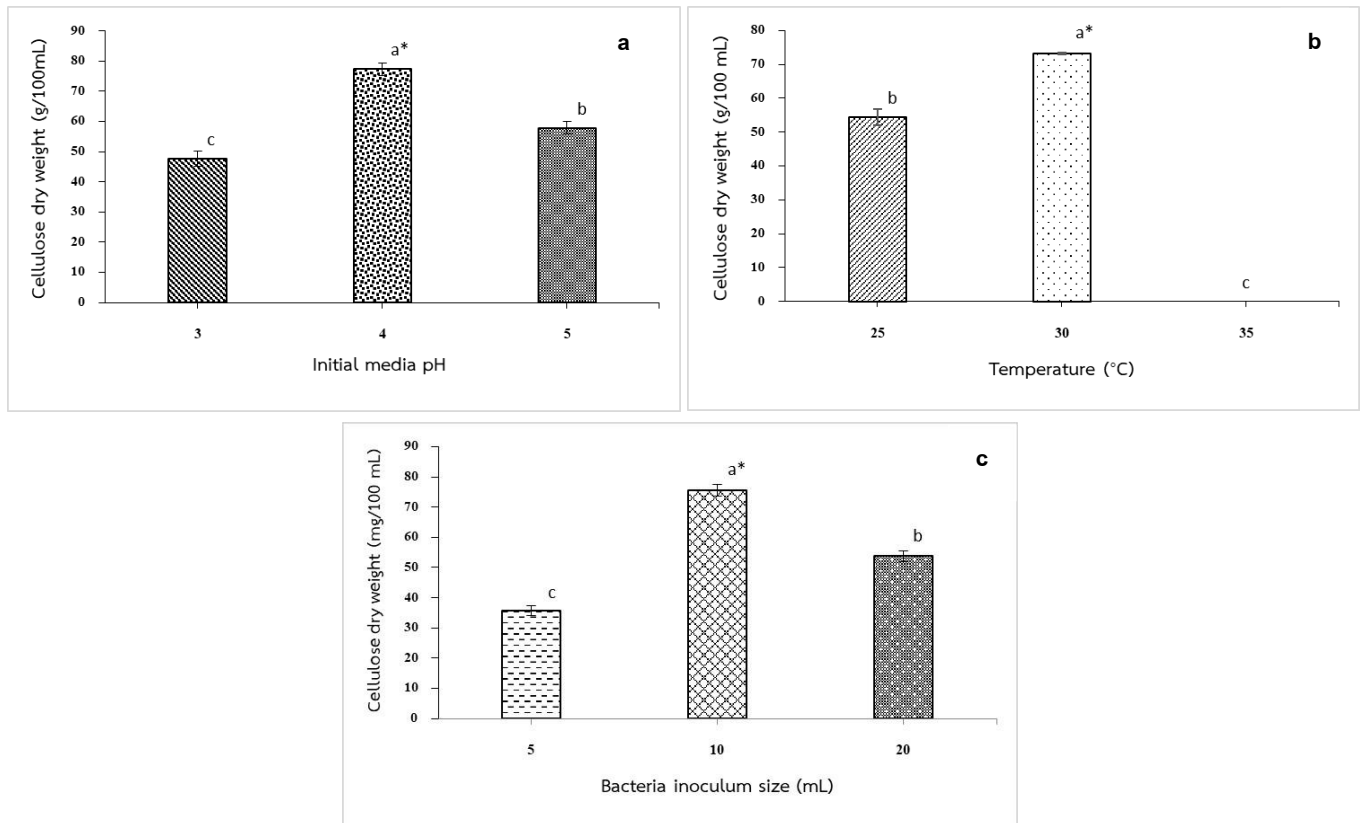


Figure 2 Effect of physical parameter on bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* after cultivation in 100 ml of the modified medium after incubation at 14 days (a) initial media pH (b) temperature (c) bacteria inoculum size

abc different letters in a column are significantly different level ($p < 0.05$)

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเซลลูโลสจากกากลูกหม่อน ด้วยเชื้อ *A. xylinum* ภายหลังจากกระบวนการหมัก 14 วัน พบว่าปริมาณเซลลูโลสที่ผลิตได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณเซลลูโลสจากกากลูกหม่อนและน้ำมะพร้าวมีค่าเท่ากับ 19.5 ± 0.19 และ 16.7 ± 0.95 กรัม/100 มิลลิลิตร ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของวันสวรค์ทั้งสองชนิด พบว่าค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 41.77 ± 0.28 , 7.75 ± 0.17 และ -3.80 ± 0.12 ตามลำดับ ซึ่งค่า a^* ของวันสวรค์กากลูกหม่อนมีมากกว่าวันสวรค์จากน้ำมะพร้าว 12.5 เท่า ส่วนค่า L^* และ b^* พบว่ามีค่าน้อยกว่าประมาณ 1 เท่า ดังแสดงตารางที่ 1 และ Figure 3 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของน้ำมะพร้าวที่มีสีขาวใสและในกากลูกหม่อนมีสีแดงที่เป็นรงควัตถุของสารประกอบแอนโทไซยานิน (Roskhrua and Kitchaicharoen, 2020; Leelahemaratan and Tong chitpakdee, 2021) เมื่อทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำหลังจากกระบวนการหมักวันสวรค์จากน้ำมะพร้าวและกากลูกหม่อนพบว่า วันสวรค์จากกากลูกหม่อนมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดสูงกว่าน้ำมะพร้าว

เท่ากับ 9.20 ± 0.17 และ 5.03 ± 0.06 องศาบริกซ์ ($p < 0.05$) ตามลำดับ วันสวรค์ทั้ง 2 ชนิดมีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยวันสวรค์จากกากลูกหม่อนมีค่า gel strength สูงกว่าวันสวรค์จากน้ำมะพร้าวเท่ากับ 28.27 ± 0.35 และ 19.67 ± 0.37 นิวตัน ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวทำให้เห็นว่าวันสวรค์จากกากลูกหม่อนมีคุณภาพดีกว่าวันสวรค์จากน้ำมะพร้าวเพียงอย่างเดียว เนื่องจากน้ำมะพร้าวมีสารอาหารและแหล่งคาร์บอนที่จำเป็นต่อการผลิตวันสวรค์ (Lapuz *et al.*, 1967) แต่เมื่อมีการเพิ่มกากลูกหม่อนลงในน้ำมะพร้าวจะยิ่งส่งผลให้มีการสร้างเซลลูโลสได้มากขึ้น เพราะในกากลูกหม่อนนั้นมีสารประกอบแอนโทไซยานิน มีกรดอะมิโน สารประกอบอินทรีย์ รวมทั้งสารอาหารอื่นๆที่เหลืออยู่ ซึ่งมีความสำคัญและจำเป็นต่อการนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *A. xylinum* (Li *et al.*, 2020) จึงเป็นไปได้ที่กรดอะมิโนในกากลูกหม่อนนั้นจะช่วยส่งเสริมให้มีการเจริญและเพิ่มผลผลิตปริมาณเซลลูโลสได้มากขึ้นกว่าเดิม (Son *et al.*, 2003)

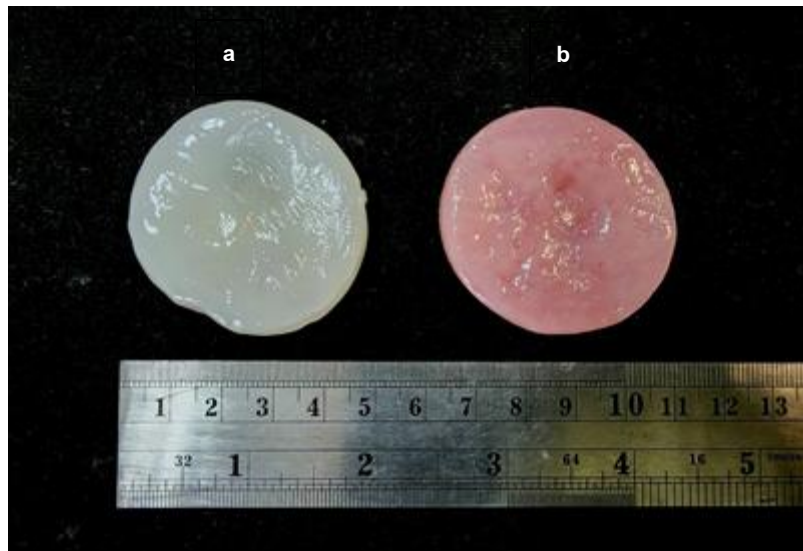


Figure 3 Bacterial cellulose produced from *Acetobacter xylinum* in coconut juice (a) and mulberry pomace (b)

Table 1 Characteristic of cellulose produced from coconut juice and mulberry pomace by *Acetobacter xylinum*

Quality	Coconut juice	Mulberry pomace
Colors		
L*	43.65 ^{ns} ±0.6	41.77 ^{ns} ±0.28
a*	-0.62 ^b ±0.1	7.75 ^a ±0.17
b*	-4.13 ^{ns} ±0.72	-3.80 ^{ns} ±0.12
Cellulose thickness (mm)	8.1 ^b ±0.75	12.2 ^a ±0.20
Cellulose weight (g/100 ml)	19.5 ^a ±0.19	16.7 ^b ±0.95
Total soluble solids (°Brix)	5.03 ^b ±0.06	9.20 ^a ±0.17
pH ^{ns}	3.52 ^{ns} ±0.04	3.25 ^{ns} ±0.03
Gel strength (N)	19.67 ^b ±0.35	28.27 ^a ±0.35

^{ns} different letters in a column are non-significantly different level ($p < 0.05$)

^{ab} different letters in a column are significantly different level ($p < 0.05$)

± average of standard deviation

L*: Lightness, axis shows L = 0 (black or total absorption) at the bottom

a*: Red/Green Value, (+) movement represents a shift toward red, (-) movement represents a shift toward green

b*: Blue/Yellow Value, (+) movement represents a shift toward yellow, (-) movement represents a shift toward blue

จากการศึกษาปริมาณสารสำคัญในวัณสวรรค์กากลูกหม่อนพบว่า ปริมาณสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 853.09±5.37 มิลลิกรัมสมมูลของ cyanidin-3-glucoside ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีปริมาณสารสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kanklai *et al.* (2021) ที่ได้ศึกษาปริมาณสารแอนโทไซยานินในผลิตภัณฑ์น้ำลูกหม่อนที่มีส่วนผสมกากาป่าผลิตโดยเชื้อ *Levilactobacillus brevis* F064A พบว่า มีปริมาณสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 0.235±15.53 มิลลิกรัมสมมูลของ cyanidin-3-glucoside ต่อ ลิตร และงานวิจัยของ Du *et al.* (2021) รายงานผลของปริมาณสารแอนโทไซยานินในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตกากลูกหม่อนที่บ่มไว้ระยะเวลา 28 วัน พบว่า มีปริมาณสารแอนโทไซยานินเท่ากับ

0.309±0.24 มิลลิกรัมสมมูลของ cyanidin-3-glucoside ต่อ กรัม นอกจากนี้ มีรายงานผลการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการสกัดสารแอนโทไซยานินในผลมัลเบอรี่ด้วยวิธีอัลตราโซนิคพบว่า ผลมัลเบอรี่มีปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดเท่ากับ 5.212 มิลลิกรัมสมมูลของ cyanidin-3-glucoside ต่อ กรัม (Li *et al.*, 2020)

จากนั้นศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี total phenol assay ในวัณสวรรค์กากลูกหม่อนพบว่า มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 131.16±0.46 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งได้มีการรายงานปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในผลไม้ตระกูลเบอรี่ พบว่ามีสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าผลไม้ชนิดอื่น (Asami *et al.*, 2003) นอกจากนี้

Pannongwha *et al.* (2013) รายงานผลการศึกษาปริมาณสารฟีนอลิกในลูกหม่อนทั้ง 3 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์คุณไพ สายพันธุ์เชียงใหม่ และสายพันธุ์บุรีรัมย์ พบว่าในลูกหม่อนทั้ง 3 สายพันธุ์มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกประมาณ 19.03 - 43.40 มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักเปียก

จากการวิเคราะห์หาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในวันสวรรคตจากลูกหม่อนพบว่า มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์เท่ากับ 214.0 ± 0.37 มิลลิกรัมสมมูลของ catechin ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leelahemarantana and Tongchitpakdee (2021) ที่ทำการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในกากลูกหม่อนแบบแห้งด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งและทำแห้งด้วยลมร้อนพบว่า ในตัวอย่างกากลูกหม่อนมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดไม่แตกต่างกัน

ในส่วนของการทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) โดยใช้วิตามินซีเป็นสารมาตรฐานพบว่า ผลิตภัณฑ์วันสวรรคตจากลูกหม่อนมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระสูงคือ มีค่า IC50 เท่ากับ 3.63 ± 0.51 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Ninwadee *et al.* (2022) รายงานว่า สารสกัดจากลูกหม่อนที่สกัดด้วยน้ำกลั่น แสดงค่าการยับยั้งเท่ากับ 1.40 ± 0.89 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และมีงานวิจัยที่ศึกษากิจกรรมฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในลูกหม่อนพบว่า ลูกหม่อนทั้ง 3 สายพันธุ์มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยแสดงผลค่า IC50 ประมาณ 5.82-5.58 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

4. สรุป

จากการทดลองการผลิตวันสวรรคตจากลูกหม่อนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์โดยแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* พบว่าเชื้อสามารถเจริญเติบโตได้ดี เมื่อเติมปริมาตรเชื้อเริ่มต้น 10% (v/v) ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ปรับ pH เท่ากับ 4.0 และผลิตเส้นใยเซลลูโลสได้หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน โดยให้ผลผลิตปริมาณเซลลูโลสเท่ากับ 19.5 ± 0.19 กรัม/100 มิลลิลิตร ซึ่งมากกว่าตัวอย่างเซลลูโลสจากน้ำมะพร้าวอย่างเดี่ยว นอกจากนี้วันสวรรคตที่ได้มีสีแดง ซึ่งเกิดจากรงควัตถุของสารประกอบแอนโทไซยานินในกากลูกหม่อน ในส่วนของการทดสอบปริมาณสารสำคัญในวันสวรรคตจากลูกหม่อนพบว่า มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและมีคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ จากข้อมูลดังกล่าวการนำกากลูกหม่อนมาแปรรูปเป็นวันสวรรคตจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการผลิตวันสวรรคตในรูปแบบแปลกใหม่ และในอนาคตจะพัฒนาผลิตภัณฑ์วันสวรรคตจากลูกหม่อนผสมกับโยเกิร์ต เพื่อตอบสนองความสนใจแก่ผู้บริโภคในยุคปัจจุบันที่เน้นการดูแลสุขภาพ อีกทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือวิจัยและศูนย์หม่อนไหมพิภลทองจังหวัดนราธิวาส ที่ให้ความอนุเคราะห์กากลูกหม่อนในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2002. **Official method of analysis of AOAC international** (17thed). Horwitz, William: Association of official analytical chemists. Inc.
- Asami, D.K., Hong, Y.J., Barrett, D.M. and Mitchell, A.E. 2003. Comparison of the total phenolic and ascorbic content of freeze-dried and air dried marionberry, strawberry and corn grown using conventional, organic and sustainable agricultural practices. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 51: 1237-1241.
- Bunyakorn, M. 2017. Production of Nata de Coco for processing of a gac drink mixed with nata de coco and dehydrated sweetened nata de coco. **KKU Science Journal** 45(3): 501-512. (in Thai)
- Chemama, T., Pumas, C., Tragoolpua, Y. and Thongwai, N. 2020. Feasibility study for D-Lactic acid production from Thai Rice by *Leuconostoc pseudomesenteroides* TC49 and D-Lactic acid purification. **Chaing Mai Journal of Science** 47(3): 403-417.
- Çoban, E.P. and Biyik, H. 2011. Effect of various carbon and nitrogen sources on cellulose synthesis by *Acetobacter iovaniensis* HBB5. **African Journal of Biotechnology** 10(27): 5346-5354.
- Dejsakungkranont, M. 2018. A study on the optimum condition for bacterial cellulose production from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose) using response surface methodology. **Khon Kaen Agriculture Journal** 46(2): 213-226. (in Thai)
- Du, H., Yang, H., Wang, X., Zhu, F., Tang, D., Cheng, J. and Liu, X. 2021. Effect of mulberry pomace on physicochemical and textural properties of stirred-type flavored yogurt. **Journal of Dairy Science** 104(12): 12403-12414.
- Ercisli, S. and Orhan, E. 2007. Chemical composition of white (*Morus alba*), red (*Morus nigra*) mulberry fruit. **Food Chemistry** 103(4): 1380-1384.

- Jagannath, A., Kalaiselven, A., Manjunatha, S. S., Raju, P. S. and Bawa, A.S. 2008. The effect of pH sucrose and ammonium sulphate concentrations on the production of bacterial cellulose (Nata De Coco) by *Acetobacter xylinum*. **World Journal of Microbiology and Biotechnology** 24(11): 2593-2599.
- Jaturapiree, A., Chaichana, E., Saowapark, T., Chuenpraphai, B. and Jaturapiree, P. 2019. Production and characterization of bacterial cellulose produced by *Acetobacter xylinum* TISTR 975 from Pineapple peel juice. **RMUTP Research Journal** 13(1): 180-192. (in Thai)
- Kanklai, J., Somwong, C.T., Rungsirivanich, P. and Thongwai, N. 2021. Screening of GABA-producing lactic acid bacteria from Thai fermented foods and probiotic potential of *Levilactobacillus brevis* F064A for GABA-fermented mulberry juice production. **Microorganisms** 9(33): 1-17.
- Khemacheewakul, J. 2017. Factors affecting production of cellulose by *Acetobacter* sp. and fermentation technology. **RMUTSB Academic Journal** 5(1): 91-103. (in Thai)
- Kim, D.K., Jeong, S.W. and Lee, C.Y. 2003. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums. **Food Chemistry** 81(3): 321-326.
- Lapuz, M.M., Gallardo, E.G. and Palo, M.A. 1967. The nata organism cultural requirement, characteristics and identity. **Philippine Journal of Science** 96(2): 91-108.
- Leelahemararana, S. and Tongchitpakdee, S. 2021. Chemical composition and radical scavenging activity of mulberry pomace, pp. 548-555. *In Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference, Agro-Industry*. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Li, Y., Tao, F., Cui, K., Song, Y., Nan, L., Cui, C., Li, Y., Yang, J., Wang, Y. and Jiang, L. 2020. Optimization of ultrasonic extraction of anthocyanin in mulberry residue by response surface methodology, pp. 559-569. *In The 3rd International Conference on Agricultural and Food Science*. IOP Conference series: earth and environmental science, Malaysia.
- Mesomya, W., Pakpeankitvatana, V., Komindr., P., Cuptapun, Y., Hengsawadi, D., Tammarate, P. and Tangkanakul, P. 2006. Effects of health food from cereal and Nata De Coco on serum lipids in human. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 28(1): 23-28.
- Ninwadee, K., Srijumpa, S., Tippayawat, P. and Kraiklang, R. 2022. Effect of crude extracts from mulberry and gac fruit aril to inhibiting of interleukin 1 β and interleukin 6 secretion. **Khong Khan University Journal for Public Health Research** 1(4): 44-55. (in Thai)
- Pannongwha, W., Jampamee, N., Sakulnamrat, K., Tumthong, P., Doangsri, K. and Mungngam, A. 2013. Comparison of important chemical composition and antioxidant activities of mulberry fruits provided from three varieties. **RMUTI Journal** 6(2): 69-82. (in Thai)
- Pawloska, A. M., Oleszek, W. and Braca, A. 2008. Qualitative analyses of flavonoids of *Morus nigra* L. and *Morus alba* L. (Moraceae) fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 56(9): 3377-3380.
- Pham, T.T. and Tran, A.T.T. 2023. Evaluation of the crystallinity of bacterial cellulose produced from pineapple waste solution by using *Acetobacter xylinum*. **Asean Engineering Journal** 13(2): 81-91.
- Phromthep, K., Katakul, S., Tokhamolthom, J., Thaisong, N.P. and Thaweeseang, N. 2018. Production of bacterial cellulose from mangosteen pericarp juice. **RMUTP Research Journal** 9(2): 169-177. (in Thai)
- Promwongpo, C., Yokhanit, W. and Khemacheewakul, J. 2018. A study of the optimal fermentation conditions for Nata de Coco production by *Acetobacter xylinum* TISTR 975 from Mango juice. **KMUTT Research and Development Journal** 40(2): 271-282. (in Thai)
- Ranghunathan, D. 2013. Production of Microbial Cellulose from the new bacterial strain isolated from Temple wash water. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences** 2(12): 275-290.
- Rattana, T. and Saengsanga, T. 2020. Antioxidant and anti-food pathogen properties in food from Mycelium culture of wild mushroom. **Thai Science and Technology Journal** 28(12): 2249-2260. (in Thai)
- Roskhrua, P. and Kitchaicharoen, M. 2020. Effect of sugar, citric acid and pectin content on quality of Mulberry fruit leather product. **RMUTT Research Journal** 14(1): 59-69. (in Thai)
- Samappito, J., Boonchalad, P. and Tabthaisong, O. 2023. The production of bacterial cellulose from sweet fermented broken black glutinous rice. **The Journal of KMUTNB** 33(2): 248-562. (in Thai)

- Son, H. J. , Heo, M. S. , Kim, Y. G. and Lee, S. J. 2001. Optimization of fermentation conditions for the production of bacterial cellulose by newly isolated *Acetobacter* sp. A9 in shaking cultures. **Biotechnology and Applied Biochemistry** 33(1): 1-5.
- Son, H.J., Kim, H.G., Kim, K.K., Kim, H.S., Kim, Y.G. and Lee, S.J. 2003. Increased production of bacterial cellulose by *Acetobacter* sp. V6 in synthetic media under shaking culture conditions. **Bioresource Technology** 86(3): 215-219.
- Talawar, S., Narayanswamy, B. and Ravindra, S.N. 2015. Optimization of fermentation conditions for Nata-de Coco production. **Journal of Pure Applied Microbiology** 9(1): 335-340.
- Zhang, L. , Zhang, C. , Wei, Z. , Huang, W. , Yan, Z. , Luo, Z. , Beta, T. and Xu, X. 2023. Effects of four drying methods on the quality, antioxidant activity and anthocyanin components of blueberry pomace. **Food Production, Processing and Nutrition** 35(5): 1-14.



Research Article

การประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้ง

Shelf Life Evaluation of Soft Dried Banana

ธัญนันท์ ฤทธิมนะ^{a*} และ อภิรดา พรพัฒน์วิชัย^b

Thanyanun Rithmanee^{a*} and Apirada Phonpanawit^b

^a ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ 50330

^a Department of Home Economics, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Mae Rim, Chiang Mai 50330, Thailand.

^b ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ 50330

^b Department of Home Economics, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Mae Rim, Chiang Mai 50330, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-04-07

Revised: 2025-01-10

Accepted: 2025-01-17

Keywords:

evaluat

soft dried banana;

shelf life;

browning reaction

Shelf life evaluation of soft dried Kluai Hom Thong was carried on a product developed for the Ban Lam Chang agricultural product processing community enterprise, Pratu Pa subdistrict, Mueang district, Lamphun province. This research aims to study the shelf life of soft dried Kluai Hom Thong product. The shelf life was studied under accelerated temperature conditions using the Q10 equation and/or kinetic reaction, which are often used to calculate the shelf life of products under accelerated temperature conditions controlled at three levels: 25, 30 and 40°C for a period of 12 weeks. The product was packed in metallite bags (Metallized Polyester, MPET) before storage and sampled to analyze physical, chemical, microbiological properties and sensory evaluation. The results found that the soft dried Kluai Hom Thong product has a shelf life at least 3.5 months at 35°C. The product's quality is acceptable to consumers and complies with the Thai community product standard for dried banana (112/2558). The information obtained from the research is suitable for the enterprise's product for consumers.

* Corresponding author.

E-mail address: thanyanun_rit@cmru.ac.th

Cite this article as:

Rithmanee, T. and Phonpanawit, A. 2025. Shelf Life Evaluation of Soft Dried Banana. *Recent Science and Technology* 17(3): 262835.

บทคัดย่อ

การประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่ม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาให้แก่วิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำช้าง ตำบลประตูป่า อำเภอเมืองลำพูน จังหวัดลำพูน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่ม ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาภายใต้สภาวะเร่ง ด้วยการใช้สมการคิวเทน (Q10) และปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์ (Kinetic reaction) เพื่อใช้ในการคำนวณอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะเร่งที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยนำมาบรรจุในถุงเมทัลไลต์ (Metallized Polyester, MPET) ก่อนเก็บรักษา และสุ่มตัวอย่างประเมินคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลชีววิทยา และการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส พบว่า ผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มมีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3.5 เดือน ซึ่งผลิตภัณฑ์มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง กล้วยอบ (112/2558) โดยข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของวิสาหกิจชุมชนให้แก่ผู้บริโภคต่อไป

คำสำคัญ: การประเมิน, กล้วยหอมทองอบนุ่ม, อายุการเก็บรักษา, ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

1. บทนำ

กล้วยหอมทอง (*Musa acuminata* AAA group 'Gros Michel') เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สามารถปลูกได้ทั่วประเทศทุกภูมิภาคของประเทศไทยและให้ผลผลิตตลอดปี อีกทั้งยังเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานกันเป็นอย่างมากทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ เนื่องจากมีเนื้อนุ่มเหนียว มีรสชาติหวาน และแฉะมีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ สามารถนำมารับประทานผลสุกได้ จึงทำให้นิยมปลูก และส่งออกไปยังต่างประเทศเป็นจำนวนมากในแต่ละปี โดยมีตลาดหลักที่ประเทศทางยุโรปและอเมริกา กล้วยหอมทองมีสารอาหารประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูง เป็นแหล่งวิตามินเอ วิตามินบี และวิตามินซี รวมถึงแคลเซียม ฟอสฟอรัส และธาตุเหล็ก (Khuenpet *et al.*, 2019) ปัจจุบันได้มีการแปรรูปกล้วยเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลายเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารไว้ เนื่องจากสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานกว่ากล้วยหอมทองสด

การอบแห้งผักและผลไม้เป็นการกำจัดน้ำออกจากผักและผลไม้จนกระทั่งลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เกิดการเน่าเสีย มีผลทำให้น้ำหนักและปริมาตรลดลง อีกทั้งยังเพิ่มความสะดวกในการบรรจุ การขนส่ง และเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น เนื่องจากผักและผลไม้ที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีความเข้มข้นของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มมากขึ้นและปริมาณน้ำลดลงเพียงพอที่จะป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Liamleam, 2013) ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการอบแห้งที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบันกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรรวมถึงกล้วยหอมทองอีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่ม

ในการจำหน่ายผลิตภัณฑ์อาหารนั้นได้มีประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 367 พ.ศ. 2557 (Ministry of public health, 2014) ที่ระบุให้ผู้ผลิตทุกรายต้องระบุวันหมดอายุผลิตภัณฑ์หรือระบุข้อความว่าควรบริโภคก่อนวันที่เท่าไร โดยทั่วไปการหาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารจะดำเนินการโดยนำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตและพร้อมจำหน่าย มาเก็บรักษาไว้ในสภาวะปกติที่แนะนำ

โดยขึ้นกับชนิดผลิตภัณฑ์ เช่น การเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง แห้งเย็น และแช่แข็ง โดยจำนวนตัวอย่างอาหารที่นำมาเก็บรักษา ในการทดลองต้องมีจำนวนมากเพียงพอตลอดอายุที่ทำการศึกษา ซึ่งอาจประมาณระยะเวลาการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงความเป็นจริง กำหนดช่วงระยะเวลาการสุ่มตัวอย่าง ติดตามการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของตัวอย่างอาหาร โดยสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลชีววิทยา และคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ค่าสี ค่าออกเตอร์แอกทิวิตี จำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด (total plate count) ยีสต์และรา (yeast and mold) *Escherichia coli* กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และรสชาติ เป็นต้น เนื่องจากธรรมชาติของอาหารมักมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน จึงต้องมีการพิจารณาดัชนีการเสื่อมเสียคุณภาพที่เกิดขึ้นในอาหารเพื่อใช้กำหนดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุผลดังกล่าว การระบุอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารจึงมีความสำคัญและจำเป็นต่อผู้ประกอบการ (Sinchaiapanit *et al.*, 2022)

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร การประเมินอายุของผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ว่าจะสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานเท่าใดโดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพ คุณลักษณะและมีความปลอดภัย การประเมินอายุการเก็บรักษาที่ถูกต้องและการผลิตอาหารให้สามารถเก็บรักษาได้ตามเวลาที่ต้องการยังเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตที่ดีด้วย (Suwan and Suwannakam, 2021) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่ม ด้วยการนำไปใช้ประโยชน์ในการจำหน่ายเชิงพาณิชย์ให้แก่วิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำช้าง ตำบลประตูป่า อำเภอเมืองลำพูน จังหวัดลำพูน ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มใช้กล้วยหอมทองซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของตำบลประตูป่า อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน มาทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำช้าง ตำบลประตูป่า อำเภอเมือง

ลำพูน จังหวัดลำพูน โดยทำการปกปิดเปลือกกล้วยหอมทอง นำไปแช่ในสารละลาย โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ (KMS) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (HB-28T, ไทย) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิในการอบแห้งลงเป็น 60 องศาเซลเซียส อบต่ออีกประมาณ 15 ชั่วโมง จนกล้วยเริ่มแห้งและมีความชื้นเป็นไปตามมาตรฐานไม่เกิน 21% (Thai Industrial Standards Institute, 2015) แล้วนำมารีดให้กล้วยแบนมีความหนาที่ประมาณ 1 เซนติเมตร บรรจุกล้วยหอมทองอบแห้งในถุงเมทัลไลต์ (Metallized Polyester, MPET) ขนาดบรรจุ 30 กรัม ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาในสภาวะเร่ง ด้วยการใส่สมการคิวเทน (Q10) และปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์ (Kinetic reaction) เพื่อใช้ในการคำนวณอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะเร่งอุณหภูมิที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยมีการสุ่มตัวอย่างออกมาทุก 2 สัปดาห์ เพื่อประเมินคุณภาพ ดังนี้

(1) ค่าสีในระบบ CIE (L^* , a^* , b^*) ด้วยเครื่อง Colorimeter (Chroma Meter: CR-400, Minolta, Japan) แล้วนำไปคำนวณหาค่าความแตกต่างของสี ΔE^* ดังสมการ

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2}$$

โดย ค่าสี ΔL^* คือ ผลต่างระหว่าง L_1^* ของสีที่ 1 และ L_2^* ของสีที่ 2

ค่าสี Δa^* คือ ผลต่างระหว่าง a_1^* ของสีที่ 1 และ a_2^* ของสีที่ 2

ค่าสี Δb^* คือ ผลต่างระหว่าง b_1^* ของสีที่ 1 และ b_2^* ของสีที่ 2

(2) ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity, a_w) ด้วยเครื่อง Water activity meter (Aqua Lab model series 3, Decagon Device Inc., USA)

(3) จำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด (Total Plate Count) (AOAC, 2019)

(4) ยีสต์และรา (Yeast and mold) (AOAC, 2019)

(5) *Bacillus cereus* ด้วยวิธี Standard Plate Count ตามมาตรฐานของ Bacteriological Analytical Manual (BAM, 2020)

(6) *Clostridium perfringens* ด้วยวิธี Standard Plate Count ตามมาตรฐานของ Bacteriological Analytical Manual (BAM, 2001)

(7) *Salmonella* spp. ด้วยวิธี Standard Plate Count ตามมาตรฐานของ Bacteriological Analytical Manual (BAM, 2020)

(8) *Staphylococcus aureus* ด้วยวิธี Standard Plate Count ตามมาตรฐานของ Bacteriological Analytical Manual (BAM, 2016)

(9) *Escherichia coli* ด้วยวิธี Standard Plate Count ตามมาตรฐานของ Bacteriological Analytical Manual (BAM, 2020)

(10) การยอมรับของผู้บริโภค (Acceptance scores) โดยใช้ 9-point hedonic scale เพื่อประเมินความชอบของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้ง ด้วยกลุ่มผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่าน

การฝึกฝนที่มีอายุ 18-50 ปี จำนวน 100 คน โดยนำผลิตภัณฑ์บรรจุถุงซีลลอคใส่ แล้วเสิร์ฟพร้อมน้ำเปล่า ซึ่งพิจารณาจากลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ความชอบโดยรวม และการยอมรับของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้ง

ค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และเคมี โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ซึ่งมีการวางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลใน CRD (Factorial Completely Randomized Design in CRD) และมีการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละการทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน

3.1.1 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

จากการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งมีค่าสีในระบบ CIE โดย L^* , a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งที่ผ่านการเก็บรักษามีค่า L^* แสดงถึงค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 15.99-34.09 ค่า a^* อยู่ในช่วง 1.55-13.01 (a^* เป็นบวก แสดงค่าเป็นสีแดง) และค่า b^* อยู่ในช่วง 2.00-26.43 (b^* เป็นบวก แสดงค่าเป็นสีเหลือง) โดยค่าสีมีการเปลี่ยนแปลงไปจากผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งเริ่มต้น ซึ่งสอดคล้องกับ ΔE^* ที่แสดงความแตกต่างของค่าสีโดยรวม (total color difference) โดยค่า ΔE^* ของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งระหว่างการศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 5.51-31.10 ซึ่งค่ามากกว่า 5 จึงอยู่ในระดับที่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีได้ชัดเจน (Mokrzycki and Tatol, 2011) ดัง Figure 1 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าสีในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งมีสาเหตุการเสื่อมเสียของอาหารทางเคมีที่เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีและการทำงานของเอนไซม์ในอาหารที่ไม่ต้องการ ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้อาหารมีลักษณะคุณภาพด้อยลง ด้วยการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในอาหาร (browning reaction) ทำให้อาหารมีสีเหลืองเข้มจนถึงสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ และมีกลิ่นรสผิดปกติ (Sinchaipanit et al., 2022) ซึ่งสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Thaiphani and Anprung (2014) ที่กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction) ทั้งในระหว่างกระบวนการแปรรูป และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เนื้อกล้วยหอมตีปั่นพาสเจอร์ไรซ์

การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งในระหว่างการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 12 สัปดาห์ และมีการสุ่มตัวอย่างตรวจค่าสีทุก 2 สัปดาห์นั้น พบว่า ค่า L^* , a^* และ b^* ในสัปดาห์ที่ 4

เป็นต้นไป มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่มีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ค่า L^* , a^* และ b^* มีความแตกต่างกันในสัปดาห์ที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ส่วนค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมีการสูมตัวอย่างตรงทุก 6 สัปดาห์ แต่ผลิตภัณฑ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับการเก็บรักษาในทุกอุณหภูมิ ($P > 0.05$)

ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มระหว่างการศึกษาอายุการเก็บรักษาอยู่ในช่วง 0.69-0.77 ตลอด

การศึกษาอายุการเก็บรักษา โดยค่าวอเตอร์แอกทิวิตีเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ และเป็นปัจจัยบ่งชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ โดยค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำกว่า 0.6 เป็นระดับที่จุลินทรีย์ทุกชนิดหยุดการเจริญและการสร้างสารพิษของจุลินทรีย์ รวมทั้งเชื้อราจะหยุดการเจริญเมื่อค่าวอเตอร์แอกทิวิตีเท่ากับหรือต่ำกว่า 0.7 (Igo and Schaffner, 2021) ดัง Table 1

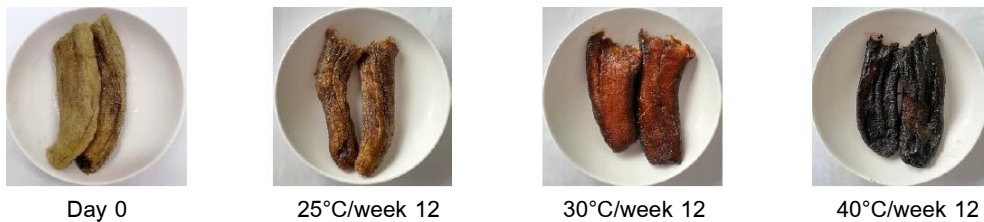


Figure 1 Soft dried banana products stored for 12 weeks

Table 1 Changes in physical and chemical qualities of soft dried banana product during storage

Qualities	Storage temperature (°C)	Storage time (Weeks)						
		0	2	4	6	8	10	12
L *	25	33.45 ^{Aa} ±0.32	34.09 ^{Aa} ±0.13	32.62 ^{Ba} ±0.02	31.70 ^{Ba} ±0.13	29.43 ^{Ca} ±0.11	30.83 ^{Ba} ±0.1	23.30 ^{Da} ±0.33
	30	33.45 ^{Aa} ±0.32	32.72 ^{Ab} ±0.69	27.30 ^{Bb} ±0.43	28.90 ^{Bb} ±0.28	26.02 ^{Cb} ±0.07	26.49 ^{Cb} ±0.35	20.72 ^{Db} ±0.49
	40	33.45 ^{Aa} ±0.32	29.19 ^{Bc} ±0.10	19.52 ^{Cc} ±0.33	16.66 ^{Dc} ±0.08	15.99 ^{Dc} ±0.34	16.37 ^{Dc} ±0.40	16.20 ^{Dc} ±0.46
a *	25	10.05 ^{Ba} ±0.20	7.38 ^{Cb} ±0.05	7.71 ^{Cb} ±0.17	8.12 ^{Cb} ±0.06	11.61 ^{Aa} ±0.01	11.51 ^{Aa} ±0.08	4.64 ^{Db} ±0.04
	30	10.05 ^{Ba} ±0.20	13.01 ^{Aa} ±0.51	9.69 ^{Ba} ±0.20	12.77 ^{Aa} ±0.07	7.34 ^{Cb} ±0.23	8.99 ^{Bcb} ±0.63	5.84 ^{Da} ±0.49
	40	10.05 ^{Ba} ±0.20	13.30 ^{Aa} ±0.07	7.36 ^{Cb} ±0.01	5.81 ^{Dc} ±0.17	5.36 ^{Dc} ±0.47	4.30 ^{Ec} ±0.22	1.55 ^{Fc} ±0.07
b *	25	26.43 ^{Aa} ±0.85	21.66 ^{Ba} ±0.07	20.43 ^{Ba} ±0.21	17.63 ^{Cb} ±0.50	19.56 ^{Bca} ±0.09	17.09 ^{Ca} ±0.10	8.72 ^{Da} ±0.15
	30	26.43 ^{Aa} ±0.85	21.68 ^{Ba} ±1.20	17.73 ^{Cb} ±0.28	18.10 ^{Cb} ±0.43	14.75 ^{Db} ±0.96	14.95 ^{Db} ±0.96	6.30 ^{Eb} ±0.69
	40	26.43 ^{Aa} ±0.85	21.87 ^{Ba} ±0.11	10.27 ^{Cc} ±0.23	7.71 ^{Dc} ±0.17	6.55 ^{Dc} ±0.20	5.33 ^{DEc} ±0.22	2.00 ^{Fc} ±0.16
ΔE*	25	-	5.51 ^{Db} ±0.07	6.50 ^{Cc} ±0.16	9.17 ^{Bb} ±0.51	8.12 ^{Bb} ±0.12	9.81 ^{Bb} ±0.11	21.12 ^{Ac} ±0.26
	30	-	5.74 ^{Db} ±0.78	10.67 ^{Cb} ±0.36	9.89 ^{Cb} ±0.28	14.12 ^{Bb} ±0.83	13.48 ^{Bb} ±0.51	24.20 ^{Ab} ±0.56
	40	-	7.04 ^{Ea} ±0.12	21.51 ^{Da} ±0.38	25.50 ^{Ca} ±0.08	26.88 ^{Ba} ±0.21	27.75 ^{Ba} ±0.15	31.10 ^{Aa} ±0.12
a _w	25	0.77 ^{Aa} ±0.015	-	-	0.74 ^{Aa} ±0.003	-	-	0.72 ^{Aa} ±0.006
	30	0.77 ^{Aa} ±0.015	-	-	0.73 ^{Aa} ±0.002	-	-	0.74 ^{Aa} ±0.002
	40	0.77 ^{Aa} ±0.015	-	-	0.69 ^{Bb} ±0.005	-	-	0.72 ^{Aa} ±0.002

Means followed by the same capital letter in the rows and small letters within the columns bearing different letters are significantly different (P≤0.05).

Table 2 Microbial population count of soft dried banana products during storage

Properties	Quality criteria	Storage temperature (°C)	Storage time (Weeks)	
			0	12
Total plate count (CFU/g)	<1.0 x 10 ⁶	25	<10	<10
		30	<10	<10
		40	<10	<10
Yeast and Mold (CFU/g)	<1.0 x 10 ³	25	<10	<10
		30	<10	<10
		40	<10	<10
<i>Clostridium perfringens</i> (CFU/g)	<1.0 x 10 ²	25	<10	-
		30	<10	-
		40	<10	-
<i>Staphylococcus aureus</i> (CFU/g)	<1.0 x 10	25	<10	-
		30	<10	-
		40	<10	-
<i>Bacillus cereus</i> (CFU/g)	<1.0 x 10 ²	25	<10	-
		30	<10	-
		40	<10	-
<i>Escherichia coli</i> (MPN/g)	<3	25	<3	-
		30	<3	-
		40	<3	-
<i>Salmonella</i> spp. (in 25 g)	Not Detected	25	Not Detected	-
		30	Not Detected	-
		40	Not Detected	-

3.1.2 จำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมดของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มระหว่างการเก็บรักษา

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางจุลชีววิทยาระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่ม ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า จำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด ยีสต์และรา *C. perfringens*, *E. coli*, *B. cereus*, *S. aureus* และ *Salmonella* spp. ของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์ เป็นไปตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐาน หลักเกณฑ์เงื่อนไข และวิธีการในการตรวจวิเคราะห์ของอาหารด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (416/2563) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง กล้วยอบ

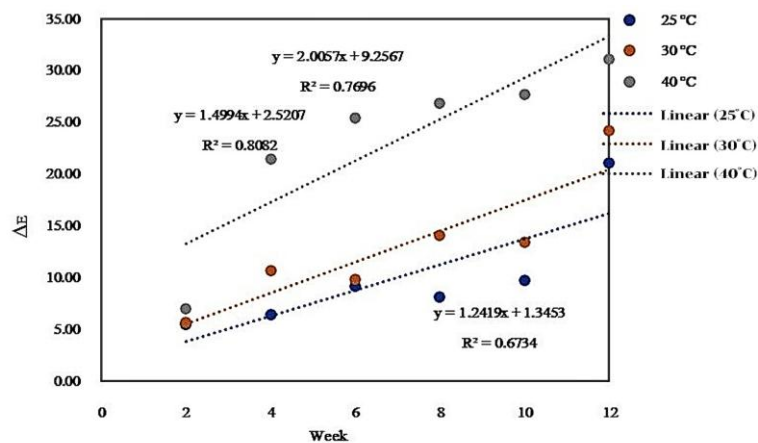
(112/2558) (Thai Industrial Standards Institute, 2015) แสดงดัง Table 2

3.2 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มระหว่างการเก็บรักษา

จากการทดสอบคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสโดยใช้ 9-point hedonic scale เพื่อประเมินให้คะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ความชอบโดยรวม และการยอมรับของผู้บริโภคโดยใช้ผู้ทดสอบทั่วไป พบว่า ผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มระหว่างการเก็บรักษามีคะแนนความชอบ ในทุกคุณลักษณะอยู่ในเกณฑ์ไม่ชอบเล็กน้อยถึงชอบมาก (4.3-9.0) และผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มระหว่างการเก็บรักษาอยู่ในช่วงร้อยละ 30-100 แสดงดัง Table 3

Table 3 Preference scores for sensory attributes of soft dried banana products during storage

Sensory attributes	Storage temperature (°C)	Storage time (Weeks)					
		2	4	6	8	10	12
Appearance	25	8.6	6.3	5.6	5.1	4.3	4.8
	30	8.9	6.3	5.9	5.0	3.9	4.3
	40	8.9	5.2	4.7	5.0	3.9	4.6
Color	25	8.1	5.1	5.3	5.1	4.4	5.1
	30	8.2	6.1	5.3	4.4	4.2	4.6
	40	8.2	4.4	5.1	4.7	4.8	4.6
Aroma	25	8.6	5.7	5.3	5.0	4.7	4.4
	30	8.7	5.7	5.2	4.3	4.4	4.3
	40	8.7	5.0	4.8	5.0	4.7	4.6
Overall acceptability	25	8.9	6.0	5.9	4.4	4.4	4.8
	30	9.0	5.7	6.3	4.7	5.1	4.3
	40	9.0	4.7	5.1	4.4	5.0	4.6
Acceptance (%)	25	100	70	60	50	40	100
	30	100	60	60	50	40	50
	40	100	40	50	30	30	30

**Figure 2** Change in ΔE^* value of soft dried banana products during storage

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มในระหว่างการศึกษ อายุการเก็บที่อุณหภูมิต่างกัน เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ค่า ΔE^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลง ค่า ΔE^* ของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2 มีค่าคงที่อัตรา (k) เท่ากับ 1.24, 1.50 และ 2.00 ต่อสัปดาห์ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้ ด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ แสดงดัง Figure 2

เมื่อนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่มไปหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ กับค่า k

สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ Arrhenius แสดงดัง Figure 3 โดยผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบนุ่ม มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy, E_a) เท่ากับ 24.54 kJ/mol โดยมีค่า Q10 เท่ากับ 1.37 เมื่อทำนายอายุการเก็บรักษาโดยใช้ค่า ΔE^* ร่วมกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ระดับคะแนนความชอบด้านความชอบ โดยรวมน้อยกว่า 4.9 (บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่) ผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งมีอายุการเก็บที่อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส เท่ากับ 4.1 และ 3.5 เดือน ตามลำดับ (Table 4)

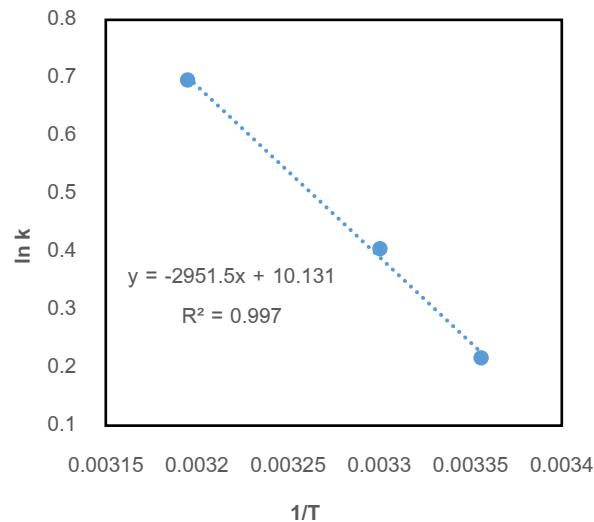


Figure 3 Relationship between $\ln k$ and $1/T$ of the change in ΔE^* value of soft dried banana products during storage

Table 4 Prediction of shelf life when stored at different temperatures

Temperature (°C)	Storage time (months)
30	4.1
35	3.5

จาก Table ที่ 4 ผลผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ได้จากการทำนายเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียสนั้นสามารถเก็บรักษาได้นาน 4.1 เดือน และ 3.5 เดือน ตามลำดับ ซึ่งการระบุวันหมดอายุของอาหารในระยะเวลาการเก็บรักษาอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหาร ณ สภาวะการเก็บรักษาที่แนะนำ โดยอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารนั้นยังคงมีลักษณะคุณภาพด้านรสชาติ สี กลิ่นรส และเนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับ รวมทั้งมีคุณค่าทางโภชนาการตามที่ได้ระบุไว้บนฉลากโภชนาการ และปลอดภัยสำหรับการบริโภค ความสำคัญการระบุวันหมดอายุของอาหาร เพื่อให้ผู้บริโภคทราบถึงอายุที่เหมาะสมในการเก็บรักษาของอาหารนั้น ๆ ภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่แนะนำ และยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ผู้บริโภคใช้ตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ (Sinhaipanit *et al.*, 2022)

4. สรุป

การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทองอบแห้งบรรจุถุงเมทัลไลต์ จากการทำนายอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ด้วยการใช้สมการคิวเทน (Q10) และปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์ (Kinetic reaction) นั้น การเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาได้นานเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3.5 เดือน โดยยังมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งผลิตภัณฑ์ควรเก็บรักษาให้พ้นแสงและความร้อน จะช่วยชะลอปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) อันเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงค่าสีได้เป็นอย่างดี

5. ข้อเสนอแนะ

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านสามช้าง ตำบลประตูป่า อำเภอเมืองลำพูน จังหวัดลำพูน ให้แก่ผู้บริโภคได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565

7. เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2019. **Official Methods of analysis of AOAC international** (21th ed). Gaithersburg. USA, AOAC International.
- BAM. 2001. **Bacteriological Analytical Manual: *Clostridium perfringens***. Food and Drug Administration, Washington DC.
- BAM. 2016. **Bacteriological Analytical Manual: *Staphylococcus aureus***. Food and Drug Administration, Washington DC.

- BAM. 2020. **Bacteriological Analytical Manual: *Bacillus cereus*, *Salmonella* spp. and *Escherichia coli*.** Food and Drug Administration, Washington DC.
- Igo, M.J. and Schaffner, D.W. 2021. Models for factors influencing pathogen survival in low water activity foods from literature data are highly significant but show large unexplained variance. **Food Microbiology** 98: 103-117.
- Khuenpet, K., Suvarnakuta, P., Polpued, R. and Jaru-arayanun, R. 2019. Development of Healthy Hom-Thong Banana Powder. **Thai Science and Technology Journal** 27(6): 1023-1037.
- Liamlearn, S. 2013. Quality of sugaring figs (Ma Nod) dehydrated by tray dryer. Master of Science (Food Science and Technology), Chiang Mai University.
- Ministry of public health. 2014. **Notification of the ministry of public health (No. 367) B.E. 2557: Labeling of prepackaged foods.** Ministry of public health, Bangkok.
- Mokrzycki, W.S. and Tatol, M. 2011. Colour difference ΔE -A survey. **Machine Graphics and Vision** 20(4): 383-411.
- Sinchaipanit, P., Peasura, N., Sangsuriyawong, A. and Disnil, S. 2022. Testing the Shelf-life of Food Products under Accelerated Temperature. **Burapha Science Journal** 27(3): 1930-1949.
- Suwan, P. and Suwannakam, M. 2021. Development and Shelf Life Evaluation of Crispy Banana- Flavored Yogurt. **Burapha Science Journal** 26(3): 1692-1706.
- Thaiphonit, S. and Anprung, P. 2014. Inhibition of Browning Reaction in Pasteurized Fragrant Banana Purée. **Journal of Food Technology, Siam University** 9(1): 39-51.
- Thai Industrial Standards Institute. 2015. **Community product standards Dried Banana No. 112/ 2558.** Available Source: [http://lib3.dss.go.th/fulltext/techno_file/CF64/CF64\(D1\).pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/techno_file/CF64/CF64(D1).pdf), December 6, 2022.

Research Article

การใช้ประโยชน์ของสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจากเศษเหลือทิ้งสับปะรด ต่อสมรรถภาพการผลิตแพะเนื้อ

The Utilization of Bromelain Enzyme Crude Extract from Pineapple Waste

วนิดา มากศิริ^{a*}, วรินทร์ มณีรัตน์^b, ปิตุนาถ หนูเสน^c, วิสูตร ไมตรีจิตต์^d, สำรวย มะลิถอด^a และ เจนจิณา แท้มเรืองอิทธิ^a
Wanida Maksiri^{a*}, Warinthorn Maneerat^b, Pitunart Noosen^c, Wisut Maitreejet^d, Samruay Malithod^a and Jenjina Tamraungit^a

^a สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000

^a Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Mueng, Phetchaburi 76000, Thailand.

^b สาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120

^b School of Agriculture and Cooperatives, Sukhothai Thammarath Open University, Pak Kret, Nonthaburi 11120, Thailand.

^c สาขาวิชาสัตวศาสตร์และการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

^c Department of Animal Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

^d ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

^d Department of Animal Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-23

Revised: 2024-07-23

Accepted: 2024-08-07

Keywords:

meat goat;

production performance;

bromelain enzyme crude extract;

pineapple waste

The objective of this research was to study the effect of supplementing meat goats with crude bromelain enzyme extract from pineapple peels and crowns, mixed with Napier Pakchong 1 grass as roughage source on their production performance and rumen ecology. A total of nine male crossbred Native × Boer goats (average 5 months) with an initial body weight of 14.71±0.89 kg were used in the study. The experimental design was a completely randomized design (CRD) with three groups and three replication goats in each group. All goats were fed with fresh cut Napier Pakchong 1 grass (average age 60 days) as the main roughage source by *ad libitum* and supplemented with 2.5% (BW) concentrate feed (not less than 14 percent protein). Group 1 goats were fed with fresh Napier Pakchong 1 grass, group 2 and 3 goats were fed crude bromelain enzyme extract from pineapple peels and crowns mixed with Napier Pakchong 1 grass at ratio of 2:0.5 and 2:1 by fresh weight. The results showed that the use of crude bromelain enzyme extract from pineapple peels and crowns mixed with Napier Pakchong 1 grass at (2:0.5 and 2:1 ratio) led to a decrease in dry matter value and an increase in moisture and protein value in grass. However, it had no effect on dry matter intake, growth rate, blood chemical composition and the concentration of ammonia-nitrogen in the rumen fluid. In conclusion, the use of crude bromelain enzyme extract from pineapple peels and crowns mixed with Napier Pakchong 1 grass as roughage source did not improve the production performance of meat goats. However, there is a tendency to increase the quality of Napier Pakchong 1 grass with protein levels. Therefore, there should be further study on the use of crude bromelain enzyme extract from pineapple peels and crowns to improve the quality of Napier Pakchong 1 grass silage before applying it in goat farming.

© 2025 Maksiri, W., Maneerat, W., Noosen, P., Maitreejet, W., Malithod, S. and Tamraungit, J. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: wanida.mak@mail.pbru.ac.th

Cite this article as:

Maksiri, W., Maneerat, W., Noosen, P., Maitreejet, W., Malithod, S. and Tamraungit, J. 2025. The Utilization of Bromelain Enzyme Crude Extract from Pineapple Waste. **Recent Science and Technology** 17(3): 261933.

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกและจุกสับประดามาผสมในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เป็นแหล่งอาหารหยาบต่อสมรรถภาพการผลิตและค่าทางนิเวศวิทยาในกระเพาะรูเมนของแพะเนื้อ ใช้แพะเนื้อเพศผู้ลูกผสมพื้นเมือง-บอร์ 50 เปอร์เซนต์ อายุเฉลี่ยประมาณ 5 เดือน จำนวน 9 ตัว และมีน้ำหนักเฉลี่ย 14.71 ± 0.89 กิโลกรัมต่อตัว วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 3 ซ้ำ ๆ ละ 1 ตัว แพะทุกกลุ่มจะได้รับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสด (อายุเฉลี่ย 60 วัน) เป็นอาหารหยาบหลักให้แบบเต็มที่ (*ad libitum*) และเสริมด้วยอาหารข้นระดับโปรตีนไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซนต์ 2.5 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักตัว กลุ่มการทดลองแบ่งดังนี้ กลุ่มที่ 1 แพะได้รับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสด กลุ่มที่ 2 และ 3 ได้รับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสด ผสมกับสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนอัตราส่วน 2 : 0.5 และ 2 : 1 โดยน้ำหนักสด ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่าการใช้สารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกและจุกสับประดามาผสมร่วมกับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในอัตราส่วน 2 : 0.5 และ 2 : 1 โดยน้ำหนักสด มีผลทำให้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีค่าวัตถุแห้งลดลง ค่าความชื้นเพิ่มมากขึ้น และระดับของโปรตีนในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 สูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการกินได้ อัตราการเจริญเติบโต ค่าองค์ประกอบทางเคมีในเลือด และค่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในของเหลวจากกระเพาะรูเมน สรุปได้ว่าการเสริมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกและจุกสับประดามาผสมในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อเป็นแหล่งอาหารหยาบ ไม่มีผลในการเพิ่มสมรรถภาพในการผลิตแพะเนื้อให้ดีขึ้น แต่มีแนวโน้มทำให้คุณภาพของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีระดับโปรตีนเพิ่มขึ้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกและจุกสับประดามาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพหญ้าเนเปียร์ปากช่องก่อนนำไปใช้ในการเลี้ยงแพะ

คำสำคัญ: แพะเนื้อ, สมรรถภาพการผลิต, สารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลน, เศษเหลือทิ้งสับประด

1. บทนำ

ปัจจุบันพื้นที่สาธารณะในการตัดกระถินสำหรับในการเลี้ยงแพะนั้นมีจำนวนลดลง เนื่องจากมีการปรับพื้นที่เป็นอาคารสิ่งปลูกสร้างที่อยู่อาศัย ถนนหนทาง โดยแต่เดิมเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะจะนิยมตัดกระถินสดมาให้เป็นอาหารหลัก เมื่อพื้นที่การตัดกระถินลดลงเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะจึงมีการทำแปลงหญ้าเพื่อเป็นแหล่งอาหารหยาบสำหรับการเลี้ยงแพะ ซึ่งหญ้าที่นิยมปลูกนั้นได้แก่ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หญ้าแพงโกล่า หญ้าหวานอิสราเอล เป็นต้น ซึ่งค่าโภชนาในหญ้าโดยเฉพาะโปรตีนจะมีค่าต่ำกว่ากระถิน และมีเยื่อใย NDF และ ADF ค่อนข้างสูง จึงส่งผลต่อการย่อยได้ของโภชนาในกระเพาะรูเมนต่ำ ทำให้ต้องมีการเสริมอาหารข้นให้กับแพะเพื่อให้แพะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดี ทั้งนี้หากสามารถปรับปรุงคุณภาพอาหารหยาบให้มีการย่อยได้สูงขึ้นก็น่าจะเป็นประโยชน์กับแพะจากการรวมรวมเอกสาร พบว่ามีเอนไซม์โบรมิเลน (bromelain) ซึ่งสกัดได้จากเปลือกหรือจุกสับประดามีคุณสมบัติช่วยย่อยโปรตีน (Sirijariyawat and Nontaloon, 2020) นอกจากนี้เอนไซม์โบรมิเลนสามารถทำงานได้ใน pH กว้าง ได้ทั้งในกระเพาะและลำไส้ และยังมีคุณสมบัติเป็นเอนไซม์ในกลุ่ม endopeptidase เช่นเดียวกับ trypsin และ pepsin (Bhattacharyya, 2008) จากข้อมูลการทดลองของ Namanee *et al.* (2011) ศึกษาการใช้เศษเหลือจากสับประดากองโรงงานอุตสาหกรรมคั้นน้ำสับประด และสับประดกระป๋อง (เปลือกด้านข้างฐานบน ฐานล่าง แกนกลางและเศษเนื้อของสับประด) เป็นแหล่งอาหารหยาบของแพะโดยทดลองให้ได้รับอาหารหยาบ ดังนี้ คือ 1) หญ้าฟิแคทมูลแห้ง 2) เศษเหลือของสับประด 3) และ 4) หญ้าฟิแคทมูลแห้งร่วมกับเศษเหลือของสับประดในอัตราส่วน 1:10 และ 1:20 โดย

น้ำหนัก ตามลำดับ ให้แพะกินอาหารหยาบอย่างเต็มที่โดยแพะทุกกลุ่มได้รับ อาหารข้น 0.5 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักตัว พบว่าการใช้เศษเหลือของสับประด หรือหญ้าฟิแคทมูลแห้งร่วมกับเศษเหลือของสับประดใน อัตราส่วน 1:10 หรือ 1:20 โดยน้ำหนักเป็นอาหารหยาบของแพะ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนาต่าง ๆ ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับหญ้าฟิแคทมูลแห้ง สอดคล้องกับ Poathong *et al.* (2010) รายงานว่าผลการใช้เปลือกสับประด ทดแทนหญ้าสดในอาหารผสมเสร็จหมักมีอัตราส่วนอาหารข้นต่ออาหารหยาบ 60:40 โดยน้ำหนักสด โดยมีแหล่งอาหารหยาบที่มีสัดส่วนเปลือกสับประดต่อหญ้านานา เท่ากับ 50:50 (TMRS I) 75:25 (TMRS II) และ 100:0 (TMRS III) หมักเป็นเวลา 21-42 วัน ผลการทดลองพบว่า แพะสามารถกินอาหารผสมเสร็จหมักได้อย่างปกติ การทดแทนเปลือกสับประดต่อหญ้าในระดับ 75:25 (TMRS II) และ 100:0 (TMRS III) มีผลทำให้แพะสามารถย่อยอาหาร และผนังเซลล์ได้ดีที่สุด จากการศึกษาของ Timkrap (2017) ผลของอาหารผสมเสร็จหมักจากเศษเหลือสับประด (FERMENTED TOTAL MIXED RATION ; FTMR) ต่อนิเวศวิทยาในกระเพาะรูเมน การย่อยได้โภชนา และสมรรถนะการเจริญเติบโตในแพะลูกผสมพบว่าแพะที่ได้รับอาหาร TMR และ FTMR มีสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโปรตีน ปริมาณไนโตรเจนที่ย่อยได้ และแอมโมเนียไนโตรเจนในกระเพาะรูเมนสูงกว่าแพะที่ได้รับกระถิน ซึ่งอาหาร TMR และ FTMR จากเปลือกสับประดและกากสับประดในอัตราส่วน 50:50 สามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกสำหรับการนำไปเลี้ยงสัตว์ได้นอกจากนี้ยังสามารถทำอาหาร FTMR เก็บไว้ใช้เลี้ยงสัตว์ในช่วงฤดูแล้งหรือช่วงขาดแคลนอาหารหยาบได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต และนิเวศวิทยาในกระเพาะรูเมน

โดยจะเห็นได้ว่าจากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการนำเศษเหลือจากสับปะรดไปใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงแพะซึ่งทำให้มีค่าการย่อยได้ดีขึ้นเป็นผลมาจากเอนไซม์โบรมิเลนที่มีอยู่ในเปลือก และจุกสับปะรด อย่างไรก็ตาม การใช้เปลือกสับปะรดสดยังมีข้อจำกัดเฉพาะพื้นที่ใกล้เคียงกับโรงงานเท่านั้น โดยผู้เลี้ยงสัตว์หรือผู้ซื้อต้องเสียค่าใช้จ่ายตามระยะทางและฤดูกาลของผลผลิต ในบางฤดูกาลจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการใช้หญ้าตามปกติด้วยซ้ำ ซึ่งขึ้นกับระยะทางในการขนส่งและฤดูกาลผลิตของเปลือกสับปะรด ทั้งนี้ในส่วนของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อและมีการปลูกหญ้าเพื่อใช้ในฟาร์มเองอาจมีความเป็นไปได้ที่จะนำสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือก และจุกสับปะรดมาใช้ผสมกับหญ้าแทนซึ่งใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยในครั้งนี้เพื่อศึกษาการนำสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือก และจุกสับปะรดมาผสมในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เป็นแหล่งอาหารหยาบต่อสมรรถภาพการผลิตและค่าทางนิเวศวิทยาในกระเพาะรูเมนของแพะ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สัตว์ทดลองและการวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design: CRD) ใช้แพะเนื้อเพศผู้ลูกผสมพื้นเมือง-บอร์ 50 เปอร์เซนต์ อายุเฉลี่ยประมาณ 5 เดือน จำนวน 9 ตัว และมีน้ำหนักเฉลี่ย 14.71 ± 0.89 กิโลกรัมต่อตัว ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 3 ตัว ๑ ละ 1 ตัว แพะทุกกลุ่มจะได้รับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสด (อายุเฉลี่ย 60 วัน) เป็นอาหารหยาบหลักให้แบบเต็มที่ (*ad libitum*) และเสริมด้วยอาหารข้นระดับโปรตีนไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซนต์ 2.5 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักตัว กลุ่มการทดลองแบ่งดังนี้ กลุ่มที่ 1 แพะได้รับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสด กลุ่มที่ 2 และ 3 ได้รับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสด ผสมกับสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนอัตราส่วน 2 : 0.5 และ 2 : 1 โดยน้ำหนักสดตามลำดับ (สัดส่วนหญ้าต่อน้ำสกัดจากเปลือกและจุกสับปะรดที่มีเอนไซม์โบรมิเลนเป็นส่วนประกอบ; Bromelain activity ในส่วนของเปลือกและจุกสับปะรดมีค่าเท่ากับ 4.44 ± 0.40 U/mg protein/min โดยจะทำการผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนกับหญ้าใหม่ทุกครั้งก่อนการให้อาหารหยาบ) มีน้ำสะอาด และแร่ธาตุก้อนให้กินตลอดเวลา โดยทำการปรับสัตว์ทดลองก่อนเข้าการทดลองเป็นเวลา 14 วัน พร้อมกับทำการถ่ายพยาธิแพะทุกตัวโดยการฉีดไอโวนแม็ก-เอฟ เมื่อเข้าสู่ระยะทดลองแพะจะได้รับอาหารตามกลุ่มการทดลอง และใช้ระยะเวลาทดลอง 90 วัน โรงเรือนทดลองเป็นโรงเรือนโปร่ง ยกพื้น หลังคามุงกระเบื้อง โดยแพะทุกตัวจะได้รับการเลี้ยงดูในคอกขังเดี่ยวขนาด 1.5×1.5 เมตร (เลขที่

ใบอนุญาตใช้สัตว์ U1-03524-2559, วันออกใบอนุญาต 28 ต.ค. 2566 วันหมดอายุ 28 ต.ค. 2570)

2.2 การเตรียมการสกัดเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกและจุกสับปะรด

การสกัดเอนไซม์โบรมิเลนแบบหยาบโดยนำตัวอย่างเปลือก และจุกสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก และเติมน้ำกลั่นเย็นอัตราส่วน 1:2 นำไปปั่นและกรองด้วยผ้าขาวบางแบ่งของเหลวที่กรองได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำแช่ตู้เย็นเพื่อนำไปผสมกับหญ้า (เก็บสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนได้ไม่เกิน 7 วัน) และส่วนที่ 2 นำของเหลวที่กรองได้ไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง 10,000 g อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 นาที เก็บส่วนใสด้านบนในตู้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นำสารสกัดไปวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์โบรมิเลน (Bromelain activity) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และ pH 7.0 ตามวิธีของ Hale *et al.* (2005)

2.3 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ทางเคมี

บันทึกปริมาณการให้อาหารด้วยการชั่งน้ำหนักอาหารก่อนให้และอาหารที่เหลือในแต่ละวัน เพื่อนำไปหาค่าปริมาณการกินได้ ทำการชั่งน้ำหนักแพะทดลองรายตัวเมื่อเริ่มต้นการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เพื่อกำหนดหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโต (Average daily gain, ADG) และประสิทธิภาพการใช้อาหาร (Feed conversion ratio, FCR) สุ่มเก็บตัวอย่างอาหารทดลองเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี Proximate analysis ตามวิธีของ AOAC (2000) เยื่อใยในรูป Neutral detergent fiber (NDF) และ Acid detergent fiber (ADF) ตามวิธีการของ Van Soest *et al.* (1991)

สุ่มเก็บตัวอย่างอาหารที่แพะกิน และมูลแพะ นำมาวิเคราะห์หาเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (Acid-insoluble Ash, AIA) เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุดิบตามวิธีการของ Schnieder and Platt (1975) โดยเก็บตัวอย่างมูลแพะในช่วงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลองเป็นเวลา 5 วันติดต่อกันนำไปแช่ตู้เย็น หลังจากเก็บครบ 5 วัน นำมูลแพะแต่ละตัวมาผสมรวมกัน แบ่งส่วนหนึ่งนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C นำมาบดผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร และนำไปวิเคราะห์หาเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (acid-insoluble ash, AIA)

สุ่มเก็บของเหลวจากกระเพาะรูเมนแพะในวันสุดท้ายของการทดลอง โดยทำการเก็บของเหลวจากกระเพาะรูเมนแพะ 2 ช่วงเวลาคือก่อนให้อาหาร (0 ชั่วโมง) และหลังการให้อาหาร (4 ชั่วโมง) โดยใช้ stomach tube ร่วมกับ vacuum pump ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างของเหลวจากกระเพาะรูเมนในปริมาตร 100 ml นำมาวัดค่า pH ทันทีจากนั้นทำการกรองผ่านผ้ากรอง 4 ชั้น และ

ทำการแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก เก็บของเหลวจากกระเพาะรูเมนปริมาตร 50 ml ในขวดพลาสติกเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์ (1M H₂SO₄) ปริมาตร 9 ml เพื่อหยุดการทำงานของจุลินทรีย์นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,400 rpm เป็นเวลา 12 นาที จากนั้นเก็บส่วนที่ใส (supernatant) นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน และกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ส่วนที่สองเก็บของเหลวจากกระเพาะรูเมนปริมาตร 1 ml ในขวดพลาสติกที่บรรจุฟอร์มาลิน (Formalin) เข้มข้น 10% ในน้ำเกลือ (0.9% NaCl) ปริมาตร 9 ml นำไปแช่ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปตรวจนับประชากรจุลินทรีย์ (แบคทีเรีย และโปรโตซัว) โดยใช้ Haemocytometer ตามวิธีการของ Galyean (1989)

เก็บตัวอย่างเลือด ที่เวลา 0 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหารในวันสุดท้ายของการทดลอง โดยเก็บจากเส้นเลือดดำใหญ่บริเวณคอ (jugular vein) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร แบ่งตัวอย่างเลือดออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เก็บในหลอดที่เคลือบโซเดียมฟลูออไรด์ เพื่อเก็บรักษาในรูปของพลาสมาสำหรับการวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส (blood glucose; BG) ส่วนที่ 2 เก็บในหลอดปกติที่ไม่ได้เคลือบสารใด ๆ เพื่อเก็บรักษาในรูปของซีรัมสำหรับการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของยูเรียไนโตรเจน (blood urea nitrogen; BUN) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสตามวิธีของ Henry *et al.* (1974) และยูเรียไนโตรเจนในเลือด (Blood glucose) ตามวิธีของ Tiffany *et al.* (1972)

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่รวบรวมได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อศึกษาความแตกต่างของแต่ละทรีตเมนต์ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์ โดยวิธี Duncan's New Multiple Range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง

ผลการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางเคมีในอาหารทดลองที่ใช้เลี้ยงแพะ ซึ่งได้แก่หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ผสมกับสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนตามสัดส่วนที่กำหนด และอาหารข้น พบว่าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เมื่อนำมา

ผสมกับสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจะส่งผลทำให้ค่าวัตถุแห้งลดลง และค่าความชื้นเพิ่มมากขึ้น ส่วนระดับของโปรตีนในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จะพบว่าเมื่อมีการผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนจะส่งผลทำให้ค่าของระดับโปรตีนสูงขึ้น ซึ่งหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสดในการทดลองนี้มีอายุการตัดเฉลี่ย 60 วัน และมีระดับโปรตีนหยาบ 7.97 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาผสมกับสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนที่อัตราส่วน 2:0.5 และ 2:1 มีระดับโปรตีนเท่ากับ 8.10 และ 10.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนค่าเยื่อใย NDF อยู่ในช่วง 69.07-70.75 เปอร์เซ็นต์ และค่า ADF อยู่ในช่วง 41.30-43.71 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1) การทดลองครั้งนี้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีคุณภาพของระดับโปรตีนที่เหมาะสมในการเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง แต่ระดับของเยื่อใยก็ยังคงอยู่ในระดับสูง พืชอาหารหยาบที่มีคุณภาพดีมีเปอร์เซ็นต์โปรตีนในระดับที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ภายในกระเพาะรูเมน ซึ่งจุลินทรีย์ในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้นต้องการโปรตีนในอาหารหยาบในปริมาณไม่ต่ำกว่า 7 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดกิจกรรมต่าง ๆ ในการย่อยเยื่อใยในอาหารหยาบของจุลินทรีย์จำพวกที่ย่อยเยื่อใย (Cellulolytic bacterial) สามารถดำเนินกิจกรรมไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Hennessy, 1980) ระดับของโปรตีนในหญ้าเนเปียร์ที่ผสมกับสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นอาจเป็นผลมาจากในสารสกัดหยาบจากเปลือก และจุลสับประตมีเอนไซม์โบรมิเลนเป็นส่วนประกอบ และมีชีวโมเลกุลประเภทโปรตีนหรือสามารถทำให้โปรตีนในใบหญ้าเนเปียร์ละลายบางส่วน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jintanawit *et al.* (2004) พบว่าน้ำคั้นจากสับประตมีนำมาใช้ย่อยกากถั่วเหลือง ซึ่งกากถั่วเหลืองที่แช่น้ำสับประตมีจะมีลักษณะพองตัว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการย่อยโปรตีนขึ้น เมื่อใช้น้ำสับประตมีเพิ่มขึ้นทำให้โปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Somsuk (1987) ได้ศึกษาการทำงานของเอนไซม์โบรมิเลนผงที่สกัดจากลำต้นสับประตมีเมื่อใช้ย่อยกากถั่วเหลืองพบว่ามีปริมาณกรดอะมิโนไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 1.55 กรัมต่อลิตร จากงานวิจัยครั้งนี้ผลการวิเคราะห์ค่ากิจกรรมของเอนไซม์โบรมิเลน (Bromelain activity) ในส่วนของเปลือกและจุลสับประตมีค่าเท่ากับ 4.44 ± 0.40 U/mg protein/min (U = Units คือ การทำงานของเอนไซม์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายเคซีนให้ได้สารใหม่ ซึ่งอยู่ในอัตราเท่ากับไทโรซีน 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมโปรตีน ในเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ที่ pH เท่ากับ 7

Table 1 Chemical composition of Napier Pakchong 1 grass and concentrate feed

Chemical composition (%)	Napier	Napier ¹ : Crude extract 0.5	Napier ² : Crude extract 1	Concentrate feed
DM ³	35.13±4.42	22.47±1.81	20.82±3.83	96.36±0.19
Moisture	64.87±4.42	77.53±1.81	79.18±3.83	3.64±0.19
Ash	10.60±0.57	10.82±0.64	11.41±0.17	14.06±0.08
EE ⁴	2.32±0.26	1.56±0.06	1.56±0.08	3.07±0.40
CP ⁵	7.97±1.13	8.10±0.83	10.60±2.24	17.93±0.40
NDF ⁶	69.07±0.28	69.26±0.34	70.75±0.57	-
ADF ⁷	41.30±1.45	43.71±0.30	43.42±0.97	-

¹ Napier Pakchong 1 grass 2 : bromelain enzyme crude extract 0.5, ² Napier Pakchong 1 grass 2 : bromelain enzyme crude extract 1,

³ Dry matter, ⁴ Ether extract, ⁵ Crude protein ⁶ Neutral detergent fiber ⁷ Acid detergent fiber

3.2 ปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบ และค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุดิบ

จากผลการวิจัยพบว่า แปะมีปริมาณการกินได้ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตัดสดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 2 โดยแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลองได้รับการเสริมอาหารชั้นในปริมาณที่เท่ากัน ในระดับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ซึ่งแพะมีปริมาณการกินได้ของอาหารชั้นเฉลี่ย 423.98 กรัม/ตัว/วัน คิดเป็นปริมาณการกินได้ของอาหารชั้นต่อน้ำหนักตัว มีค่าเท่ากับ 2.31-2.35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาปริมาณการกินได้วัตถุดิบทั้งหมดของแพะในกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 962.64, 868.89 และ 7.25.25 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จะมีแนวโน้มทำให้แพะมีปริมาณการกินอาหารรวมได้ลดลง แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อพิจารณาปริมาณการกินได้น้ำหนักตัวของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนในระดับอัตราส่วน 2:1 จะส่งผลทำให้แพะในกลุ่มที่ 3 มีปริมาณการกินได้น้ำหนักตัวของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และปริมาณการกินได้รวมน้อยที่สุด ($P<0.05$) แต่ทั้งนี้ปริมาณโปรตีนรวมที่ได้รับของแพะในกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 118.95, 112.06 และ 110.82 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการใช้อาหารของแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลองพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.13-6.07 จากการวิจัยครั้งนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนกับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จะทำให้มีความชื้นเพิ่มสูงขึ้นและมีความเป็นกรดต่ำลงจึงอาจส่งผลต่อการกินได้ของแพะลดลง เนื่องจากรูปแบบการผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนเป็นของเหลว และมีค่า pH เฉลี่ย 4.07 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุดิบของอาหารที่ใช้เลี้ยงแพะเนื้อ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุดิบ

แห้งของแพะในกลุ่มที่ 1 มีค่าสูงกว่าแพะในกลุ่มที่ 2 และ 3 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) อาจเป็นผลมาจากสภาวะความเป็นกรดต่างในกระเพาะรูเมนลดลงจึงไม่เหมาะสมกับการทำของจุลินทรีย์พวกย่อยเยื่อใยที่ต้องการสภาวะความเป็นกรดต่างสูงกว่า 6 (Cheva-Isarakul, 1998)

3.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัว และอัตราการเจริญเติบโต

แพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีน้ำหนักตัวเริ่มต้นเท่ากับ 14.41, 14.93 และ 14.79 กิโลกรัม ตามลำดับ และมีน้ำหนักตัวสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 22.43, 21.51 และ 21.68 กิโลกรัม ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวมีค่าเท่ากับ 8.01, 6.58 และ 6.89 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีอัตราการเจริญเติบโต เท่ากับ 89.04, 73.11 และ 76.59 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ซึ่งพบว่า การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัว และอัตราการเจริญเติบโตไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว และอัตราการเจริญเติบโตของแพะเนื้อ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการกินอาหารได้รวมของแพะทั้งกลุ่มที่ไม่มีและมีการผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนในหญ้าไม่แตกต่างกันทางสถิติ รวมถึงได้รับการเสริมอาหารชั้น 2.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว จึงส่งผลทำให้แพะได้รับโภชนาที่เพียงพอในการเจริญเติบโต ถึงแม้จะพบว่าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่มีการผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้มีค่าระดับโปรตีนเพิ่มขึ้นนั้น แต่ปริมาณการกินหญ้าได้ของแพะในกลุ่มที่เสริมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนก็ไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นจึงทำให้ระดับโปรตีนที่ได้รับต่อวันไม่แตกต่างกันจึงไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแพะ

Table 2 Dry matter intake (DMI) protein intake and DM digestibility of meat goat fed with different feeding groups

Item	Group			P-value
	group 1	group 2	group 3	
Dry matter intake (g/day)				
Napier Pakchong 1	538.66±137.43	444.91±97.09	328.26±93.14	0.1445
Concentrate feed	423.98±0.00	423.98±0.00	423.98±0.00	-
Total	962.64±137.43	868.89±97.09	725.25±93.14	0.1445
Dry matter intake (%BW)				
Napier Pakchong 1	2.94±0.55 ^a	2.42±0.49 ^{ab}	1.78±0.42 ^b	0.0497
Concentrate feed	2.35±0.20	2.31±0.08	2.32±0.12	-
Total	5.29±0.39 ^a	4.73±0.47 ^{ab}	4.09±0.30 ^b	0.0267
Crude protein intake (g/day)				
Napier Pakchong 1	42.93±10.95	36.04±7.86	34.80±9.87	0.5697
Concentrate feed	76.02±0.00	76.02±0.00	76.02±0.00	-
Total	118.95±10.95	112.06±7.86	110.82±9.87	0.5697
Feed conversion ratio				
Napier Pakchong 1	6.04±1.44	6.24±1.88	4.31±0.11	0.2414
Concentrate feed	4.78±0.36	5.89±0.94	5.95±2.03	0.5082
Total	5.41±0.73	6.07±1.35	5.13±1.06	0.5755
Digestible dry matter (%)	52.05±0.50 ^a	46.44±2.66 ^b	48.67±2.36 ^{ab}	0.0433

^{a,b} Mean values within a row indicated with different superscripts are significantly different (P < 0.05.)

Table 3 Body weight and average daily weight gain of meat goat fed with different feeding groups

Item	Group			P-value
	group 1	group 2	group 3	
Initial weight (kg/head)	14.41±1.37	14.93±0.93	14.79±0.45	0.9096
Final weight (kg/head)	22.43±1.78	21.51±1.41	21.68±1.92	0.7938
Body weight gain (kg/head)	8.01±0.62	6.58±0.99	6.89±2.11	0.4623
Average daily weight gain (g/head/day)	89.04±6.87	73.11±10.98	76.59±23.43	0.4643

Table 4 Blood urea nitrogen and blood glucose of meat goat fed with different feeding groups

Item (mg/dl)	Group			P-value
	group 1	group 2	group 3	
Blood urea nitrogen				
0 h-pre feeding	9.83±0.75	8.47±0.78	11.47±2.97	0.2113
4 h-post feeding	12.00±0.82	9.47±1.23	13.83±2.91	0.0771
Blood glucose				
0 h-pre feeding	48.00±4.36	45.67±2.08	42.33±5.86	0.3478
4 h-post feeding	52.33±1.15	55.00±4.58	52.33±8.02	0.7893

3.4 องค์ประกอบทางเคมีในเลือด

ปริมาณยูเรียไนโตรเจนในกระแสเลือดที่ 0 ชั่วโมง ก่อนกินอาหารของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 9.83, 8.47 และ 11.47 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร ตามลำดับ และหลังจากแพะทดลองกินอาหารไปแล้ว 4 ชั่วโมง พบว่าปริมาณยูเรียไนโตรเจนในกระแสเลือดของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 12.00, 9.47, และ 13.83 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้ระดับปริมาณยูเรียไนโตรเจนของแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลองก็ยังมีค่าอยู่ในช่วงปกติ คือ มีค่าระหว่าง 6.30-25.5 มิลลิกรัมเปอร์เซ็นต์ (Wanapat, 1990) สอดคล้องกับการรายงานของ Preston and Leng (1987) รายงานว่าระดับแอมโมเนียไนโตรเจน 5-25 มิลลิกรัม/เดซิลิตร เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมน ค่าของยูเรียไนโตรเจนมีสหสัมพันธ์สูง (highly correlation) กับปริมาณโปรตีนที่กินได้ และสัมพันธ์กับระดับการผลิตแอมโมเนียในกระเพาะรูเมน ส่วนปริมาณกลูโคสในกระแสเลือดที่ 0 ชั่วโมง ก่อนกินอาหารของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 48.00, 45.67, และ 42.33 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ตามลำดับ และหลังจากแพะทดลองกินอาหารไปแล้ว 4 ชั่วโมง พบว่าปริมาณกลูโคสในกระแสเลือดของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 52.33, 55.00 และ 52.33 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งปริมาณกลูโคสในเลือดแพะบ่งบอกสภาวะสมดุลของพลังงานในร่างกายควรอยู่ในช่วง 50-75 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร (Kaneko, 1980) ทั้งนี้ระดับปริมาณกลูโคสในกระแสเลือดของแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลองหลังกินอาหารก็ยังมีค่าอยู่ในช่วงปกติ คือ มีค่าระหว่าง 52.33-55.00 มิลลิกรัมเปอร์เซ็นต์ แต่จากการวิจัยนี้จะให้เห็นได้ว่า แพะทดลองใช้ประโยชน์ของพลังงานจากอาหารได้ค่อนข้างต่ำแสดงได้จากผลของปริมาณกลูโคสในเลือดที่เกินระดับเกณฑ์ปกติเพียงเล็กน้อย ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความสมดุลของการใช้โปรตีนและพลังงานลดลง เนื่องจากผลการวิจัยครั้งนี้ พบว่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยได้คือ กรดอะซิติกในแต่ละกลุ่มทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับสูงกว่ากรดโพรพิโอนิก (สัดส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกมีค่าสูง) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการนำกรด

ไขมันระเหยได้ไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้เพราะว่ากรดโพรพิโอนิกมีประสิทธิภาพในการให้พลังงานสูงที่สุดในขณะที่กรดอะซิติกมีประสิทธิภาพต่ำกว่า (Cheva-Isarakul, 1998)

3.5 นิเวศวิทยาในกระเพาะรูเมน

ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในของเหลวจากกระเพาะรูเมนในแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลอง (แสดงดังตารางที่ 5) ก่อนให้อาหาร มีค่าอยู่ระหว่าง 7.62-9.53 มิลลิกรัม/เดซิลิตร และที่เวลา 4 ชั่วโมงหลังให้อาหารมีค่าอยู่ในช่วง 11.43-18.57 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร ซึ่งความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ การวิจัยครั้งนี้จะเห็นได้ว่า สารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนที่ผสมกับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ไม่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไม่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายได้ (Solubility) ของโปรตีน และพบว่ายู่ในช่วงปกติที่สอดคล้องกับ Preston and Leng (1987) รายงานว่าระดับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในของเหลวจากกระเพาะรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้องในเขตร้อนอยู่ในช่วง 5-20 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้เต็มที่ และถ้าระดับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 10-30 มิลลิกรัม/เดซิลิตร จะเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และการสังเคราะห์จุลินทรีย์โปรตีน (Ferguson *et al.*, 1993) นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมักนั้นมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของประชากรจุลินทรีย์ ตลอดจนปริมาณการกินได้ สัมประสิทธิ์การย่อยได้ สัมประสิทธิ์การสังเคราะห์โปรตีนจุลินทรีย์ และยังก่อให้เกิดความสมดุลระหว่างพลังงานและโปรตีนด้วย (Srisaikham, 2009)

จำนวนประชากรจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนของแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลอง แสดงในตารางที่ 5 พบว่า แพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลองมีจำนวนแบคทีเรีย และโปรโตซัวในกระเพาะรูเมนที่ 0 ชั่วโมง ก่อนให้อาหาร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $2.11-2.12 \times 10^7$ และ $1.20-1.25 \times 10^4$ เซลล์/มิลลิลิตร ตามลำดับ จำนวนแบคทีเรียในกระเพาะรูเมนที่ 4 ชั่วโมง หลังกินอาหาร พบว่าแพะกลุ่มที่ 2 ซึ่งกินหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

Table 5 Ammonia nitrogen concentration and microbial populations in rumen fluid of meat goat fed with different feeding groups

Item	Group			P-value
	group 1	group 2	group 3	
NH ₃ -N (mg/dl)				
0 h-pre feeding	9.53±3.30	8.57±2.86	7.62±1.65	0.7014
4 h-post feeding	18.57±2.01	14.29±4.04	11.43±4.04	0.2679
Total bacteria (x 10 ⁷ cell/ml)				
0 h-pre feeding	2.12±0.05	2.12±0.08	2.11±0.08	0.8639
4 h-post feeding	1.89±0.08 ^b	2.09±0.10 ^a	1.86±0.08 ^b	0.0008
Total protozoa (x 10 ⁴ cell/ml)				
0 h-pre feeding	1.20±0.10	1.20±0.06	1.25±0.10	0.4211
4 h-post feeding	1.14±0.12 ^b	1.15±0.14 ^b	1.36±0.16 ^a	0.0275

^{a,b} Mean values within a row indicated with different superscripts are significantly different (P < 0.05).

ผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลน 0.5 ส่วน มีจำนวนแบคทีเรียสูงสุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.09×10^7 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) อาจเป็นผลมาจากเมื่อพิจารณาจากค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมนมีค่าต่ำ แบคทีเรียในกลุ่มที่ผลิตกรดแลกเตออาจเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมนต่ำกว่า 6 จะมีแบคทีเรียที่ผลิตแลกเตอ เช่น *S. Bovis* และ *Lactobacilli Sp.* มีจำนวนมากกว่ากลุ่มที่ใช้ประโยชน์จากแลกเตอ (Jouany, 2006) ส่วนจำนวนโปรโตซัวในกระเพาะรูเมนที่ 4 ชั่วโมง หลังกินอาหาร พบว่าแพะกลุ่มที่ 3 ซึ่งกินหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลน 1 ส่วน มีจำนวนโปรโตซัวสูงกว่าในแพะกลุ่มที่ 1 และ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.36×10^4 เซลล์/มิลลิลิตร ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมนมีค่า 6.13 อาจส่งผลทำให้โปรโตซัวมีการใช้ประโยชน์จากอาหารดียิ่งขึ้น

ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดไขมันระเหยได้ในกระเพาะรูเมนของแพะ แสดงในตารางที่ 6 จากการวิจัยพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ 0 ชั่วโมง ก่อนให้อาหาร ของแพะในกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 5.90, 5.37 และ 5.38 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ 4 ชั่วโมง หลังกินอาหาร พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.98-6.13 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) แต่จะเห็นได้ว่าหลังกินอาหารชั่วโมงที่ 4 เป็นช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการหมักสูงสุดค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมนลดต่ำลงในกลุ่มที่ 2 อาจเป็นผลมาจากการผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ซึ่งมีความเป็นกรดอยู่แล้ว ส่วนในกลุ่มที่ 3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่ลดลงอาจเป็นเพราะปริมาณการกินหญ้าต่อน้ำหนักตัวน้อยกว่ากลุ่มที่ 2 การผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลนอาจส่งผลทำให้ค่ากรด-ด่างในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ลดลง เมื่อกินหญ้าจึงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมน

ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในกระเพาะรูเมนควรอยู่ในช่วง 6.5-7.0 (Wanapat, 1990)

ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ทั้งหมดได้แก่ กรดอะซิติก, กรดโพรพิโอนิก, กรดบิวทีริก, กรดไอโซบิวทีริก, กรดไอโซวาเลริก และกรดวาเลริก ซึ่งกรดไอโซบิวทีริก, กรดไอโซวาเลริก และกรดวาเลริกมีปริมาณน้อยมาก ทั้งนี้กรดอะซิติก, กรดโพรพิโอนิก, กรดบิวทีริก จะมีผลต่อการใช้ประโยชน์เป็นพลังงานให้กับสัตว์จึงแสดงสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันระเหยได้ทั้งหมดในตารางที่ 6 ในการวิจัยครั้งนี้ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ทั้งหมด ที่ 0 และ 4 ชั่วโมง หลังกินอาหารมีค่าเฉลี่ย 11.69-15.19 มิลลิโมล/เดซิลิตร และ 25.25-25.67 มิลลิโมล/เดซิลิตร ตามลำดับ ในส่วนกรดไอโซบิวทีริก, กรดไอโซวาเลริก และกรดวาเลริกในของเหลวในกระเพาะรูเมนที่ 0 และ 4 ชั่วโมงหลังกินอาหารมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.36-0.82 มิลลิโมล/เดซิลิตร และ 0.49-0.80 มิลลิโมล/เดซิลิตร ตามลำดับ

ปริมาณกรดอะซิติกในกระเพาะรูเมน ที่ 0 ชั่วโมง ก่อนกินอาหารของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 75.77, 77.77 และ 81.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยแพะกลุ่มที่ 3 ซึ่งกินหญ้าเนเปียร์ผสมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรมิเลน 1 ส่วน มีปริมาณกรดอะซิติกสูงกว่า แพะกลุ่มที่ 2 และ 3 เมื่อพิจารณาหลังจากแพะกินอาหารไปแล้ว 4 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณกรดอะซิติกของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 73.57, 74.50 และ 72.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งแพะทั้ง 3 กลุ่มการทดลองกินหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เป็นแหล่งอาหารหยาบเหมือนกัน จึงส่งผลให้ปริมาณกรดอะซิติกในกระเพาะรูเมนมีค่าใกล้เคียงกัน

ปริมาณกรดโพรพิโอนิกในกระเพาะรูเมน ที่ 0 ชั่วโมง ก่อนกินอาหารของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 11.51, 11.46 และ 8.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยแพะกลุ่มที่ 1 และ 2 มีปริมาณกรดโพรพิโอนิกสูงกว่า แพะกลุ่มที่ 3 อาจเป็นผลมาจากการเลือก

กินอาหารขึ้นก่อนแล้วจึงมากินหญ้าตามหลังทำให้มีการย่อยเยื่อใย เกิดกรดอะซิติกขึ้นมากกว่า ซึ่งความเข้มข้นของกรดโพรพิโอนิกจะถูกสร้างจากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะรูเมน และมีค่าเฉลี่ย 25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณกรดไขมันที่ระเหยได้ทั้งหมด และหลังจากแพะกินอาหารไปแล้ว 4 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณกรดโพรพิโอนิกของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 14.77, 16.65 และ 16.28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ปริมาณกรดบิวทีริกในกระเพาะรูเมน ที่ 0 ชั่วโมง ก่อนกินอาหารของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 6.08-7.48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และหลังจากแพะกินอาหารไปแล้ว 4 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณกรดบิวทีริกของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 9.28, 6.98 และ 7.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งกรดอะซิติกและบิวทีริกใน

กระเพาะรูเมนจะมีปริมาณสูงขึ้นหากสัตว์ได้รับอาหารที่มีเยื่อใยสูง Wanapat (1990) รายงานว่า กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริกในกระเพาะรูเมนที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 65-70, 20-22 และ 10-15 เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันที่ระเหยได้ทั้งหมด

สัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกในกระเพาะรูเมนที่ 0 ชั่วโมง ก่อนกินอาหารของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 6.59, 6.81 และ 9.26 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งจะเห็นได้ว่าแพะในกลุ่มที่ 3 มีสัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกสูงกว่าแพะกลุ่มที่ 1 และ 2 โดย Wanapat (1990) รายงานว่าสัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกควรอยู่ในช่วง 1-4 และหลังจากแพะกินอาหารไปแล้ว 4 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกของแพะกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 5.19, 4.55 และ 4.49 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$)

Table 6 Rumen pH, acetic acid, propionic acid and butyric acid concentration in rumen fluid of meat goat fed with different feeding groups

Item	Group			P-value
	group 1	group 2	group 3	
Ruminal (pH)				
0 h-pre feeding	5.90±0.13 ^a	5.37±0.14 ^b	5.38±0.16 ^b	0.0067
4 h-post feeding	5.60±0.26	4.98±0.24	6.13±0.85	0.0983
Acetate (%)				
0 h-pre feeding	75.77±2.42 ^b	77.77±1.39 ^b	81.96±1.03 ^a	0.0120
4 h-post feeding	73.51±5.07	74.50±1.32	72.85±3.10	0.8509
Propionate (%)				
0 h-pre feeding	11.51±0.33 ^a	11.46±0.69 ^a	8.88±0.50 ^b	0.0012
4 h-post feeding	14.77±3.12	16.65±2.51	16.28±1.24	0.6260
Butyrate (%)				
0 h-pre feeding	7.30±1.13	7.48±0.20	6.08±0.20	0.0850
4 h-post feeding	9.28±3.53	6.98±1.00	7.65±1.82	0.5099
Acetate : Propionate				
0 h-pre feeding	6.59±0.36 ^b	6.81±0.50 ^b	9.26±0.62 ^a	0.0011
4 h-post feeding	5.19±1.52	4.55±0.70	4.49±0.33	0.6441

^{a,b} Mean values within a row indicated with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$)

4. สรุป

การนำสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรินจากเปลือก และจุลชีพประดมาผสมในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในอัตราส่วน 2:0.5 และ 2:1 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลในการเพิ่มสมรรถภาพการผลิต และกรดอะซิติก โพรพิโอนิก และบิวทีริกในกระเพาะรูเมนของแพะ แต่มีแนวโน้มทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมนลดลง และมีผลทำให้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีค่าวัตถุแห้งลดลง ค่าความชื้นเพิ่มมากขึ้น และระดับของโปรตีนในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 สูงขึ้น จึงไม่ควรนำสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรินมาผสมกับหญ้าให้แพะกินแต่ควรนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพในการทำหญ้าหมักแทนก่อนนำมาใช้ในการเลี้ยงแพะ

5. ข้อเสนอแนะ

จากการเสริมสารสกัดหยาบเอนไซม์โบรินจากเปลือก และจุลชีพประดมาผสมในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในอัตราส่วน 2:0.5 และ 2:1 โดยน้ำหนัก ทำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ในอาหารหยาบลดลง และส่งผลต่อค่า pH ในกระเพาะรูเมน ดังนั้นควรมีการศึกษากการใช้สารสกัดหยาบเอนไซม์โบรินจากเปลือก และจุลชีพประดมาเป็นสารเสริมในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 แล้วทำเป็นหญ้าหมัก ซึ่งอาจจะช่วยทำให้ค่าโภชนะของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมักมีคุณภาพดีขึ้น หรือนำมาเป็นสารเสริมในการทำอาหารผสมเสร็จ และนำไปทดสอบในการเลี้ยงแพะต่อสมรรถภาพการผลิตต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน Fundamental Fund (FF) ประเภท Basic Research Fund ประจำปีงบประมาณ 2566 ขอขอบคุณ สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์โรงเรือนแพะวิจัย และห้องวิเคราะห์อาหารสัตว์ และต้องขอขอบคุณฟาร์มพลอย เพชร มุก ที่ให้ความอนุเคราะห์แพะเนื้อสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. **Official Method of Analysis of AOAC International** (17th ed). The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.
- Bhattacharyya, B.K. 2008. Bromelain : An overview. **Indian Journal of Natural Products and Resources** 7(4): 359-363.

- Cheva- Isarakul, B. 1998. **Animal nutrition** (6th ed). Thanaban Publication, Chiang Mai. (in Thai)
- Ferguson, D.A., Li, C., Patel, N.R., Mayberry, W.R., Chi, D.S. and Thomas, E. 1993. Isolation of helicobacter pylori from saliva. **Journal of Clinical Microbiology** 31(10): 2802-2804.
- Galyean, M. 1989. **Procedure in Animal Nutrition Research**. New Mexico: Department of Animal and Life Science, Mexico State University.
- Hale, L. P., Greer P.K., Trinh C.T. and James C.L. 2005. Proteinase activity and stability of natural bromelain preparations. **International Immunopharmacology** 5(4): 783-793.
- Hennessy, D.W. 1980. Protein nutrition of ruminants in the tropical areas of Australia. **Tropical Grasslands** 14: 260-265.
- Henry, R.J., Donald, C.C. and James, W.W. 1974. **Clinical Chemistry: Principle and Technique** (2nd ed). Harper and Row Inc., Vergenia, USA.
- Jintanawit, W., Kanto, U., Juttupornpong, S. and Harinasut, P. 2004. Study on chemical and bromelain activity analysis of pineapple juice and utilization for protein digestion in soybean meal, pp. 26- 32. *In* **Proceedings of 42nd Kasetsart University Annual Conference: Animals, Veterinary Medicine**. Bangkok. (in Thai)
- Jouany, J.P. 2006. Optimizing rumen functions in the close-up transition period and early lactation to drive dry matter intake and energy balance in cows. **Animal Reproduction Science** 96: 250-264.
- Kanebo, J.J. 1980. Appendixes. pp. 785-797. *In* Kanebo, J.J. **Clinical Biochemistry of Domestic Animals**. Academic Press, New York.
- Namanee, P., Kuprasert, S. and Ngampongsai, W. 2011. Utilization of pineapple waste as roughage source in goats. **Khon kaen Agricultural Journal** 39: 399-412. (in Thai)
- Poathong, S., Sangsai, A., Chobtang, J. and Kaskomalas, S. 2010. **Research Report on Feed intake and Nutrient Digestibility of Total Mixed Ration Silage Comprised Different Levels of Pineapple Peels in Goat**. Department of livestock development, Ministry of agriculture and cooperatives, Bangkok.

- Preston, T. R. and Leng, R. A. 1987. **Matching Ruminant Production Systems with Available Resources in the Tropics and Sub-tropics.** Penambull Book Publisher, Australia.
- Schneider, B. H. and Flatt, W. P. 1975. **The Evaluation of Feeding Through Digestibility Experiments.** University of Georgia Press, Athens.
- Sirijariyawat, A. and Nontaloon, K. 2020. Proteolytic activity of crude extract from different parts of pineapple and papaya. **Khon kaen Agricultural Journal** 48(Suppl.1): 1087-1092. (in Thai)
- Somsuk, C. 1987. Increasing the enzyme activity of bromelain powder from pineapple stems. Master Thesis of Science, Kasetsart University. (in Thai)
- Srisaikhram, S. 2009. Effects of neem (*Azadirachta indica* a. juss. var. *siamensis* valetton) foliage utilization in meat goat diets on rumen fermentation and productive performances. Master Thesis of Science in Animal Production Technology, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Tiffany, T. O. , Jansen, J. M. , Burtis, C. A. , Overton, J. B. and Scott, C. D. 1972. Enzymatic kinetic rate and end point analyses of substrate by the use of a GeMSAEC fast analyser. **Clinical Chemistry** 18: 829-840.
- Timklip, C. 2017. Effect of fermented total mixed ration (FTMR) from pineapple wastes on rumen ecology, nutrients digestibility and growth performance in crossbred goat. Master Thesis of Science (Animal Science), Silpakorn University. (in Thai)
- Van Soest, P. J. , Robertson, J. B. , and Lewis, B. A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non starch polysaccharides in relation to animal production. **Journal of Dairy Science** 74: 3583-3597.
- Wanapat, M. 1990. **Ruminant nutrition.** Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University Press, Khon Kaen. (in Thai)



Research Article

ผลของเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามกับโซเดียมไนเตรทในการลดการผลิตแก๊สมีเทน
ในกระบวนการหมักในกระเพาะรูเมน : การศึกษาในหลอดทดลอง

Effect of Tamarind Seed Husk and Sodium Nitrate for Reducing Methane Production
in Rumen Fermentation: *In vitro* studies

ธัชเมธ เตียรวิชัยกุล มณิสร์ ศรีสุภา โสภิตา บัวบาน อัญชลี คงประดิษฐ์ และ สุริยะ สะวานนท์ *

Tuchchameth Tianwithkul, Manison Srisupha, Sopita Buaban, Anchalee Khongpradit and Suriya Sawanon *

ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Animal Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen,

Nakhon Pathom 73140, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-05-23

Revised: 2024-09-18

Accepted: 2024-11-08

Keywords:

tamarind seed husk;

nitrate;

rumen fermentation;

methane

The global warming crisis is partially caused by ruminants through greenhouse gas production when they ferment their feed. The objective of this study was to evaluate tamarind seed husk (TSH) and sodium nitrate (SN) as alternative raw materials in a concentrate diet to reduce methane production in rumen fermentation. The experimental I, concentrate diets were formulated in four types, including no TSH in the diet (0TSH), and diet including 7.5%, 15.0% and 22.5% of TSH (7.5TSH, 15.0TSH and 22.5TSH), respectively. In experimental II, diet types included 10% of TSH (10TSH), 0% of TSH with 1% SN (0TSH&1SN) and 10% of TSH with 1% SN (10TSH&1SN). These concentrates were added in Hungate tubes with rice straw in a 50:50 ratio. Rumen fluid was collected from two rumen-fistulated crossbred Brahman steers and mixed with artificial saliva in a 1:1 ratio. Inoculums were incubated at 39 °C for 24 hours under anaerobic conditions. Gas and fluid were analyzed after incubation. The results of experiment I showed that pH was not different among the diets. However, ammonia nitrogen, microbial protein (MCP), volatile fatty acids, acetate/propionate ratio, dry matter digestibility, total gas, methane, and carbon dioxide production were significantly decreased as the level of tamarind seed husk increased. The results of experiment II found that 10TSH&1SN group had the lowest NH₃-N, MCP, total gas, methane and carbon dioxide production. The pH, total SCFA, and A/P ratio did not differ among all diets. In conclusion, TSH could be used in the concentrate diet up to 15% which reducing methane production ability. Using 10% TSH in the concentrate with 1% SN could reduce methane production better than using 10% TSH or 1% SN alone.

* Corresponding author.

E-mail address: agrsusa@ku.ac.th

Cite this article as:

Tianwithkul, T., Srisupha, M., Buaban, S., Khongpradit, A. and Sawanon, S. 2025. Effect of Tamarind Seed Husk and Sodium Nitrate for Reducing Methane Production in Rumen Fermentation: *In vitro* studies. **Recent Science and Technology** 17(3): 263451.

บทคัดย่อ

วิกฤติการณ์ภาวะโลกร้อนในปัจจุบันส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากแก๊สเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการหมักอาหารในกระเพาะรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้อง การทดลองนี้เป็นการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามและโซเดียมไนเตรทเป็นวัตถุติดทางเลือกในอาหารชั้นเพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากกระบวนการหมักในกระเพาะรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยการทดลองที่ 1 มีอาหารทดลอง 4 สูตร คือ อาหารชั้นที่ไม่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม (OTSH) และอาหารชั้นที่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามระดับ 7.5%, 15.0% และ 22.5% (7.5TSH, 15.0TSH และ 22.5TSH ตามลำดับ) การทดลองที่ 2 ประกอบไปด้วยอาหารทดลอง 3 สูตร คือ 1) อาหารชั้นที่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม 10% (10TSH) 2) อาหารชั้นที่ไม่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามและเสริมโซเดียมไนเตรท 1% (OTSH&1SN) และ 3) สูตรอาหารชั้นที่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม 10% และเสริมโซเดียมไนเตรท 1% (10TSH&1SN) ใช้อาหารชั้นและฟางข้าวในสัดส่วน 50:50 ในหลอดทดลอง ที่มีส่วนผสมของเหลวจากกระเพาะรูเมนของโคลูกผสมบราห์มันเพศผู้ตอน 2 ตัว กับสารละลายน้ำลายเทียมในสัดส่วน 1:1 ในสภาวะไร้ออกซิเจนและบ่มที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแก๊สและของเหลวมาวิเคราะห์ภายหลังการบ่ม ผลการทดลองที่ 1 พบว่า pH แต่ละกลุ่มทดลองไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจน ปริมาณโปรตีนจากจุลินทรีย์ กรดไขมันระเหยง่าย สัดส่วน acetate/propionate การย่อยได้ของวัตถุแห้ง ปริมาตรแก๊สรวม ปริมาตรแก๊สมีเทน และปริมาตรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าลดลงตามระดับของเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่เพิ่มขึ้น ผลจากการทดลองที่ 2 พบว่า ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ปริมาณโปรตีนจากจุลินทรีย์ ปริมาตรแก๊สรวม ปริมาตรแก๊สมีเทน และปริมาตรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าต่ำที่สุดในกลุ่ม 10TSH&1SN ส่วนค่า pH กรดไขมันระเหยง่ายรวม และสัดส่วน acetate/propionate ไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลอง จากทั้งสองการทดลองสรุปได้ว่า เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามสามารถใช้เป็นวัตถุติดทางเลือกในสูตรอาหารชั้นได้ถึง 15% โดยสามารถลดการผลิตแก๊สมีเทน และการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม 10% ในอาหารชั้นร่วมกับไนเตรท 1% สามารถลดการผลิตแก๊สมีเทนได้ดีกว่าการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม 10% หรือการใช้ไนเตรท 1% เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: เปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม, ไนเตรท, การหมักในกระเพาะรูเมน, มีเทน

1. บทนำ

อาหารสัตว์เป็นต้นทุนที่สำคัญในการผลิตสัตว์เศรษฐกิจ จากวิกฤติราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่สูงขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2564 จนถึงปัจจุบัน (Thai Feed Mill Association, 2024) การนำเข้าวัตถุดิบอาหารสัตว์จากต่างประเทศทำให้มีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจำนวนมากในกระบวนการขนส่งและทำให้มีการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์สูง การใช้วัตถุดิบทางเลือกภายในประเทศจึงเป็นทางเลือกที่ดูอย่างหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปสินค้าเกษตร เช่น เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดเนื้อใน (seed kernel) ของเมล็ดมะขามเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (Thongngok *et al.*, 2020) เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามมีโปรตีนและเยื่อใยซึ่งสัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Thanomwongwatana, 2018; Mansingh *et al.*, 2021) นอกจากนี้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามยังมีองค์ประกอบของคอนเดนซ์แทนนินอยู่มากกว่า 14% (Bhatta *et al.*, 2001) เป็นสารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ คอนเดนซ์แทนนินมีคุณสมบัติในการลดการผลิตแก๊สมีเทนในกระเพาะรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ (15-20 %) (Malik *et al.*, 2017; Poomachandra *et al.*, 2019) จากคุณสมบัติดังกล่าวเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามน่าจะเป็นวัตถุดิบทางเลือกที่ดีที่นำมาใช้ในการประกอบสูตรอาหารสัตว์เพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากการหมักในกระเพาะรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้อง

แก๊สมีเทนที่ผลิตจากสัตว์เคี้ยวเอื้องเกิดจากกระบวนการหมักสารอาหารของจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนและคิดเป็นสัดส่วน

95 เปอร์เซ็นต์ของมีเทนทั้งหมดที่ปล่อยจากสัตว์เคี้ยวเอื้อง แก๊สมีเทนในกระเพาะรูเมนเกิดจากการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน โดยจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen (archaea) แก๊สมีเทนจะถูกขับออกจากกระเพาะรูเมนด้วยกระบวนการเรอออกมาทางปาก แก๊สมีเทนที่ถูกปลดปล่อยออกมามากเกินไปก่อให้เกิดปัญหาภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้น (Beauchemin *et al.*, 2020; Glasson *et al.*, 2022) ปัจจุบันได้มีงานศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางเพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากกระบวนการหมักของสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยเฉพาะการใช้สารเสริมในอาหารสัตว์ จากงานวิจัยของ Kebreab and Feng (2021) พบว่า สารเสริมสารบางชนิดในอาหารสัตว์สามารถลดการผลิตแก๊สมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ bromochloromethane (BCM), 3-nitrooxypropanol (3NOP), แตนนิน และไนเตรท โดยเฉพาะอย่างยิ่งไนเตรทเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนแท้ ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งของไนโตรเจนเช่นเดียวกับยูเรียในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องเพื่อให้จุลินทรีย์นำไนโตรเจนจากไนเตรทไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กรดอะมิโนหรือเป็นองค์ประกอบของโปรตีนในเซลล์จุลินทรีย์ และยังมีฤทธิ์ยับยั้งการผลิตมีเทนในสัตว์เคี้ยวเอื้องได้ด้วย จากการศึกษาของ Abdelbagi *et al.* (2023) รายงานไว้ว่าการใช้ไนเตรทในอาหารโค (140 กรัม/วัน) สามารถลดการปล่อยแก๊สมีเทนจากระบบย่อยอาหารได้มากถึง 22% และ 16% (กรัม/วัน และ กรัม/กิโลกรัมอาหารที่กินได้) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามไนเตรทมีข้อจำกัดในการใช้ผสมในอาหารสัตว์ คือ ถ้าสัตว์ได้รับไนเตรทปริมาณมากกว่า 2.9 เปอร์เซ็นต์ในอาหารจะทำให้เกิดความเป็นพิษ โดยทำให้เกิดภาวะ

ขาดออกซิเจนในกระแสเลือดจากการเกิด methemoglobinemia (Lee and Beauchemin, 2014; EFSA *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม การใช้แทนนินหรือไนเตรทเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งสามารถลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทนได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นการเสริมแทนนินร่วมกับไนเตรทในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องน่าจะมีศักยภาพในการลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทนได้เพิ่มมากขึ้น งานทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม (แหล่งของแทนนินจากธรรมชาติ) ที่ระดับต่าง ๆ และการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามร่วมกับโซเดียมไนเตรทในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องเพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกและประสิทธิภาพการหมักในหลอดทดลอง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

สัตว์ทดลองในการศึกษานี้ขึ้นอยู่กับอายุภายใต้การอนุญาตและกำกับดูแลของคณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (หมายเลขการอนุญาต ACKU66-AGK-013) ซึ่งเป็นไปตามแนวทางของ

คณะกรรมการกำกับและส่งเสริมการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ ที่ให้การรับรองโดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

2.1 การเตรียมน้ำย่อยและจุลินทรีย์

โคลูกผสมพื้นเมืองบราห์มันจะกระเพาะรูเมน จำนวน 2 ตัว น้ำหนัก 413.5 ± 21.92 กิโลกรัม ถูกใช้เป็นแหล่งเก็บน้ำย่อยและจุลินทรีย์จากกระเพาะรูเมน โคถูกเลี้ยงในคอกขังเดี่ยว ณ หน่วยวิจัยสัตว์เคี้ยวเอื้อง ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน โดยมีการให้อาหารชั้น 1.5% และ อาหารหยาบ 1.5% ของน้ำหนักตัวต่อวัน ตามลำดับ อาหารชั้นโปรตีน 16% และอาหารหยาบ คือ ฟางข้าว โดยให้ในสัดส่วน 50:50 แบ่งจ่ายอาหาร 2 มื้อ เวลา 7.00 และ 16.00 น.โคสามารถเข้ากินน้ำได้ตลอดเวลา โคจะถูกปรับสภาพการเลี้ยงและการให้อาหารเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างของเหลวจากกระเพาะรูเมน ก่อนให้อาหารมื้อเช้าในวันที่ 15 ของการทดลอง ทำการกรองออกด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้นก่อนนำส่งห้องปฏิบัติการทันที

Table 1 Feed ingredients and chemical composition of the experimental diet.

Item	0TSH	7.5TSH	15.0TSH	22.5TSH	RS	TSH
Feed ingredients (g/kg)						
Cassava chips	300	300	300	300	—	—
Tamarind seed husk	0	75	150	225	—	—
Palm kernel meal	200	200	200	200	—	—
Soybean meal	195	195	195	195	—	—
Rice bran coarse	300	225	150	75	—	—
Premix ¹	5	5	5	5	—	—
Chemical composition (%DM)						
Crude protein	13.42	13.63	13.84	14.37	6.51	8.52
Ether extract	2.48	2.34	2.16	1.92	1.20	0.79
Ash	7.17	6.16	5.41	4.86	11.22	1.53
Neutral detergent fiber	36.92	33.66	31.70	30.08	72.87	36.11
Acid detergent fiber	31.66	29.72	28.40	26.65	49.54	30.00
Acid detergent lignin	10.10	9.79	9.74	9.50	5.41	12.70
Condensed tannin	0.00	2.73	5.47	8.20	0.00	36.45

TSH = tamarind seed husk; RS = rice straw; DM = dry matter

¹Agromix beef No. 46: vitamin A = 2,160,000 IU, vitamin B3 = 100,000 IU, vitamin E = 5,000 IU, Mn = 8.5 g, Zn = 6.4 g, Cu = 1.6 g, Mg = 16 g, Co = 320 mg, I = 800 mg, Se = 32 mg (Agromix beef No.46: A.I.P. Co. LTD, Nakhon Pathom, Thailand)

2.2 อาหารทดลอง แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง

การทดลองที่ 1 ระดับของเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม (TSH)

ใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามทดแทนรำหยาบในอาหารชั้นที่ระดับ 0, 7.5, 15.0 และ 22.5% (Table 1) เพื่อให้เห็นผลการการลดแก๊สมีเทนอย่างชัดเจน (Malik *et al.*, 2017) เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามเป็นผลพลอยได้จากโรงงานสกัดแป้งจากเนื้อในเมล็ดมะขามของบริษัท ยี.เอ็ม. อีชีฮาร่า จำกัด (ปทุมธานี) และทำการคัดแยกเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามโดย บริษัท พงศ์สมิต จำกัด (นนทบุรี) อาหารทดลองแต่ละสูตร และฟางข้าวถูกนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดวัตถุดิบ (RT-04A; Rong Tsong Precision Technology Co, Taiwan) ให้ผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร

การทดลองที่ 2 การใช้ TSH ร่วมกับ SN

ใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามร่วมกับโซเดียมไนเตรทในอาหารชั้น ประกอบด้วย 3 กลุ่มทดลอง (Table 1) คือ (1) อาหารชั้นที่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม 10% (10TSH) มีส่วนประกอบของวัตถุดิบ (รำหยาบ 20%) และคุณค่าทางโภชนาคล้ายกับการทดลองที่ 1, (2) อาหารชั้นที่ไม่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามและเสริมโซเดียมไนเตรท (Elago Enterprises Pty Ltd., Australia) 1% (0TSH&1SN) และ (3) อาหารชั้นที่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม 10% และเสริมโซเดียมไนเตรท 1% (10TSH&1SN) เป็นระดับของไนเตรทที่สามารถลดการผลิตแก๊สมีเทนในกระเพาะรูเมนของโคและมีความปลอดภัยต่อตัวสัตว์ (Lee and Beauchemin, 2014; EFSA *et al.*, 2020)

2.3 การทดลองและเก็บข้อมูล

ใส่อาหารทดลอง (อาหารชั้น 0.1 กรัม และฟางข้าว 0.1 กรัม) ใน Hungate tube ความจุ 30 mL ผสมสารละลายน้ำลายเทียม (McDougall, 1948) ร่วมกับของเหลวจากกระเพาะรูเมนในสัดส่วน 50:50 ทำในสภาวะไร้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่มีแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ นำสารละลาย (ยูเรียหรือโซเดียมไนเตรท) ผสมใส่ในหลอด Hungate tube หลอดละ 20 mL ปิดฝาด้วยจุกยางและฝาเกลียวพลาสติก จากนั้นนำเข้าในตูบ่ม อุณหภูมิ 39 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำการหยุดกระบวนการหมักในหลอดโดยการนำหลอดทดลองใส่ในน้ำแข็งอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวัดแรงดันแก๊สและเก็บตัวอย่างแก๊สดำเนินเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแก๊สและองค์ประกอบแก๊ส (แก๊สมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์) ของเหลวส่วนที่เหลือหลังการบ่ม 3 mL ถูกเก็บเพื่อวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน (NH₃-N) โปรตีนจากจุลินทรีย์ (MCP) และกรดไขมันสายสั้น (SCFA) ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปหาการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง (IVDMD) โดยทำกลุ่มทดลองละ 6 หลอด (ซ้ำ) และมี blank จำนวน 4 หลอด (ไม่ใส่อาหารในหลอดทดลอง)

2.4 การวิเคราะห์ทางเคมี

อาหารสัตว์และเปลือกเมล็ดมะขามนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการอาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม โดยวัตถุแห้ง (dry matter) โปรตีนหยาบ (crude protein) ไขมัน (ether extract) และเถ้า (ash) ถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AOAC (2019) และ ISO/IEC 17025 ส่วนเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลาง เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด และลิกนินถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AOAC (2016) และ ISO/IEC 17025 การวิเคราะห์ปริมาณแทนนินได้ดัดแปลงวิธีการของ Sun *et al.* (1998) และ Butler *et al.* (1982) โดยทำการสกัดสารละลายแทนนินจากเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่ถูกบดละเอียด (< 1 mm) ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในสารละลาย Ethanol:H₂O (3:2) ปริมาตร 50 mL ที่อุณหภูมิ 50 °C นาน 24 ชั่วโมง (SSeriker II VS-8480SFN; Vision Scientific Co Ltd, Daejeon-Si, Korea) จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อตกตะกอนที่ 4000 rpm นาน 20 นาที นำสารละลายใสที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณแทนนิน โดยใช้ catechin เป็นสารละลายมาตรฐานของ condensed tannin (CT) เตรียมสารละลาย vanillin-70%H₂SO₄ โดยใช้ vanillin 1 กรัม ในสารละลาย 70% H₂SO₄ 100 mL (ในน้ำกลั่น) เตรียม catechin ที่ความเข้มข้น 0.1-1.0 mg/mL (ละลายใน Ethanol:H₂O (3:2) จำนวน 10 ระดับความเข้มข้น) และตัวอย่างสารสกัด 1 mL เติมสารละลาย vanillin 5 mL ในสารละลายมาตรฐานและตัวอย่าง ผสมให้เข้ากัน หลังจาก 30 นาทีนำไปวัดความเข้มของสีด้วยเครื่อง spectrophotometry (Helios Zeta; Thermo Fisher Scientific, Singapore) ที่ความยาวคลื่นแสง 650 nm

2.5 การวัดแรงดันแก๊สและการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สมีเทน

นำหลอดทดลองที่แช่ในน้ำแข็งหลังการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาวัดแรงดันแก๊สด้วยเกจวัดแรงดัน (AΦ60B, GL Science, Tokyo, Japan) จากนั้นทำการเก็บแก๊สปริมาตร 0.2 mL ด้วยไซริงค์ล็อกแก๊ส (TRAJAN® #SGE Syringe, Trajan Scientific Australia Pty Ltd., Australia) และฉีดเข้าเครื่อง Gas chromatograph (GC-8A; Shimadzu, Kyoto, Japan) ซึ่งบรรจุคอลัมน์ (3 mm i.d. × 3 m length, mesh range 80/100; GL Science, Tokyo, Japan) โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นแก๊สจากตัวอย่างที่ฉีดกับแก๊สมาตรฐานได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ 10% และแก๊สมีเทน 1% (บจ. แมสเซอร์ สเตเบิลส์ ก๊าซ จังหวัดนครปฐม) ทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

2.6 การวิเคราะห์ของเหลวที่เหลือภายหลังการบ่ม

ของเหลวที่เหลือภายหลังการบ่มถูกเก็บใส่ไมโครทิวป์ ขนาด 1.5 mL ปริมาตร 1 mL จำนวน 3 หลอดและเก็บที่อุณหภูมิ -20°C เพื่อนำไปวิเคราะห์ $\text{NH}_3\text{-N}$, MCP และ SCFA ต่อไป วัดค่า pH จากของเหลวที่เหลือด้วย pH meter (CyberScan pH510; Eutech Instruments Pte Ltd, Singapore) จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 100°C และนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาปริมาณแห้ง ส่วนที่เหลือเพื่อประเมินค่า *in vitro* dry matter digestibility (IVDMD) ตามวิธีของ Adetunji *et al.* (2020)

ค่า $\text{NH}_3\text{-N}$ ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค phenol-hypochlorite ด้วย UV-Vis spectrophotometer (Multiskan SkyHigh Microplate Reader; Thermo Fisher Scientific, Singapore) โดยใช้ความยาวคลื่นแสงที่ 660 nm (Khongpradit *et al.*, 2020)

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนจากจุลินทรีย์ คัดแปลงจากวิธีของ Makkar *et al.* (1982) นำตัวอย่างมาทำการปั่นเหวี่ยงที่ $400 \times g$ นาน 5 นาที ที่อุณหภูมิ 4°C เก็บตัวอย่างของเหลวและปั่นเหวี่ยงอีกครั้งที่ $25,000 \times g$ นาน 25 นาที ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อเก็บตะกอนเซลล์ของจุลินทรีย์ และล้างเซลล์อีกครั้งด้วยการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ (McDougall, 1948) ปั่นเหวี่ยงอีกครั้งที่ $25,000 \times g$ นาน 25 นาที ที่อุณหภูมิ 4°C และทิ้งส่วนใส เมื่อได้ส่วนเซลล์ที่ตกตะกอนแล้วทำให้เซลล์แตกด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 N 1 mL และให้ความร้อนที่ 80°C นาน 10 นาที ด้วย digital dry bath (AccuBlock; Labnet, China) ปั่นเหวี่ยงอีกครั้งที่ $25,000 \times g$ นาน 30 นาที ที่อุณหภูมิ 4°C เก็บส่วนใสเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนจากจุลินทรีย์ โดยวัดด้วย microplate spectrophotometer (Multiskan SkyHigh; Thermo Fisher Scientific, Singapore) คำนวณหาปริมาณโปรตีนโดยใช้ bovine serum albumin เป็นสารมาตรฐาน (Quick Start Bradford Protein Assay Kit2; Bio-rad, California, USA) เตรียมสารละลายโปรตีนมาตรฐาน 7 ความเข้มข้นตั้งแต่ $0.125 - 20 \text{ mg/ml}$ นำตัวอย่างที่เตรียมแล้วหรือสารมาตรฐาน $5 \mu\text{L}$ ผสมด้วย Quick Start™ Bradford dye reagent $250 \mu\text{L}$ (Quick Start Bradford Protein Assay Kit2; Bio-rad, California, USA) ย้ายสารละลายไปภาตหลุมใหม่ไปเขย่านาน 2 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 595 nm

การวิเคราะห์ SCFA ทำตามวิธีของ Khongpradit *et al.* (2020) โดยผสมตัวอย่าง $100 \mu\text{L}$ กับ 5 N H_2SO_4 ใน metaphosphoric acid $20 \mu\text{L}$ แช่เย็นที่ 4°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ $16,000 \times g$ นาน 5 นาที ที่อุณหภูมิ 4°C จากนั้นดูดสายละลายตัวอย่าง $50 \mu\text{L}$ ผสมกับ crotonic acid ที่มีความเข้มข้น 3 mmol/dL เป็นสารมาตรฐานภายใน (internal standard) ปริมาตร $50 \mu\text{L}$ และใช้กรดไขมันระเหยง่ายที่ทราบความเข้มข้นเป็นสารมาตรฐานภายนอก (external standard) ทำการฉีดตัวอย่างที่เตรียมแล้วจำนวน $1 \mu\text{L}$ เข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

(CP9001; Chrompack, Shimadzu, Japan) แปลผลจากพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐาน

2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (analysis of variance; ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี orthogonal contrast (Tukey's comparison) และวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาผลการตอบสนองแบบ linear, quadratic และ cubic โดยใช้โปรแกรม R version 4.3.3 (R Core Team, 2024) โดยกำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.05$ เพื่อประเมินผลของกลุ่มทดลอง โดยค่าเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SEM) จะถูกคำนวณในแต่ละตัวแปรโดยใช้โมเดล ดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

กำหนด Y_{ij} = ค่าผลทดสอบ, μ = ค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มทดลอง, α_i = ระดับ TSH ($i = 0, 7.5, 15.0$, และ 22.5) หรือ การใช้ TSH ร่วมกับ SN (10TSH , $0\text{TSN}\&1\text{SN}$ และ $10\text{TSH}\&1\text{SN}$), ϵ_{ij} = ค่าความคลาดเคลื่อน

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การทดลองที่ 1 ระดับของเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในอาหารชั้น

ผลการหมักในหลอดทดลองจากการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในอาหารชั้นแสดงใน Table 2 ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่เพิ่มขึ้น (ที่ระดับ 15.0 และ 22.5 เปอร์เซ็นต์) ในขณะที่ $\text{NH}_3\text{-N}$ และ MCP มีความเข้มข้นที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณ total SCFA มีระดับลดลงที่ 15.0TSH และ 22.5TSH (แบบ quadratic) แม้จะไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยพบว่ากลุ่ม 7.5TSH มีค่าเฉลี่ยสูงสุด สัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายพบว่า โพรไฟโอเนตมีสัดส่วนที่สูงขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์กรดไขมันสายสั้นอื่น ๆ มีระดับลดลงตามปริมาณเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่สูงขึ้น สัดส่วน acetate/propionate (A/P ratio) มีค่าลดลงแบบเส้นตรง เมื่อระดับเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามสูงขึ้น การใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในปริมาณเพิ่มมากขึ้นในอาหารชั้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การย่อยได้ การผลผลิตกรดไขมันระเหยง่ายสายสั้น ความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และปริมาณโปรตีนจากจุลินทรีย์มีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติของแทนนินที่เป็นองค์ประกอบหลักในเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม (36.45%) ซึ่งแทนนินนี้สามารถจับกับโปรตีนในอาหารและทำให้โปรตีนถูกย่อยได้ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีนแท้ที่มีคุณภาพดีถ้าอยู่ในกระเพาะรูเมนของสัตว์โปรตีนเหล่านี้จะ

ถูกไหลผ่านไปยังทางเดินอาหารส่วนท้าย (ลำไส้เล็ก) ที่มีสภาพความเป็นด่างสูงจะทำให้โปรตีนแยกหรือแตกตัวจากการจับของแทนนินและโปรตีนจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่หลั่งออกมาจากตัวสัตว์ทำให้ได้เป็นกรดอะมิโนและถูกดูดไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงซึ่งจะเป็นผลดีต่อตัวสัตว์ (Bhatta *et al.*, 2000; Sawanon, 2018) ดังนั้นอาหารชั้นที่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามเป็นส่วนผสมอยู่มากเมื่อสัตว์กินเข้าไปจุลินทรีย์จะเข้ามาย่อยโปรตีนได้น้อยจึงส่งผลทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในกระเพาะรูเมนลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (อาหารชั้นที่ไม่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม) ทำให้มีสารตั้งต้นเพื่อให้จุลินทรีย์นำไปใช้ในการสังเคราะห์กรดอะมิโนเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์น้อยลง สัดส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในอาหารชั้นที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายสายสั้นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดอะซิติกและบิวทิริก อย่างไรก็ตามการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่ระดับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ในอาหารชั้น (7.5 TSH) มีค่าการย่อยได้และความเข้มข้นของกรดไขมันสายสั้นทั้งหมดสูงที่สุด ในขณะที่สัดส่วนของกรดอะซิติก โพรพิโอนิก บิวทิริก และกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่น พบว่าการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในอาหารชั้นปริมาณมากขึ้นทำให้สัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกเพิ่มขึ้น และส่งผลให้สัดส่วนกรดอะซิติกต่อโพรพิโอนิกน้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Malik *et al.* (2017) การใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในอาหารชั้นเพิ่มมากขึ้นทำให้ผลผลิตแก๊สมีเทนลดลง อาจเป็นผลมาจากเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามไปส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่หมักย่อยแล้วได้ผลผลิตสุดท้าย คือโพรพิโอนेटเป็นหลัก ในกระบวนการหมักของจุลินทรีย์เพื่อให้ได้โพรพิโอนेटจะมีการสูญเสียคาร์บอนหรือไฮโดรเจนอย่างมาก ทำให้มีสารตั้งต้นในการสังเคราะห์แก๊สมีเทนลดลง จึงทำให้ปริมาณการผลิตแก๊สมีเทนลดลง (Naumann *et al.*, 2017) ส่วนกรดไขมันระเหยง่ายสายสั้นชนิดอื่น เช่น isobutyrate, valerate และ isovalerate ส่วนใหญ่ได้มาจากการย่อยสลายกรดอะมิโน valine, leucine และ isoleucine (France and Dijkstra, 2005)

ผลการย่อยได้และผลผลิตแก๊สในหลอดทดลองจากการใช้เปลือกหุ้มมะขามในอาหารชั้นแสดงใน Table 3 โดยค่าการย่อยได้มีค่าลดลงตามระดับเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่อยู่ในอาหาร โดยมีการย่อยได้ดีที่สุดในกลุ่ม 7.5TSH ย่อยได้ถึง 37.38% ปริมาตรแก๊สรวม ปริมาตรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาตรแก๊สมีเทนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยกลุ่ม 22.5TSH มีปริมาตรแก๊สทั้งหมดน้อยที่สุด และสัดส่วนระหว่าง CO_2/CH_4 เพิ่มขึ้นตามระดับของ TSH ที่เพิ่มมากขึ้นเป็นแบบเส้นตรง แม้ไม่พบความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 0TSH และ 7.5TSH การผลิตแก๊สมีเทนต่อปริมาณอาหารที่ถูกย่อยได้ ($\text{CH}_4/\text{digestible dry matter}$: CH_4/dDM) มีค่าลดลงเป็นแบบเส้นตรงตามระดับของ TSH ที่เพิ่ม

มากขึ้น การทดแทนรำหยาบด้วยเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามจะลดการย่อยได้ของอาหารสัตว์ เนื่องจากรำหยาบมีปริมาณเยื่อใยในรูปของ NDF และ ADF (59.1 และ 44.1 % ตามลำดับ จาก Bureau of Animal Nutrition Development (2016) สูงกว่าเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม (36.1 และ 30.0 % ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1) แต่เอมิเซลลูโลส (NDF – ADF) ซึ่งเป็นเยื่อใยที่ย่อยได้ง่ายในรำข้าว (Javier-Astete *et al.*, 2021) มีปริมาณมากกว่าเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม ลิกนิน (ADL) ในเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามมีปริมาณมากกว่ารำหยาบจึงทำให้แบคทีเรียเข้าย่อยเยื่อใยในเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามได้ไม่ดี (Bureau of Animal Nutrition Development, 2016) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในอาหารจะทำให้ค่าการย่อยได้มีแนวโน้มลดลง (Table 3) นอกจากนี้พบว่าระดับของแทนนินในเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม (7.5TSH) ทำให้การย่อยได้ในรูปวัตถุแห้งใกล้เคียงกับอาหารที่ไม่มีเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามเป็นองค์ประกอบ เป็นระดับที่เหมาะสมต่อทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสารอาหาร คล้ายกับการศึกษาของ Wanapat *et al.* (2021) ที่รายงานว่าแทนนิน และซาโปนิน (saponin) ในเปลือกมังคุด เปลือกเงาะ และหัวปลีในระดับที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการย่อยได้ของอาหาร แต่ถ้าใช้ในระดับที่สูงขึ้นกลับพบว่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งลดลง ซึ่งน่าจะเป็นผลจากความสามารถในการจับของแทนนินกับเยื่อใย โปรตีน และแร่ธาตุที่จำเป็น ทำให้จุลินทรีย์เข้าไปยึดจับและย่อยโครงสร้างขนาดใหญ่ (polysachcharide และ polyamide) ได้น้อยลง ตลอดจนอาจจะไปขัดขวางการนำแร่ธาตุสำคัญ (Al, Ca, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, P และ Zn) เข้าสู่เซลล์ทำให้มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่ย่อยเยื่อใย (Fibrolitic bacteria) เช่น *F. succinogenes* ลดลง (Naumann *et al.*, 2017; Vasta *et al.*, 2019) นอกจากนี้จากการศึกษาของ Huang *et al.* (2018) ซึ่งศึกษาคุณสมบัติด้านสารต้านจุลินทรีย์ของแทนนินพบว่าคอนเดนซ์แทนนินมีผลทำลายเยื่อเซลล์และเพิ่มการซึมผ่านของสารเข้าออกเซลล์เชื้อก่อโรคด้วย การลดลงของปริมาตรแก๊สรวม แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนเป็นผลจากคุณสมบัติของแทนนินในการยับยั้งการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งยังไม่มีการทำงานที่ชัด แต่มีสมมติฐานด้วยกัน 3 ข้อตามการศึกษาของ Naumann *et al.* (2017) คือ 1. การจับการโปรตีนที่ fimbria และเยื่อหุ้มเซลล์มีผลลดการจับกันของ methanogen และ protozoa ลดการส่งผ่านแก๊ส H_2 ระหว่าง 2 สปีชีส์ นอกจากนี้ยังมีผลให้จำนวน ciliated protozoa ลดลงด้วย 2. การลดการย่อยได้ของสารอาหาร ซึ่งได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และ 3. โครงสร้างของแทนนินมีคุณสมบัติในการจับโมเลกุล H_2 เช่นกัน ทั้งนี้ H_2 และ CO_2 เป็นสารตั้งต้นในการผลิต CH_4 (Vearaslip, 2005) การลด H_2 อิสระในระบบ จึงช่วยลดการสังเคราะห์ CH_4 ได้

Table 2 Fermentation characteristics of tamarind seed husk with increasing levels at 0, 7.5, 15.0 and 22.5% in concentrate diets

Parameter	0TSH	7.5TSH	15.0TSH	22.5TSH	SEM	P-value		
						linear	quadratic	cubic
pH	6.54	6.51	6.64	6.60	0.09	0.06	0.94	0.50
NH ₃ -N (mgN/L)	34.53 ^a	31.78 ^{ab}	30.00 ^{ab}	28.49 ^b	2.92	<0.01	0.68	0.91
MCP (μg/ml)	137.71 ^a	98.84 ^{ab}	85.94 ^b	85.59 ^b	321.43	<0.01	0.06	0.79
Total SCFA (mmol/L)	338.22	349.54	278.87	275.11	56.17	0.18	0.03	0.75
Acetate (mmol/L)	256.91 ^a	263.71 ^a	210.34 ^b	208.26 ^b	42.79	0.03	0.72	0.22
Propionate (mmol/L)	39.98	43.85	35.28	35.09	6.62	0.11	0.42	0.15
Butyrate (mmol/L)	25.99 ^a	26.56 ^a	21.35 ^b	20.86 ^b	4.58	0.03	0.66	0.27
Other SCFAs (mmol/L)	15.34 ^a	15.42 ^a	11.90 ^{ab}	10.90 ^b	2.52	<0.01	0.52	0.60
Acetate (%)	75.94	75.42	75.42	75.73	0.70	0.60	0.20	0.88
Propionate (%)	11.85 ^b	12.56 ^{ab}	12.69 ^{ab}	12.76 ^a	0.50	0.01	0.16	0.63
Butyrate (%)	7.67	7.61	7.64	7.55	0.25	0.47	0.90	0.68
Other SCFAs (%)	4.53 ^a	4.41 ^a	4.25 ^{ab}	3.97 ^b	0.19	<0.01	0.34	0.85
Acetate/Propionate ratio	6.41	6.02	5.95	5.94	0.29	0.02	0.15	0.67

TSH = tamarind seed husk; NH₃-N = ammonia nitrogen; MCP = microbial crude protein; Other SCFAs = iso-butyrate + valerate + isovalerate

^{ab} Means in a row superscripted with different lowercase letters are significantly different ($p < 0.05$). SEM = standard error of means

Table 3 Digestibility and gas production of tamarind seed husk with increasing levels at 0, 7.5, 15.0 and 22.5% in concentrate diets

Parameter	0TSH	7.5TSH	15.0TSH	22.5TSH	SEM	P-value		
						linear	quadratic	cubic
IVDMD	36.56 ^a	37.38 ^a	31.65 ^{ab}	29.79 ^b	3.31	<0.01	0.35	0.16
Total gas (mL)	36.73 ^a	35.77 ^a	35.41 ^{ab}	34.22 ^b	0.84	<0.01	0.66	0.37
CO ₂ (mL)	22.17 ^a	21.52 ^{ab}	20.76 ^{ab}	19.81 ^b	1.57	0.40	0.96	0.01
CH ₄ (mL)	5.26 ^a	5.11 ^a	4.47 ^b	3.97 ^b	0.37	<0.01	0.32	<0.01
CO ₂ /CH ₄	4.21 ^b	4.21 ^b	4.65 ^a	5.01 ^a	0.25	<0.01	0.10	0.24
CH ₄ /dDM (mL/g)	78.67	74.07	77.72	71.51	10.98	0.34	0.96	0.52

TSH = tamarind seed husk; IVDMD = *in vitro* dry matter digestibility; CH₄ = methane; CO₂ = carbon dioxide; CH₄/dDM, methane/digested dry matter

^{ab} Means in a row superscripted with different lowercase letters are significantly different ($P < 0.05$). SEM = standard error of means

3.2 การทดลองที่ 2 TSH ร่วมกับ SN

การใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามที่ 10% มีผลทำให้ความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น และถ้าใช้ทั้งเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามร่วมกับไนเตรทจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากงานศึกษาก่อนหน้าพบว่าการทดแทนยูเรียด้วยไนเตรทมีผลเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะรูเมนเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Villar *et al.*, 2020; Abdelbagi *et al.*, 2021) ค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจน พบว่ากลุ่ม 0TSH&1SN มีค่ามากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่กลุ่ม 10TSH&1SN มีค่าน้อยที่สุด ปริมาณ MCP มีค่ามากที่สุดในกลุ่ม

10TSH และน้อยที่สุดในกลุ่ม 10TSH&1SN ความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าลดลงในกลุ่มที่ใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามร่วมกับไนเตรท (10TSH&1SN) สันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผลจากการที่โคเจาะกระเพาะไม่ได้รับการปรับตัวจากการได้รับไนเตรทมาก่อน ทำให้ความสามารถในการปรับตัวของจุลินทรีย์ต่อการใช้ประโยชน์จากไนเตรทลดลง (Nolan *et al.*, 2016) รวมถึงไนเตรทมีผลทำให้การย่อยได้ของของเยื่อใยในรูป NDF ลดลง (Newbold *et al.*, 2014) และทำให้การสังเคราะห์โปรตีนเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์ลดลง และจากงานศึกษาของ Abdelbagi *et al.* (2021) ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังแบบ meta-analysis (10 งานวิจัย)

พบว่าไนเตรทมีผลทำให้ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นหลังการบ่มในหลอดทดลอง

ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด และกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่างๆ ในหน่วย mmol/L พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มทดลอง เช่นเดียวกับงานศึกษาของ Abdelbagi *et al.* (2021) จากทั้ง 3 กลุ่มทดลอง พบว่าสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงที่สุดเมื่อใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามร่วมกับไนเตรท และมีสัดส่วนของกรดบิวทริกและกรดไขมันระเหยง่ายสายสั้นชนิดอื่นต่ำที่สุด ทั้งนี้จากหลายงานศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายค่อนข้างแตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง โดยขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดสัตว์ การให้อาหาร ปริมาณ และชนิดของไนเตรทที่ใช้ (Duthie *et al.*, 2018; van Wyngaard *et al.*, 2019; Welty *et al.*, 2019; Adejoro *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2023)

ปริมาณแก๊สรวม คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนมีผลลดลงต่ำสุด ในกลุ่มทดลองที่ใช้ทั้งเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามร่วมกับไนเตรท สาเหตุมาจากการย่อยได้ที่ลดลงจากผลของแทนนินในเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม และผลของไนเตรทต่อการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Yang *et al.*, 2016) นอกจากนี้แบคทีเรียยังสามารถเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นไนไตรต์ และแอมโมเนียได้ตามลำดับ ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงไนเตรทไปเป็นแอมโมเนียนี้จะมีการใช้อิโตรเจน (H_2) ซึ่งจะทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนที่นำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์มีเทนและการเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตแก๊สมีเทนลดลง ดังแสดงในการศึกษาของ Bowen *et al.* (2020) ที่ชี้ให้เห็นว่าการใช้ calcium nitrate 2.5% ในอาหารโคเพศผู้ตอน ส่งผลให้จำนวน Methanospaera และ Methanobrevibacter ลดลง

Table 4 Fermentation characteristics of tamarind seed husk, sodium nitrate and their combination in concentrate diets

Parameter	10TSH	0TSH&1SN	10TSH&1SN	SEM	P-value
pH	6.54	6.51	6.59	0.08	0.25
NH ₃ -N (mgN/L)	37.90 ^{ab}	40.70 ^a	34.50 ^b	2.33	<0.01
MCP (μg/ml)	119.19 ^a	88.89 ^{ab}	77.17 ^b	22.68	0.03
Total SCFA (mmol/L)	271.28	263.13	261.88	17.66	0.65
Acetate (mmol/L)	205.14	195.63	199.63	14.91	0.59
Propionate (mmol/L)	35.00	34.72	33.45	2.06	0.43
Butyrate (mmol/L)	20.62	21.07	18.85	1.79	0.12
Other SCFAs (mmol/L)	10.48 ^{ab}	11.68 ^a	9.90 ^b	0.94	0.02
Acetate (%)	75.59 ^{ab}	74.34 ^b	76.18 ^a	1.12	0.04
Propionate (%)	12.93	13.20	12.80	0.71	0.62
Butyrate (%)	7.59 ^{ab}	8.01 ^a	7.20 ^b	0.44	0.03
Other SCFAs (%)	3.87 ^b	4.44 ^a	3.79 ^b	0.33	0.01
Acetate/Propionate ratio	2.16	2.15	2.28	0.14	0.28

TSH = tamarind seed husk; SN = sodium nitrate; NH₃-N = ammonia nitrogen; MCP = microbial crude protein; Other SCFAs = iso-butyrate + valerate + isovalerate

^{ab} Means in a row superscripted with different lowercase letters are significantly different ($p < 0.05$). SEM = standard error of means

Table 5 Gas production of tamarind seed husk, sodium nitrate and their combination in concentrate diets

Parameter	10TSH	0TSH&1SN	10TSH&1SN	SEM	P-value
Total gas (mL)	29.56 ^a	28.23 ^{ab}	27.78 ^b	1.13	<0.05
CO ₂ (mL)	11.80 ^a	10.72 ^{ab}	10.38 ^b	0.91	<0.05
CH ₄ (mL)	4.72 ^a	4.63 ^a	4.25 ^b	0.20	<0.01
CO ₂ /CH ₄	2.50	2.31	2.44	0.12	0.05

TSH = tamarind seed husk; SN = sodium nitrate; CH₄ = methane; CO₂ = carbon dioxide

^{ab} Means in a row superscripted with different lowercase letters are significantly different ($P < 0.05$). SEM = standard error of means

จากผลการทดลองพบว่าเปลือกหุ้มเมล็ดมะขามและโซเดียมไนเตรทสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่กระทบต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างชัดเจน แม้ในงานทดลองก่อนหน้านี้ของ Adejoro *et al.* (2020) ที่ใช้สารสกัด acacia tannin ร่วมกับไนเตรทในแกะ พบว่าไนเตรทส่งเสริมให้แกะมีสมรรถภาพการเจริญเติบโตที่ดีและลดการผลิตแก๊สมีเทน แต่การใช้สารสกัดจาก acacia tannin เพียงอย่างเดียวไม่มีผลในการปรับปรุงสมรรถภาพการเจริญเติบโตของแกะและลดการผลิตแก๊สมีเทนลงได้

4. สรุป

เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารชั้นสามารถใช้ได้สูงสุดไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลเสียต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบ แต่สามารถลดการผลิตแก๊สมีเทนจากกระบวนการหมักในกระเพาะได้ หากใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามในระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับโซเดียมไนเตรทที่ระดับ 1 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารชั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการลดการผลิตแก๊สมีเทนได้ ดีกว่าการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดมะขามหรือโซเดียมไนเตรทเพียงอย่างเดียว

5. เอกสารอ้างอิง

- Abdelbagi, M., Ridwan, R., Fitri, A. and Jayanegara, A. 2023. Performance, methane emission, nutrient utilization, and the nitrate toxicity of ruminants with dietary nitrate addition: A meta-analysis from in vivo trials. **Tropical Animal Science Journal** 46(1): 74-84.
- Abdelbagi, M., Ridwan, R. and Jayanegara, A. 2021. The potential of nitrate supplementation for modulating the fermentation pattern and mitigating methane emission in ruminants: A meta-analysis from *in vitro* experiments. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 902(1): 012023.
- Adejoro, F.A., Hassen, A., Akanmu, A.M. and Morgavi, D.P. 2020. Replacing urea with nitrate as a non-protein nitrogen source increases lambs' growth and reduces methane production, whereas acacia tannin has no effect. **Animal Feed Science and Technology** 259: 114360.
- Adetunji, A.P., Aderinboye, R.Y., Adebayo, K.O., Ojo, V.O., Idowu, P.A. and Mtileni, B. 2020. Effect of cashew nut shell liquid at varying inclusion levels on rumen fermentation and methane production *in vitro*. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology** 8(2): 82-87.
- AOAC. 2016. **Official Methods of Analysis**. Association of Official Analysis Chemists. Maryland, USA.
- AOAC. 2019. **Official Methods of Analysis**. Association of Official Analysis Chemists. Maryland, USA.
- Beauchemin, K.A., Ungerfeld, E.M., Eckard, R.J. and Wang, M. 2020. Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. **Animal** 14(S1): s2-s16.
- Bhatta, R., Krishnamoorthy, U. and Mohammed, F. 2000. Effect of feeding tamarind (*Tamarindus indica*) seed husk as a source of tannin on dry matter intake, digestibility of nutrients and production performance of crossbred dairy cows in mid-lactation. **Animal Feed Science and Technology** 83(1): 67-74.
- Bhatta, R., Krishnamoorthy, U. and Mohammed, F. 2001. Effect of tamarind (*Tamarindus indica*) seed husk tannins on *in vitro* rumen fermentation. **Animal Feed Science and Technology** 90(3-4): 143-152.
- Bowen, J.M., Cormican, P., Lister, S.J., McCabe, M.S., Duthie, C.A., Roehe, R. and Dewhurst, R.J. 2020. Links between the rumen microbiota, methane emissions and feed efficiency of finishing steers offered dietary lipid and nitrate supplementation. **PLoS One** 15(4): e0231759.
- Bureau of Animal Nutrition Development. 2016. **Collection and Improvement in Nutritive Values Database of feed stuffs**. Bureau of Animal Nutrition Development, DLD, Bangkok. (in Thai)
- Butler, L.G., Price, M.L. and Brotherton, J.E. 1982. Vanillin assay for proanthocyanidins (condensed tannins): modification of the solvent for estimation of the degree of polymerization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 30(6): 1087-1089.
- Duthie, C.A., Troy, S., Hyslop, J., Ross, D., Roehe, R. and Rooke, J. 2018. The effect of dietary addition of nitrate or increase in lipid concentrations, alone or in combination, on performance and methane emissions of beef cattle. **Animal** 12(2): 280-287.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J.K., del Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hoogenboom, L., Leblanc, J., Nebbia, C.S., Nielsen, E., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Schwerdtle, T., Vleminckx, C., Wallace, H., Bampidis, V., Cottrill, B., Frutos, M.

- J., Furst, P., Parker, A., Binaglia, M., Christodoulidou, A., Gergelova, P., Guajardo, I. M., Wenger, C. and Hogstrand, C. 2020. Scientific Opinion on the risk assessment of nitrate and nitrite in feed. **EFSA Journal** 18(11): 1-110.
- France, J. and Dijkstra, J. 2005. **Volatile fatty acid production**. Available source: https://WWW.researchgate.net/profile/Andre-Bannink-2/publication/40117257_Rumen_Function/links/02e7e53ad990e71c39000000/Rumen-Function.pdf#page=169, May 13, 2024.
- Glasson, C.R., Kinley, R.D., de Nys, R., King, N., Adams, S. L., Packer, M.A., Svenson, J., Eason, C.T. and Magnusson, M. 2022. Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants. **Algal Research** 64: 102673.
- Huang, Q., Liu, X., Zhao, G., Hu, T. and Wang, Y. 2018. Potential and challenges of tannins as an alternative to in-feed antibiotics for farm animal production. **Animal Nutrition** 4(2): 137-150.
- Javier-Astete, R., Jimenez-Davalos, J. and Zolla, G. 2021. Determination of hemicellulose, cellulose, holocellulose and lignin content using FTIR in *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) K. Schum. and *Guazuma crinita* Lam. **PLoS One** 16(10): e0256559.
- Kebreab, E. and Feng, X. 2021. **Strategies to reduce methane emissions from enteric and lagoon sources**. California Air Resources Board Project.
- Khongpradit, A., Boonsaen, P., Homwong, N., Suzuki, Y., Koike, S., Sawanon, S. and Kobayashi, Y. 2020. Effect of pineapple stem starch feeding on rumen microbial fermentation, blood lipid profile, and growth performance of fattening cattle. **Animal Science Journal** 91(1): e13459.
- Lee, C. and Beauchemin, K.A. 2014. A review of feeding supplementary nitrate to ruminant animals: nitrate toxicity, methane emissions, and production performance. **Canadian Journal of Animal Science** 94: 557-570.
- Makkar, H.P.S., Sharma, O.P., Dawra, R.K. and Negi, S.S. 1982. Simple determination of microbial protein in rumen liquor. **Journal of Dairy Science** 65(11): 2170-2173.
- Malik, P.K., Kolte, A.P., Bakshi, B., Baruah, L., Dhali, A. and Bhatta, R. 2017. Effect of tamarind seed husk supplementation on ruminal methanogenesis, methanogen diversity and fermentation characteristics. **Carbon Management** 8(4): 319-329.
- Mansingh, B.B., Binoj, J.S., Sai, N.P., Hassan, S.A., Siengchin, S., Sanjay, M.R. and Liu, Y.C. 2021. Sustainable development in utilization of *Tamarindus indica* L. and its by-products in industries: A review. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry** 4: 100207.
- McDougall, E. 1948. Studies on ruminant saliva. 1. The composition and output of sheep's saliva. **Biochemical Journal** 43(1): 99.
- Naumann, H.D., Tedeschi, L.O., Zeller, W.E. and Huntley, N.F. 2017. The role of condensed tannins in ruminant animal production: advances, limitations and future directions. **Revista Brasileira de Zootecnia** 46: 929-949.
- Newbold, J., Van Zijderveld, S., Hulshof, R., Fokkink, W., Leng, R., Terencio, P., Powers, W.J., van Adrichem, P.S. J., Paton, N.D. and Perdok, H. 2014. The effect of incremental levels of dietary nitrate on methane emissions in Holstein steers and performance in Nelore bulls. **Journal of Animal Science** 92(11): 5032-5040.
- Nolan, J.V., Godwin, I., de Raphélis-Soissan, V. and Hegarty, R. 2016. Managing the rumen to limit the incidence and severity of nitrite poisoning in nitrate-supplemented ruminants. **Animal Production Science** 56(8): 1317-1329.
- Poornachandra, K., Malik, P., Dhali, A., Kolte, A. and Bhatta, R. 2019. Effect of combined supplementation of tamarind seed husk and soapnut on enteric methane emission in crossbred cattle. **Carbon Management** 10(5): 465-475.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available Source: <https://WWW.R-project.org>, February 20, 2024.
- Sawanon, S. 2018. **Rumen microbes and utilization** (2nd ed). Magic Publication, Bangkok. (in Thai)
- Sun, B., Ricardo-da-Silva, J.M. and Spranger, I. 1998. Critical factors of vanillin assay for catechins and

- proanthocyanidins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 46(10): 4267-4274.
- Thai Feed Mill Association. 2024. **Monthly Raw Material Price**. Available Source: <https://WWW.thaifeedmill.org/price-2>, March 10, 2024. (in Thai)
- Thongngok, M., Jongsathapatsin, Y., Gonmanee, J. and Mangmee, W. 2020. Results of Using Tamarind Seeds Husk in Concentrate Feed Rations towards Late Lactation of Dairy Cattle Productivity Performance. Bachelor of Science (Animal Science), Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Thanomwongwatatana, S. 2018. Effect of Supplementing Tamarind Seed Husk in Ration on Productive Performance of Fattening Dairy Steer, pp. 228-233. In Budiati, T. eds. **The Proceeding of the 1st International Conference on Food and Agriculture**. State Polytechnic of Jember, Jawa Timur.
- van Wyngaard, J., Meeske, R. and Erasmus, L. 2019. Effect of dietary nitrate on enteric methane emissions, production performance and rumen fermentation of dairy cows grazing ryegrass pasture during spring. **Animal Feed Science and Technology** 252: 64-73.
- Vasta, V., Daghighi, M., Cappucci, A., Buccioni, A., Serra, A., Viti, C. and Mele, M. 2019. Invited review: Plant polyphenols and rumen microbiota responsible for fatty acid biohydrogenation, fiber digestion, and methane emission: Experimental evidence and methodological approaches. **Journal of Dairy Science** 102(5): 3781-3804.
- Vearaslip, T. 2005. **Ruminant Nutrition** (5th ed). Trio advertising & media, Chiang Mai. (in Thai)
- Villar, M.L., Hegarty, R.S., Nolan, J.V., Godwin, I.R. and McPhee, M. 2020. The effect of dietary nitrate and canola oil alone or in combination on fermentation, digesta kinetics and methane emissions from cattle. **Animal Feed Science and Technology** 259: 114294.
- Wanapat, M., Viennasay, B., Matra, M., Totakul, P., Phesatcha, B., Ampapon, T. and Wanapat, S. 2021. Supplementation of fruit peel pellet containing phytonutrients to manipulate rumen pH, fermentation efficiency, nutrient digestibility and microbial protein synthesis. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 101(11): 4543-4550.
- Wang, W., Lund, P., Larsen, M. and Weisbjerg, M.R. 2023. Effect of nitrate supplementation, dietary protein supply, and genetic yield index on performance, methane emission, and nitrogen efficiency in dairy cows. **Journal of Dairy Science** 106(8): 5433-5451.
- Welty, C., Wenner, B., Wagner, B., Roman-Garcia, Y., Plank, J., Meller, R., Gehman, A.M. and Firkins, J. 2019. Rumen microbial responses to supplemental nitrate. II. Potential interactions with live yeast culture on the prokaryotic community and methanogenesis in continuous culture. **Journal of Dairy Science** 102(3): 2217-2231.
- Yang, C., Rooke, J.A., Cabeza, I. and Wallace, R.J. 2016. Nitrate and inhibition of ruminal methanogenesis: microbial ecology, obstacles, and opportunities for lowering methane emissions from ruminant livestock. **Frontiers in Microbiology** 7: 172645.

Research Article

ผลของการให้อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัดต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต
และกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะลูกผสม เพศผู้ตอน

Effects of Restricted Feeding Total Mixed Ration on Growth Performance
and Volatile Fatty Acids in Rumen of Crossbred Castrated Male Goats

ศณาลักษณ์ ทรัพย์ศิริ ^{a, b} เทียนทิพย์ ไกรพรหม ^{a *} เกศกนก บุญรอด ^{a, b} และ อุมภาพร แพทย์ศาสตร์ ^c

Sanalak Sapsiri ^{a, b}, Thaintip Kraiprom ^{a *}, Katekanok Boonrod ^{a, b} and Umaporn Pastsart ^c

^a คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

^a Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani campus, Muang, Pattani 94000, Thailand.

^b ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครศรีธรรมราช อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80130

^b Nakhon Si Thammarat Animal Nutrition Research and Development Center, Ronphibun, Nakhon Si Thammarat 80130, Thailand.

^c โครงการจัดตั้งคณะนวัตกรรมการเกษตรและประมง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000

^c Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani campus, Muang, Surat Thani 84000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-02-28

Revised: 2024-08-11

Accepted: 2024-09-02

Keywords:

crossbred goat;

restricted feeding total mixed

ration;

growth performance;

volatile fatty acids

This research aimed to study the effects of restricted feeding of a total mixed ration on growth performance and volatile fatty acids in the rumen of crossbred castrated male goats. Fifteen crossbred goats, aged 4 months with an average weight of 21.57 ± 0.55 kg, were divided into three groups: Group 1 fed *ad libitum* AL, Group 2 fed at 70% of AL and Group 3 fed at 40% of AL. Under a Completely Randomized Design (CRD) trial for a period of 90 days, it was found that feed intake ($1,462.70$ g/h/d), body weight gain (9.55 kg), and average daily gain (0.11 kg/h/d) of goats fed *ad libitum* AL were significantly higher than those of goats fed 70% AL ($1,012.00$ g/h/d, 7.08 kg, and 0.08 kg/h/d, respectively) and 40% AL (589.90 g/h/d, 1.68 kg, and 0.02 kg/h/d, respectively). However, the feed conversion ratio of goats fed *ad libitum* (AL) was not significantly different from those fed 70% AL (13.87 and 12.87 , respectively). In addition, there was no significant difference in the pH of the rumen fluid. Total volatile fatty acids, acetic acid, propionic acid, butyric acid and the C2:C3 ratio were at suitable levels for rumen fermentation.

* Corresponding author.

E-mail address: thaintip@gmail.com

Cite this article as:

Sapsiri, S., Kraiprom, T., Boonrod, K. and Pastsart, U. 2025. Effects of Restricted Feeding Total Mixed Ration on Growth Performance and Volatile Fatty Acids in Rumen of Crossbred Castrated Male Goats. *Recent Science and Technology* 17(3): 262329.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการให้อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัดต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะลูกผสม เพศผู้ตอน โดยใช้แพะลูกผสม อายุ 4 เดือน น้ำหนักเฉลี่ย 21.57 ± 0.55 กิโลกรัม จำนวน 15 ตัว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ (*ad libitum*, AL) กลุ่มที่ 2 ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL และกลุ่มที่ 3 ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) เป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่า ปริมาณการกินได้ ($1,462.70$ กรัมต่อตัวต่อวัน) น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (9.55 กิโลกรัม) และอัตราการผลิตเนื้อ (0.11 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน) ของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ มีค่าสูงกว่าแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ ($1,012.00$ กรัมต่อตัวต่อวัน, 7.08 กิโลกรัม และ 0.08 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ) และ 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (589.90 กรัมต่อตัวต่อวัน, 1.68 กิโลกรัม และ 0.02 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ) ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตาม แพะที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวไม่แตกต่างกันกับแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (13.87 และ 12.87 ตามลำดับ) นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในกระเพาะรูเมน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ส่วนกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทริก และสัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักในกระเพาะรูเมน

คำสำคัญ: แพะลูกผสม, การให้อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัด, สมรรถภาพการเจริญเติบโต, กรดไขมันระเหยง่าย

1. บทนำ

แพะเป็นสัตว์เคี้ยวเอื้องขนาดเล็กที่ให้ผลผลิตเร็ว เป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ อีกทั้งยังมีความเกี่ยวข้องกับวิถีชีวิต สังคม ประเพณี ศาสนาและวัฒนธรรมของประชาชนในพื้นที่ภาคใต้ (Wattanachan, 2019) เนื่องจากมีผู้ที่นับถือศาสนาอิสลามที่บริโภคเนื้อแพะ และยังใช้แพะในการประกอบพิธีกรรมทางศาสนา (Cheva-Isarakul, 2003) โดยในปี พ.ศ. 2565 มีแพะจำนวน 1,505,381 ตัว และมีจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะ 92,997 ราย เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2564 คิดเป็นร้อยละ 17.87 และ 9.44 ตามลำดับ (Department of Livestock Development, 2022) ซึ่งเกษตรกรส่วนใหญ่จะเลี้ยงแบบปล่อยให้แพะหากินเองตามธรรมชาติ ส่งผลให้สมรรถภาพการเจริญเติบโตค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้อาจมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น สายพันธุ์แพะเนื้อคุณภาพการเลี้ยง และการจัดการด้านอาหาร เป็นต้น Prajakboonjatsada *et al.* (2014) รายงานว่า การศึกษาวิจัยและพัฒนาด้านการจัดการอาหารส่วนใหญ่จะอ้างอิงข้อมูลจากต่างประเทศซึ่งมีสภาพแวดล้อมและการจัดการที่ไม่เหมือนกับสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น จึงทำให้ความต้องการโภชนาแตกต่างกันด้วย ซึ่ง NRC (2001) แนะนำว่า ปริมาณความต้องการอาหารของแพะเนื้อมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักตัว พันธุ์ อายุ ผลผลิต การจัดการการเลี้ยงและสภาพแวดล้อม เช่น ถ้าเลี้ยงแพะพันธุ์บอร์ระยะเจริญเติบโตที่มีน้ำหนักตัว 10, 20 และ 30 กิโลกรัม แพะต้องการโปรตีนใช้ประโยชน์ได้วันละ 17, 29 และ 39 กรัมตามลำดับ และถ้าแพะมีอัตราการเจริญเติบโตวันละ 100 กรัม ต้องการโปรตีนใช้ประโยชน์ได้เพิ่มอีกวันละ 41, 40 และ 41 กรัมตามลำดับ ซึ่งแพะต้องได้รับอาหารที่มีทั้งปริมาณและคุณภาพที่ดี หากได้รับโภชนาต่าง ๆ มากเกินไปจะเกิดผลเสียต่อสมรรถนะด้านการสืบพันธุ์ มีปริมาณไขมันสะสมในซากมากเกินไป ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง ซึ่งแพะเป็นสัตว์เคี้ยวเอื้องที่สามารถปรับตัว

ภายใต้สภาวะการได้รับอาหารในปริมาณที่จำกัดได้ โดยการลดอัตราการเผาผลาญซึ่งเป็นกลไกการปรับตัวเพื่อการอยู่รอด (Asmare *et al.*, 2006; Helal *et al.*, 2011; Ahmed, 2016)

Esraa *et al.* (2014) ทำการศึกษาผลของการให้อาหารแบบจำกัดต่อสมรรถภาพทางสรีรวิทยาของลูกแพะพันธุ์นูเบียนเพศผู้ อายุ 2-3 เดือน จำนวน 12 ตัว ที่มีน้ำหนักตัวเฉลี่ย 9.5 กิโลกรัม แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ๆ ละ 4 ตัว ให้ได้รับอาหารแบบจำกัด ดังนี้ กลุ่ม A ให้กินอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มที่กินเต็มที่ (จำกัดอาหาร 30 เปอร์เซ็นต์) กลุ่ม B ให้กินอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มที่กินเต็มที่ (จำกัดอาหาร 60 เปอร์เซ็นต์) และกลุ่ม C ให้กินอาหารแบบเต็มที่ (กลุ่มควบคุม) เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มที่ให้กินอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มที่กินเต็มที่ (จำกัดอาหาร 30 เปอร์เซ็นต์) มีน้ำหนักตัวไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) กับกลุ่มที่ให้กินอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มที่กินเต็มที่ (จำกัดอาหาร 60 เปอร์เซ็นต์) (13.00 ± 0.96 และ 12.00 ± 2.83 กิโลกรัม ตามลำดับ) แต่แตกต่างกับกลุ่มที่ให้กินอาหารแบบเต็มที่ (กลุ่มควบคุม) (14.00 ± 1.25 กิโลกรัม) ($P < 0.05$) นอกจากนี้ Choshniak *et al.* (1995) รายงานว่า แพะเบดูอิน (Bedouin) ที่ได้รับอาหารเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ของแพะที่ได้รับอาหารแบบให้กินเต็มที่ มีการผลิตความร้อนลดลงจนอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อการคงสภาพน้ำหนักตัวเพื่อการดำรงชีพ ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักตัวจะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการจำกัดปริมาณอาหาร (Fowl and Church, 1973) อย่างไรก็ตาม หากมีการให้อาหารในปริมาณที่จำกัด นอกจากจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตแล้ว ยังสามารถช่วยลดต้นทุนค่าอาหารที่มีค่าใช้จ่ายสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนการผลิตทั้งหมดได้ ซึ่งการจัดการด้านอาหารจะเป็นแนวทางในการประกอบสูตรอาหารสำหรับแพะเนื้อได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สอดคล้องกับความต้องการของแพะเนื้อแต่ละระยะ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงแพะเนื้อของประเทศไทยต่อไป ดังนั้น การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการให้

อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัดต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะลูกผสม เพศผู้ตอน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สัตว์ทดลอง

จริยธรรมการวิจัยในสัตว์ทดลอง เลขที่โครงการ 2023-SAT05-065 เลขที่ใบอนุญาตใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ U1-11344-2566 โดยใช้แพะลูกผสม เพศผู้ ซึ่งมีระดับสายเลือด 50 เปอร์เซนต์บอร์ x 25 เปอร์เซนต์แองโกลนูเบียน x 25 เปอร์เซนต์พื้นเมือง หลังหย่านม อายุประมาณ 4 เดือน น้ำหนักเฉลี่ย 21.57 ± 0.55 กิโลกรัมต่อตัว จำนวน 15 ตัว ทำการสุ่มแบ่งแพะออกเป็น 3 กลุ่ม ๆ ละ 5 ตัว ก่อนนำแพะเข้าทดลองจะทำการตอนแพะโดยวิธีการผ่าตัดเอาลูกอัณฑะออก (castration) และรักษาแผลจนหายเป็นปกติ และแพะทุกตัวจะได้รับการถ่ายพยาธิภายในและภายนอกด้วยยาถ่ายพยาธิ IVOMAX-F ในอัตราส่วนยา 1 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตัว 50 กิโลกรัม และฉีดวิตามิน AD₃E ในอัตราส่วนยา 1 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตัว 20 กิโลกรัม จากนั้นนำมาปรับสภาพ

สัตว์ทดลองเพื่อให้คุ้นเคยกับคอก และอาหารก่อนการเก็บข้อมูลประมาณ 2 สัปดาห์ โดยเลี้ยงแพะในคอกทดลองแบบขังเดี่ยวขนาด 1.0 × 1.5 เมตร คอกละ 1 ตัว มีน้ำสะอาดและแร่ธาตุให้กินตลอดเวลา

2.2 อาหารทดลอง

แพะทดลองจะได้รับอาหารผสมครบส่วน (Total Mixed Ration, TMR) ซึ่งกำหนดให้มีคุณค่าทางโภชนาสำหรับอัตราการเจริญเติบโต 150 กรัมต่อวัน ตามคำแนะนำของ NRC (1981) โดยอาหารผสมครบส่วนที่ใช้ในการทดลองจะมีหญ้าแพงโกลาแห้งเป็นแหล่งอาหารหลักและมีสัดส่วนของอาหารอื่น : อาหารหยาบเท่ากับ 65 : 35 สูตรอาหารและองค์ประกอบทางเคมี (Table 1) โดยแบ่งให้อาหารวันละ 2 ครั้ง คือ ช่วงเช้า เวลา 9.00 น. และช่วงบ่าย เวลา 15.00 น. บันทึกปริมาณอาหารที่ให้และที่เหลือของแพะทุกตัวตลอดการทดลอง และปรับปริมาณอาหารที่ใช้เลี้ยงแพะในกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบจำกัดทุกวันโดยให้ในระดับ 70 เปอร์เซนต์และ 40 เปอร์เซนต์ของกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่

Table 1 Feed ingredients and chemical composition

Ingredients	(kg.DM)
Pangola hay	35.00
Soybean meal	25.00
Corn meal	5.00
Cassava chip	29.50
Molasses	3.00
Premix	2.50
Total	100
Chemical composition	% on dry basis
Dry matter	69.74
Organic matter ^{1/}	86.52
Crude protein	17.82
Ether extract	1.08
Ash	13.48
Crude fiber	16.85
Neutral detergent fiber	35.05
Acid detergent fiber	21.87
Gross energy (calories/gram)	4,000.90

^{1/} Organic matter = 100 - Ash

2.3 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 90 วัน โดยสุ่มให้แพะได้รับอาหารตามแต่ละกลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 (T1) ได้รับอาหารผสมครบส่วนแบบกินเต็มที่ (*ad libitum*, AL)
กลุ่มที่ 2 (T2) ได้รับอาหารผสมครบส่วน 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL
กลุ่มที่ 3 (T3) ได้รับอาหารผสมครบส่วน 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL

2.4 การเก็บข้อมูลและการเก็บตัวอย่าง

1. บันทึกปริมาณอาหารที่กินตลอดการทดลอง และเก็บข้อมูลน้ำหนักตัวทุกสัปดาห์ตลอดการทดลอง 90 วัน เพื่อศึกษาปริมาณการกินได้ (Feed Intake, FI) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว (Feed Conversion Ratio, FCR) และอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (Average Daily Gain, ADG)

2. สุ่มเก็บตัวอย่างอาหารผสมครบส่วนทุกครั้งที่มีการผสมอาหารใหม่ เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ วัตถุแห้ง (dry matter, DM) โปรตีน (crude protein, CP) ไขมัน (ether extract, EE) และเถ้า (ash) โดยใช้วิธี Proximate analysis (AOAC, 1990) วิเคราะห์ผนังเซลล์ (neutral detergent fiber, NDF) และลิกโนเซลลูโลส (acid detergent fiber, ADF) ด้วยวิธี detergent method (Van Soest *et al.*, 1991) วิเคราะห์พลังงานรวม (Gross energy, GE) ของอาหารโดยใช้เครื่อง IKA-Bomb calorimeter system C2000 adiabatic

3. เก็บตัวอย่างของเหลวจากกระเพาะรูเมน (Rumen Fluid) ในวันสุดท้ายของการทดลอง โดยทำการเก็บตัวอย่างของเหลวจากกระเพาะรูเมนของสัตว์ทดลองก่อนให้อาหาร (0 ชั่วโมง) และหลังการให้อาหาร 4 ชั่วโมง โดยใช้ stomach tube ร่วมกับ vacuum pump สุ่มตัวอย่างของเหลวจากกระเพาะรูเมนปริมาณ 100 มิลลิลิตร นำมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างทันที โดยใช้ pH electrode จากนั้นสุ่มเก็บปริมาณ 60 มิลลิลิตร ใส่ขวดพลาสติกปริมาณ 100 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อของเหลวจากกระเพาะรูเมน 10 มิลลิลิตร เพื่อหยุดการทำงานของจุลินทรีย์ แล้วปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาทีเก็บเอาเฉพาะส่วนใส (Supernatant) ปริมาณ 10-15 มิลลิลิตร นำไปเก็บไว้ที่ตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หากรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Fatty Acids, TVFAs) กรดไขมันที่ระเหยง่ายที่สำคัญ ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) และกรดบิวทิริก (Butyric acid) โดยใช้ Gas Chromatography วัดแปลงตามการวิเคราะห์ของ Josefa *et al.* (1999)

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely

Randomized Design, CRD) และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Statistical Analysis System (SAS, 1996) ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test (Steel and Torrie, 1980)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ปริมาณการกินได้

ผลของการให้อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัดต่อปริมาณการกินได้ของแพะลูกผสม เพศผู้ตอน (Table 2) พบว่า ปริมาณอาหารที่กินในสภาพสดของกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ (1,462.70 กรัมต่อตัวต่อวัน) มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (1,012.00 กรัมต่อตัวต่อวัน) และกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (589.90 กรัมต่อตัวต่อวัน) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ส่วนปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบ พบว่า กลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ (1,020.07 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 86.16 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (705.80 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 63.34 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) และกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (411.38 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 40.53 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ มีค่าปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบเท่ากับ 86.16 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน สูงกว่ารายงานของ AFRC (1988) ที่แนะนำว่า ปริมาณอาหารที่แพะในระยะกำลังเจริญเติบโต ควรได้รับเท่ากับ 66 กรัมวัตถุดิบต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน ดังนั้น แพะในกลุ่มนี้จึงได้รับอาหารที่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตาม แพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL และกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (63.34 และ 40.53 กรัมวัตถุดิบต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ) มีค่าปริมาณการกินได้ต่ำกว่าปริมาณอาหารที่แพะควรได้รับในระยะกำลังเจริญเติบโต ซึ่งอาจจะทำให้แพะมีอัตราการเจริญเติบโตช้า ในทำนองเดียวกับกับการศึกษาของ Tahuk and Gerson (2022) ที่ทำการศึกษาผลของระดับการจำกัดปริมาณอาหารต่อประสิทธิภาพของแพะคาง (Kacang) เพศผู้ จำนวน 15 ตัว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มการทดลอง ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไม่มีการจำกัดอาหาร (กลุ่มควบคุม) กลุ่มที่ 2 ได้รับอาหาร 100% ตามความต้องการอาหารเพื่อการดำรงชีพ และกลุ่มที่ 3 ได้รับอาหาร 50% ของความต้องการอาหารเพื่อการดำรงชีพ จากการศึกษาพบว่า น้ำหนักสุดท้าย น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย และประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของแพะกลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ได้รับอาหาร 100% มีประสิทธิภาพการเจริญเติบโตดีกว่าแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 50% ของความต้องการอาหารเพื่อการดำรงชีพ

Table 2 Effects of restricted feeding total mixed ration on feed intake of crossbred castrated male goats

Items	Restricted feeding total mixed ration level ^{1/}			SEM	P-value
	T1	T2	T3		
Feed intake (g/h/d)	1,462.70 ^a	1,012.00 ^b	589.90 ^c	44.35	<.0001
Dry matter intake					
g/h/d	1,020.07 ^a	705.80 ^b	411.38 ^c	30.93	<.0001
g/kg BW ^{0.75} /h/d	86.16 ^a	63.34 ^b	40.53 ^c	1.50	<.0001
Organic matter intake					
g/h/d	882.56 ^a	610.66 ^b	355.93 ^c	26.76	<.0001
g/kg BW ^{0.75} /h/d	74.55 ^a	54.80 ^b	35.07 ^c	1.30	<.0001
Crude protein intake					
g/h/d	181.78 ^a	125.77 ^b	73.31 ^c	5.51	<.0001
g/kg BW ^{0.75} /h/d	15.35 ^a	11.29 ^b	7.22 ^c	0.27	<.0001

^{1/} T1 = *ad libitum*, AL, T2 = 70%AL, T3 = 40%AL, SEM = standard error of the mean

a, b, c Different letters in a row indicate significant differences (P < 0.05).

ปริมาณการกินได้ของอินทรียวตฤ พบว่า กลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ (882.56 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 74.55 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (610.66 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 54.80 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) และกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (355.93 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 35.07 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ปริมาณโปรตีนรวมที่กินได้ พบว่า กลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ (181.78 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 15.35 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (125.77 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 11.29 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) และกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (73.31 กรัมต่อตัวต่อวัน และ 7.22 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ มีค่าปริมาณโปรตีนรวมที่กินได้เท่ากับ 181.78 กรัมต่อตัวต่อวัน สูงกว่ารายงานของ NRC (1981) ที่แนะนำว่า ความต้องการโภชนาของแพะที่มีน้ำหนักตัว 20-30 กิโลกรัม จะมีความต้องการโปรตีนรวมเพื่อการดำรงชีพ และมีกิจกรรมต่ำอยู่ระหว่าง 46-62 กรัมต่อวัน และเพื่อการเจริญเติบโต 50, 100 และ 150 กรัมต่อวัน มีความต้องการโปรตีนรวมเท่ากับ 60-76, 74-90 และ 88-104 กรัมต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ที่มีปริมาณการกินได้ของอินทรียวตฤ และปริมาณโปรตีนรวมที่กินได้ สูงกว่ากลุ่ม 70 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL เนื่องจาก แพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ที่มีปริมาณการกินได้ในรูปของวัตถุแห้งที่สูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ จึงส่งผลให้อินทรียวตฤ และโปรตีนรวมที่กินได้สูงตามไปด้วย

3.2 สมรรถภาพการเจริญเติบโต

ผลของการให้อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัดต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของแพะลูกผสม เพศผู้ตอน (Table 3) พบว่า น้ำหนักสิ้นสุดการทดลองของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) กับกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (31.64 และ 28.41 กิโลกรัมตามลำดับ) แต่มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (22.58 กิโลกรัม) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ซึ่งแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ มีน้ำหนักสิ้นสุดการทดลองไม่แตกต่างกันกับแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL เนื่องจากแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL มีค่าปริมาณการกินได้ของวัตถุแห้ง (63.34 กรัมวัตถุแห้งต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน) ใกล้เคียงกับปริมาณอาหารที่แพะในระยะกำลังเจริญเติบโต ควรได้รับเท่ากับ 66 กรัมวัตถุแห้งต่อกิโลกรัมน้ำหนักเมแทบอลิกต่อตัวต่อวัน (AFRC, 1988) นอกจากนี้ น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ (9.55 กิโลกรัม และ 0.11 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ) มีค่าสูงสุด รองลงมา คือ กลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (7.08 กิโลกรัม และ 0.08 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ) และกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (1.68 กิโลกรัม และ 0.02 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) สอดคล้องกับการศึกษาของ Wunjan *et al.* (2019) ที่ทำการศึกษาผลของระดับโปรตีนในอาหารผสมครบส่วนต่อสมรรถภาพการผลิตของแพะนม เพศผู้ ผลการศึกษาพบว่า แพะที่ได้รับอาหารผสมครบส่วนที่ระดับโปรตีน 16-18 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 8.66-10.75 กิโลกรัม และ 95.16-118.17 กรัมต่อวัน ตามลำดับ ในด้านประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็น

น้ำหนักตัวของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) กับกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (13.87 และ 12.87 ตามลำดับ) แต่มีค่า

น้อยกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (45.38) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

Table 3 Effects of restricted feeding total mixed ration on growth performance of crossbred castrated male goats

Items	Restricted feeding total mixed ration level ^{1/}			SEM	P-value
	T1	T2	T3		
Experimental period (day)	90	90	90		
Initial body weight (kg)	22.09	21.33	21.28	0.55	0.8024
Final body weight (kg)	31.64 ^a	28.41 ^a	22.58 ^b	0.83	0.0027
Body weight gain (kg)	9.55 ^a	7.08 ^b	1.68 ^c	0.38	<.0001
Average daily gain (kg/h/d)	0.11 ^a	0.08 ^b	0.02 ^c	0.005	<.0001
Feed conversion ratio	13.87 ^b	12.87 ^b	45.38 ^a	4.28	0.0200

^{1/} T1 = *ad libitum*, AL, T2 = 70%AL, T3 = 40%AL, SEM = standard error of the mean

a, b, c Different letters in a row indicate significant differences ($P < 0.05$).

Table 4 Effects of restricted feeding total mixed ration on pH and volatile fatty acids in rumen fluid of crossbred castrated male goats

Items	Restricted feeding total mixed ration level ^{1/}			SEM	P-value
	T1	T2	T3		
pH					
0 hr. – post feeding	6.99	7.21	6.90	0.08	0.33
4	6.56	6.76	6.66	0.04	0.20
mean	6.78	6.99	6.78	0.05	0.27
Total volatile fatty acids, TVFAs (mmol/L)					
0 hr. – post feeding	37.91	27.48	21.01	3.80	0.29
4	39.57 ^a	14.21 ^b	15.90 ^b	2.95	0.02
mean	38.74 ^a	23.35 ^b	17.37 ^b	0.08	0.03
Acetic acid, C ₂ (mmol/L)					
0 hr. – post feeding	26.76	19.20	14.77	2.85	0.32
4	23.20 ^a	11.47 ^b	9.94 ^b	1.47	0.02
mean	24.98 ^a	15.34 ^{ab}	11.42 ^b	1.83	0.05
Propionic acid, C ₃ (mmol/L)					
0 hr. – post feeding	6.58	4.84	3.57	0.59	0.22
4	11.24 ^a	5.11 ^b	3.69 ^b	0.41	0.0006
mean	8.91 ^a	4.98 ^b	3.56 ^b	0.42	0.0049
Butyric acid, C ₄ (mmol/L)					
0 hr. – post feeding	4.57	3.45	2.68	0.49	0.39
4	5.14 ^a	2.63 ^b	2.28 ^b	0.40	0.05
mean	4.86 ^a	3.04 ^{ab}	2.40 ^b	0.38	0.09
C2:C3 ratio					
0 hr. – post feeding	4.03	3.98	4.12	0.30	0.99
4	2.04	2.32	2.71	0.14	0.21
mean	3.03	3.15	3.22	0.20	0.93

^{1/} T1 = *ad libitum*, AL, T2 = 70%AL, T3 = 40%AL, SEM = standard error of the mean

a, b Different letters in a row indicate significant differences ($P < 0.05$).

3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และกรดไขมันระเหยง่ายของของเหลวในกระเพาะรูเมน

ผลของการให้อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัดต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของของเหลวในกระเพาะรูเมนของแพะในช่วงเวลา 0 และ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ย (Table 4) พบว่า ค่า pH ของของเหลวในกระเพาะรูเมนของแพะในแต่ละกลุ่มทั้งในช่วงเวลา 0 และ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ($P>0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.78-6.99 ซึ่งเป็นระดับ pH ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในกระเพาะรูเมน เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ระหว่าง 0 และ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร พบว่า ค่า pH ที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหารจะลดต่ำลง (6.56-6.76) สอดคล้องกับ Wanapat (1990) ที่รายงานว่า ค่า pH ลดต่ำลง (6.18-6.31) ในชั่วโมงที่ 4 หลังการให้อาหาร อาจเนื่องมาจากเป็นช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการหมักสูงสุด ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมในกระเพาะรูเมนอยู่ในช่วง 6.5-7.0 เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายเยื่อใย และย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะรูเมน (Mesang *et al.*, 2011) ส่วนกรดไขมันระเหยง่ายของของเหลวในกระเพาะรูเมนของแพะที่ได้รับอาหารผสมครบส่วนแบบจำกัด พบว่า กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร มีค่าอยู่ในช่วง 21.01-37.91 มิลลิโมลต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ยของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็ม (39.57 และ 38.74 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ) มีค่าสูงกว่ากลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (14.21 และ 23.35 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ) และกลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (15.90 และ 17.37 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

กรดอะซิติกที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร มีค่าอยู่ในช่วง 14.77-26.76 มิลลิโมลต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนกรดอะซิติกที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหารของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็ม (23.20 มิลลิโมลต่อลิตร) มีค่าสูงกว่ากลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (11.47 มิลลิโมลต่อลิตร) และกลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (9.94 เปอร์เซ็นต์) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของกรดอะซิติกของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็ม (24.98 มิลลิโมลต่อลิตร) และกลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (15.34 มิลลิโมลต่อลิตร) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (11.42 มิลลิโมลต่อลิตร) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

กรดโพรพิโอนิกที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร มีค่าอยู่ในช่วง 3.57-6.58 มิลลิโมลต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนกรดโพรพิโอนิกที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และ

ค่าเฉลี่ยของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็ม (11.24 และ 8.91 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ) มีค่าสูงกว่ากลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (5.11 และ 4.98 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ) และกลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (3.69 และ 3.56 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

กรดบิวทิริกที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร มีค่าอยู่ในช่วง 2.68-4.57 มิลลิโมลต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนกรดบิวทิริกที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหารของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็ม (5.14 มิลลิโมลต่อลิตร) มีค่าสูงกว่ากลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (2.63 มิลลิโมลต่อลิตร) และกลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (2.28 มิลลิโมลต่อลิตร) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของกรดบิวทิริกของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็ม (4.86 มิลลิโมลต่อลิตร) และกลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (3.04 มิลลิโมลต่อลิตร) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL (2.40 มิลลิโมลต่อลิตร) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

นอกจากนี้ สัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ย มีค่าอยู่ในช่วง 3.98-4.12, 2.04-2.71 และ 3.03-3.22 ตามลำดับ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งสัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกมีค่าปกติอยู่ในช่วง 1-4 (Wanapat, 1990) การทดลองในครั้งนี้ พบว่า ค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริกในกระเพาะรูเมนของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่มีค่าสูงกว่ากลุ่มของแพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม AL แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริกมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 17.37-38.74, 11.42-24.98, 3.56-8.91 และ 2.40-4.86 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Cheva-Isarakul (1998) ที่รายงานว่า กรดไขมันระเหยง่ายที่มีมากที่สุด คือ กรดอะซิติก ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด เมื่อสัดส่วนของอาหารข้นเพิ่มขึ้น กรดอะซิติกจะลดลง และกรดโพรพิโอนิกจะเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปพบว่า มีประมาณ 18-20 เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ส่วนกรดบิวทิริกจะพบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ซึ่งสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร โดยสัตว์ที่ได้รับอาหารหยาบสูงชันจะมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของกรดอะซิติกสูงชัน แต่สัตว์ที่ได้รับอาหารข้นสูงจะมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของกรดโพรพิโอนิกสูงชันด้วย ในทำนองเดียวกันกับ Wanapat (1990) ที่รายงานว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริกมีค่า 62, 22 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4. สรุป

ผลของการให้อาหารผสมครบส่วนแบบจำกัดต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะลูกผสม เพศผู้ตอน พบว่า ปริมาณการกินได้ น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยของแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ มีค่าสูงกว่าแพะกลุ่มที่ได้รับอาหาร 70 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ อย่างไรก็ตาม แพะที่ได้รับอาหาร 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวไม่แตกต่างกันกับแพะกลุ่มที่ได้รับอาหารแบบกินเต็มที่ ในด้านกระบวนการหมักในกระเพาะรูเมน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในกระเพาะรูเมน ส่วนกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก และสัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักในกระเพาะรูเมน

5. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาต้นทุนค่าอาหารที่เกิดจากการจำกัดปริมาณอาหาร เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตแพะลูกผสมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ นครศรีธรรมราช และสาขาวิชาวิทยาการเกษตรและประมง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ และสัตว์ทดลอง รวมทั้งคณาจารย์ นักศึกษามัธยมศึกษา และบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนร่วมให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- AFRC. 1988. **The nutrition of goat**. CAB International, New York.
- Ahmed, A. 2016. Effect of long-term restricted feeding on digestion and energy utilization in Balady vs. Shami goats. **Livestock Science** 185: 61-67.
- AOAC. 1990. **Official methods of analysis, 15th edition association of official analytical chemists**. Virginia, USA.
- Asmare, A., Puchala, R., Merkel, R.C., Sahl, T. and Goetsch, A.L. 2006. Changes in energy expenditure by meat goats with varying levels of feed intake near

maintenance and below. **Journal of Applied Animal Research** 29(2): 81-89.

- Cheva- Isarakul, B. 1998. **Animal nutrition**. Faculty of Agriculture, Chiang Mai University. (in Thai)
- Cheva-Isarakul, B. 2003. **Raising and management of goat**. Faculty of Agriculture, Chiang Mai University. (in Thai)
- Choshniak, I., Ben-Kohav, N., Taylor, C.R., Robertshaw, D., Barnes, R.J., Dobson, A., Belkinb, V. and Shkolnik, A. 1995. Metabolic adaptations for desert survival in the Bedouin goat. **The American Journal of Physiology** 268(5 Pt 2): 1101-1110.
- Department of Livestock Development. 2022. **Number of livestock in Thailand in 2022**. Information and Communication Technology Center. Department of Livestock Development. Available Source: <https://ict.dld.go.th/webnew/index.php/th/service-ict/report/355-report-thailand-livestock/animal-book/1714-2565>, June 13, 2023.
- Esraa, M.H.E., Osama, H.A.A. and Khalid, A.A. 2014. Effect of restricted feeding on physiological performance in male Nubian goat kids. **Research Opinions in Animal and Veterinary Sciences** 4(9): 479-483.
- Fowl, K.E. and Church, D.C. 1973. Effect of antinutritionally poor ration, short term fasting and refeeding on goats. **American Journal of Veterinary Research** 34: 849-852.
- Helal, A., Puchala, R., Detweiler, G.D., Gipson, T.A., Sahl, T. and Goetsch, A.L. 2011. Effects of restricted feed intake on energy expenditure by different goat genotypes. **Journal of Animal Science** 89: 4175-4187.
- Josefa, M., Dolores, M. M. and Fuensanta, H. 1999. Determination of short chain volatile fatty acid in silage from artichoke and orange by-products by capillary gas chromatography. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 79: 580-589.
- Mesang, A., Chanjula, P., Ngampongsai, W. and Lawpetchara, A. 2011. Effects of using palm kernel cake in concentrate on digestibility and rumen ecology of goats. **Journal of Agriculture** 27(1): 87-99. (in Thai)
- NRC. 1981. **Nutrient Requirements of Goats: Angora, Dairy and Meat Goats in Temperate and Tropical Countries**. National Research Council. National Academy of Science, Washington, DC.

- NRC. 2001. **Nutrient Requirements of Dairy Cattle** (7th ed).
National Research Council, National Academic Press,
Washington, D.C.
- Prajakboonjatsada, S., Ritruetchai, V. and Chobtang, J. 2014.
**Research Report on Effects of protein level on
growth performance of 1-2 years Boer crossbred
goats**. Department of Livestock Development, Ministry
of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Statistical Analysis System (SAS). 1996. **SAS/STAT User's
Guide: Statistics**. SAS Institute, Cary, North Carolina,
Washington, D.C.
- Steel, R.G.D. and Torrie, J.H. 1980. **Principles and procedures
of statistics: A biomaterial approach** (2nd ed).
McGraw-Hill, New York.
- Tahuk, P.K. and Gerson, F.B. 2022. The effect of different
feed restriction levels on the performance of young
male kacang goats. **Advances in Animal and
Veterinary Sciences** 11(1): 141-149.
- Van Soest, P.J., Robertson, J.B. and Lewis, B.A. 1991.
Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and
nonstarch polysaccharides in relation to animal
nutrition. **Journal of Dairy Science** 74: 3583-3597.
- Wanapat, M. 1990. **Ruminant nutrition**. Funny Publishing,
Bangkok. (in Thai)
- Wattanachan, C. 2019. **Meat goat production and good
quality of goat meat**. S-Print (2004), Songkhla. (in Thai)
- Wunjan, J., Yammuen-art, S. and Moonmanee, T. 2019. Effects
of protein levels in total mixed rations on productive
performance of male dairy goats. **Khon Kaen
Agriculture Journal** 47(2): 741-746. (in Thai)

Research Article

ผลของรูปแบบการให้อาหารต่อปริมาณการกินได้ การใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ
และค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะเนื้อลูกผสม

**Effects of Feeding Patterns on Feed Intake, Nutrient Utilization and Volatile Fatty Acids
in the Rumen of Crossbred Meat Goat**

เกศกนก บุญรอด ^{a,b}, เทียนทิพย์ ไกรพรหม ^{a,*}, ศณาลักษณ์ ทรัพย์ศิริ ^{a,b} และ อูมาพร แพทย์ศาสตร์ ^c

Katekanok Boonrord ^{a,b}, Thaintip Kraiprom ^{a,*}, Sanalak Sapsiri ^{a,b} and Umaporn Pastsart ^c

^a คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

^a Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani campus, Muang, Pattani 94000, Thailand.

^b ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครศรีธรรมราช อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80130

^b Nakhon Si Thammarat Animal Nutrition Research and Development Center, Ronphibun, Nakhon Si Thammarat 80130, Thailand.

^c โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และประมง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000

^c Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani campus, Muang, Surat Thani 84000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-02-28

Revised: 2024-08-15

Accepted: 2024-09-02

Keywords:

crossbred meat goat;

feed intake;

nutrient digestibility;

volatile fatty acids

The objectives of this research were to study the effects of feeding patterns on feed intake, nutrient utilization, and volatile fatty acids in the rumen of crossbred meat goat. Twenty male crossbred meat goats with an average initial body weight of 19.59±0.98 kg and age 3-4 months were used. The experimental design was an independent T-test conducted over a period of 90 days. The goat were divided into two groups: Group 1 was fed a TMR with a protein level of 16 percent, while Group 2 was fed a concentrate with the same protein level of 16 percent and fed Napier Pak Chong 1 grass ad libitum. The results showed that feed intake (CP, EE and Ash) and nutrient digestibility (OM, CP, EE, Ash, CF, NDF and ADF) of goats fed the TMR diets were significantly higher than those fed the separated diet (P<0.05). However, the feeding pattern had no effect on the volatile fatty acids in the rumen, which remained within the normal range of 42.61-54.08 mmol/L (P>0.05). In conclusion, feeding patterns affect feed intake and nutrient utilization but do not influence the concentration of volatile fatty acids in the rumen.

* Corresponding author.

E-mail address: thaintip@gmail.com

Cite this article as:

Boonrord, K., Kraiprom, T., Sapsiri, S. and Pastsart, U. 2025. Effects of Feeding Patterns on Feed Intake, Nutrients Utilization and Volatile Fatty Acids in The Rumen of Crossbred Meat Goat. *Recent Science and Technology* 17(3): 262331.

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการให้อาหารต่อปริมาณการกินได้ การใช้ประโยชน์ได้ของโภชนา และค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะเนื้อลูกผสม โดยใช้แพะเนื้อลูกผสมกาลาฮารีเรด 50 เปอร์เซ็นต์ x แองโกลนูเบียน 25 เปอร์เซ็นต์ x พื้นเมือง 25 เปอร์เซ็นต์ เพศผู้ อายุประมาณ 3-4 เดือน น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 19.59 ± 0.98 กิโลกรัม จำนวน 20 ตัว แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 10 ตัว เป็นระยะเวลา 90 วัน ใช้สถิติแบบ Independent t-test เปรียบเทียบรูปแบบการให้อาหาร 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 อาหารผสมแบบครบส่วนที่มีระดับโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์ ให้กินแบบเต็มที่ และกลุ่มที่ 2 อาหารแบบแยกส่วน คือ อาหารชั้นที่มีระดับโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ในระดับ 1.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก ให้กินแบบเต็มที่ พบว่า กลุ่มที่ 1 มีปริมาณการกินได้ ได้แก่ โปรตีนรวม ไขมันรวม และเถา และค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนา ได้แก่ อินทรีย์วัตถุ โปรตีนรวม ไขมันรวม เถา เยื่อใยรวม ผงเชลล์ และลิกโนเซลลูโลส สูงกว่ากลุ่มที่ 2 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตาม รูปแบบการให้อาหารไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะและมีค่าอยู่ในช่วงปกติคือ 42.61-54.08 มิลลิโมลต่อลิตร ($P > 0.05$) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า รูปแบบการให้อาหารส่งผลกระทบต่อปริมาณการกินได้ และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนา แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในกระเพาะรูเมน

คำสำคัญ: แพะเนื้อลูกผสม, ปริมาณการกินได้, สัมประสิทธิ์การย่อยได้, กรดไขมันระเหยง่าย

1. บทนำ

แพะนับเป็นปศุสัตว์อีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นสัตว์ที่เลี้ยงง่าย โตไว ใช้พื้นที่ในการเลี้ยงน้อย และให้ผลตอบแทนเร็ว (Pitcha, 2022) ต้นทุนในการเลี้ยงแพะอยู่ที่ค่าอาหารเป็นหลักเพื่อให้แพะเจริญเติบโตดี แข็งแรงและได้น้ำหนักเนื้อดี (Annukanon, 2017) กรมปศุสัตว์ได้รับมอบหมายให้ดำเนินการส่งเสริมการเลี้ยงแพะเพื่อเป็นอาชีพเสริมให้แก่เกษตรกรในพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนังเพื่อแก้ปัญหาความยากจน มีพื้นที่รวม 7 อำเภอ ของจังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่ อำเภอหัวไทร อำเภอเชียรใหญ่ อำเภอปากพนัง อำเภอเฉลิมพระเกียรติ อำเภอร่อนพิบูลย์ อำเภอจุฬาภรณ์ และอำเภอชะอวด ต่อมามีการจัดตั้งเครือข่ายผู้ผลิตและจำหน่ายแพะลุ่มน้ำปากพนังขึ้นใน ปี พ.ศ. 2555 เพื่อทำการผลิตให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาด โดยการขับเคลื่อนของกลุ่มอยู่ภายใต้หลักคิด “ร่วมกันคิด แยกกันผลิต รวมกันขาย” และต่อมาในปี พ.ศ. 2560 ได้รับอนุมัติให้เป็น “แปลงใหญ่แพะลุ่มน้ำปากพนัง” พร้อมทั้งได้จัดตั้งองค์กรในรูปแบบวิสาหกิจ ชื่อว่า “วิสาหกิจชุมชนแปลงใหญ่แพะลุ่มน้ำปากพนัง” โดยกลุ่มมีเป้าหมายที่จะเพิ่มศักยภาพการผลิตแพะขุนให้มากขึ้น โดยเกษตรกรในพื้นที่มีการให้อาหารแพะในหลากหลายรูปแบบ เช่น อาหารผสมแบบครบส่วน (Total Mixed Ration; TMR) และอาหารแบบแยกส่วน ซึ่งการให้อาหารนั้นจะแตกต่างกันไปตามประสบการณ์ และการแนะนำของสมาชิกผู้เลี้ยงแพะด้วยกันเอง ซึ่งการให้อาหารในรูปแบบอาหารผสมแบบครบส่วนนั้น Pornjantuek (2015) ได้ทำการศึกษาแพะเนื้อลูกผสมพื้นเมือง-แองโกลนูเบียนที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วนโดยมีสัดส่วนอาหารชั้นต่ออาหารหยาบ 70:30 เปอร์เซ็นต์ มีระดับโปรตีนหยาบ 14 เปอร์เซ็นต์ และพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (Metabolizable Energy, ME) เท่ากับ 2.4 Mcal/kgDM ใช้ฟางข้าวเป็นแหล่งอาหารหยาบ พบว่า มีปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบเท่ากับ 688.11 กรัมต่อตัวต่อวัน ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุดิบ อินทรีย์วัตถุ และโปรตีนรวม เท่ากับ 74.24, 78.45 และ 76.89

เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมดเท่ากับ 56.99 มิลลิโมลต่อลิตร ในส่วนของการให้อาหารในรูปแบบอาหารแบบแยกส่วนนั้น Mesang *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาแพะเนื้อลูกผสมพื้นเมืองแองโกลนูเบียน 50 เปอร์เซ็นต์ ที่เลี้ยงด้วยหญ้าฟลิคคูลัมแห้งเสริมด้วยอาหารชั้นที่มีระดับโปรตีน 15 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (Metabolizable Energy, ME) เท่ากับ 2.78-2.89 Mcal/kgDM ในระดับ 2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักตัว พบว่า มีปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบ อินทรีย์วัตถุ และโปรตีนรวม เท่ากับ 768, 717 และ 94 กรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุดิบ อินทรีย์วัตถุ และโปรตีนรวม เท่ากับ 72.11, 73.48 และ 69.28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 57.70-59.59 มิลลิโมลต่อลิตร แต่ยังไม่มีความชัดเจนเพื่อยืนยันได้ว่าการให้อาหารรูปแบบใดส่งต่อศักยภาพการผลิตและสุขภาพของแพะในพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนังได้ดีที่สุด รวมทั้งในพื้นที่มีกษัตริย์แคลนอาหารสัตว์ โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนซึ่งมักเกิดน้ำท่วมขึ้นทุกปี (พฤศจิกายน-มกราคม) ทำให้มีความไม่สม่ำเสมอของอาหารที่นำมาใช้เลี้ยงแพะขุนส่งผลกระทบต่อผลิตแพะเนื้อเชิงคุณภาพขึ้นภายในพื้นที่ รวมทั้งหากมีการจัดการด้านโภชนาให้เหมาะสมตรงกับความต้องการของแพะก็จะสามารถเพิ่มมูลค่าด้านการผลิตและด้านสุขภาพของแพะได้มากขึ้น กอปรกับกลุ่มมีความต้องการสูตรอาหารที่เหมาะสมและมีคุณภาพใช้กันเองภายในพื้นที่เพื่อผลิตแพะขุนเชิงคุณภาพและให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณการกินได้ การใช้ประโยชน์ได้ของโภชนา และค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมน เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตและสุขภาพแพะขุนในพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนังให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สัตว์ทดลองและอาหาร

ใช้แพะเนื้อลูกผสม คาลาฮารีเรด 50 เปอร์เซ็นต์ x แองโกลนูเบียน 25 เปอร์เซ็นต์ x พื้นเมือง 25 เปอร์เซ็นต์ เพศผู้ หลังหย่านม อายุประมาณ 3-4 เดือน น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 19.59 ± 0.98 กิโลกรัม จำนวน 20 ตัว ซึ่งได้ผ่านการพิจารณาและเห็นชอบจากคณะกรรมการกำกับดูแลการเลี้ยงและใช้สัตว์ของสถาบันมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่โครงการ 2023-SAT07-064 หมายเลขการขออนุญาตใช้สัตว์ทดลอง Ref.AG071/2023 แบ่งแพะออกเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 10 โดยใช้สถิติแบบ Independent t-test เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการให้อาหารที่แตกต่างกัน 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 อาหารผสมแบบครบส่วนที่มีสัดส่วนของอาหารหย่านมต่ออาหารข้นเท่ากับ 60:40 มีระดับโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (Metabolizable energy; ME) เท่ากับ 2.4 Mcal/kg.DM โดยให้กินแบบเต็มที่

กลุ่มที่ 2 อาหารแบบแยกส่วนโดยให้อาหารข้นที่มีระดับโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (Metabolizable energy; ME) เท่ากับ 2.4 Mcal/kg.DM ในระดับ 1.5 เปอร์เซ็นต์

ของน้ำหนักตัว และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก เป็นแหล่งอาหารหย่านมโดยให้กินแบบเต็มที่

ใช้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก เพื่อเป็นแหล่งอาหารหย่านมในรูปแบบการให้อาหารทั้ง 2 รูปแบบ โดยตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่อายุ 60 วัน นำมาสับให้มีขนาด 1-2 เซนติเมตร บรรจุใส่ถังพลาสติกขนาดบรรจุ 120 ลิตร อัดให้แน่นใส่อากาศออกให้หมดและใช้ถุงพลาสติกกรองปากฝาถังด้านบนแล้วปิดล็อกฝาถังให้แน่นสนิท เพื่อให้มีสภาพไร้ออกซิเจน ใช้ระยะเวลาในการหมัก 21 วัน โดยการเตรียมอาหารผสมครบส่วน (Total Mixed Ration; TMR) และอาหารข้น มีสัดส่วนตามสูตรอาหารดังแสดงใน Table 1 แบ่งการให้อาหารออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเช้าเวลา 09.00 น. และช่วงบ่ายเวลา 15.00 น. ดำเนินการทดลองภายในฟาร์มเกษตรกร ใช้ระยะเวลาทดลอง 90 วัน บันทึกปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่เหลือทุกวันเพื่อคำนวณปริมาณการกินได้ (Feed Intake, FI) ปรับสภาพแพะก่อนเริ่มทดลอง 2 สัปดาห์ เพื่อให้แพะมีความคุ้นเคยกับคอกและอาหารทดลอง เลี้ยงแพะในคอกย่อยขังเดี่ยวขนาด 1.0×1.5 เมตร มีน้ำสะอาด และแร่ธาตุก้อนให้เลี้ยกินตลอดเวลา

Table 1 Ingredients of feed used in the study (on DM basis)

Ingredients (kg)	TMR	Separate feed
Napier Pak Chong 1 grass silage	60.00	-
Soybean meal	18.50	17.50
Oil palm meal	19.00	32.50
Rice bran	1.00	-
Soybean oil	0.50	-
Mashed cassava	-	47.00
Premixed	0.50	1.00
Dicalcium Phosphate	0.50	2.00
Total	100	100
Chemical Composition ^{1/}		
Crude protein (%)	16.00	16.00
Metabolizable energy (Mcal/kg.DM)	2.40	2.40

^{1/}Chemical Composition calculated by KCF

2.2 การเก็บข้อมูลและการเก็บตัวอย่าง

1. บันทึกปริมาณอาหารที่กินตลอดการทดลอง 90 วัน เพื่อศึกษาปริมาณการกินได้ (Feed Intake, FI) ได้แก่วัตถุแห้ง อินทรีย์วัตถุ โปรตีนรวม ไขมันรวม เถ้า เยื่อใยรวม ผงเซลล์ ลิกโนเซลลูโลส และลิกนิน

2. สุ่มเก็บตัวอย่างอาหารผสมแบบครบส่วนและอาหารข้นทุกครั้งที่มีการผสมอาหารใหม่ และหยุ่เนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3. เก็บตัวอย่างของเหลวจากกระเพาะรูเมน (rumen fluid) ในวันสุดท้ายของการทดลอง โดยทำการเก็บตัวอย่างของเหลวจากกระเพาะรูเมนของสัตว์ทดลองแต่ละกลุ่มก่อนให้อาหาร (0 ชั่วโมง) และหลังให้อาหาร (4 ชั่วโมง) โดยใช้ stomach tube ร่วมกับ vacuum pump สุ่มเก็บปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ขวดพลาสติก เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในปริมาตร 1 มิลลิลิตรต่อของเหลวจากกระเพาะรูเมน 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เก็บเฉพาะส่วนใส (Supernatant) ปริมาตร 10-15 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์หากรดไขมันที่ระเหยได้ทั้งหมด (Total Volatile Fatty acid, TVFA) และกรดไขมันที่ระเหยได้ที่สำคัญ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก

4. การเก็บตัวอย่างมูลและในช่องสุดท้ายของการทดลอง ด้วยวิธีล้างจากทวารหนักวันละ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ช่วงเช้าเวลา 08.00 น. และครั้งที่ 2 ช่วงบ่ายเวลา 14.00 น. เป็นเวลา 7 วัน ติดต่อกัน ทำการเก็บมูลและแบบรายตัวและรวบรวมมูลที่เก็บได้ซึ่งปริมาณทุกวัน หลังจากนั้นนำมูลและที่เก็บได้ไปแช่ในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส หลังจากเก็บตัวอย่างครบ 7 วัน นำตัวอย่างมูลและทั้งหมดมารวมกันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท นำมาบดผ่านตะแกรงขนาด 0.1 มม. เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีตามวิธีการของ AOAC (1990) และวิเคราะห์หาปริมาณตัวบ่งชี้ภายใน (Internal indicator) โดยวิธีเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (Acid Insoluble Ash; AIA) ตามวิธีของ Van Keulen and Young (1997) เพื่อนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การย่อยได้ตามวิธีของ Schnider and Flat (1975) โดยใช้สมการดังนี้

สัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุแห้ง (เปอร์เซ็นต์)

$$= 100 - 100 \times (\text{เปอร์เซ็นต์ AIA ในอาหาร})$$

(เปอร์เซ็นต์ AIA ในมูล)

สัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนา (เปอร์เซ็นต์)

$$= 100 - 100 \times (\text{เปอร์เซ็นต์ AIA ในอาหาร} \times \text{เปอร์เซ็นต์ โภชนา ในมูล})$$

$$(\text{เปอร์เซ็นต์ AIA ในมูล} \times \text{เปอร์เซ็นต์ โภชนา ในอาหาร})$$

2.3 การวิเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอาหารผสมแบบครบส่วน อาหารข้น หยุ่เนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก และมูลแพะ โดยใช้วิธีการของ AOAC (1990) สำหรับการวิเคราะห์ผงเซลล์ ลิกโนเซลลูโลส และลิกนิน ใช้วิธี Detergent method ของ Van Soest *et al.* (1991) การวิเคราะห์พลังงานในอาหาร โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter การวิเคราะห์กรดไขมันที่ระเหยง่ายในของเหลวจากกระเพาะรูเมน ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก ใช้ Gas Chromatography โดยดัดแปลงตามการวิเคราะห์ของ Samuel *et al.* (1997)

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบการทดลองระหว่าง 2 กลุ่ม โดยใช้สถิติแบบ Independent t-test และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistic Package for Social Science, SPSS) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอาหารที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงใน Table 2 พบว่า หยุ่เนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก ตัดที่อายุ 60 วัน พบว่ามีวัตถุแห้ง โปรตีนรวม เยื่อใยรวม ผงเซลล์ ลิกโนเซลลูโลส และลิกนิน เท่ากับ 21.54, 7.01, 40.82, 69.42, 43.99 และ 6.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกับ Taowan (2016) ที่รายงานว่าหยุ่เนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก ตัดที่อายุ 60 วัน ที่ใช้ในสูตรอาหารผสมแบบครบส่วนเลี้ยงแพะเนื้อลูกผสมมีค่าวัตถุแห้ง โปรตีนรวม เยื่อใยรวม ผงเซลล์ ลิกโนเซลลูโลส และลิกนิน มีค่าเท่ากับ 28.87, 6.74, 36.47, 54.90, 27.90 และ 14.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และใกล้เคียงกับ Pukdethai and Pichawong (2018) รายงานว่าหยุ่เนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก ตัดที่อายุ 60 วัน ที่ใช้ในสูตรอาหารผสมแบบครบส่วนเลี้ยงแพะเนื้อลูกผสมมีค่าวัตถุแห้ง โปรตีนรวม เยื่อใยรวม ผงเซลล์ และลิกโนเซลลูโลส มีค่าเท่ากับ 18.60, 8.04, 42.48, 66.31 และ 41.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Table 2 Chemical composition of Napier Pak Chong 1 grass silage, concentrate and TMR (on DM basis)

Items (%)	Napier Pak Chong 1 grass		
	silage	concentrate	TMR
Dry matter	21.54	89.54	36.92
Organic matter ^{1/}	91.23	91.40	90.07
Crude protein	7.01	16.10	17.35
Ether extract	1.55	5.03	4.15
Ash	8.77	8.60	9.93
Crude fiber	40.82	16.47	28.49
Neutral detergent fiber	69.42	36.88	54.74
Acid detergent fiber	43.99	21.23	35.62
Acid detergent lignin	6.74	4.63	4.64
Hemicellulose ^{2/}	25.43	15.65	19.12
Cellulose ^{3/}	37.25	16.60	30.98
Gross Energy, GE (cal/kg.DM)	4,065.28	4,015.38	4,134.49

^{1/} Organic matter = 100 – Ash^{2/} Hemicellulose = Neutral detergent fiber – Acid detergent fiber^{3/} Cellulose = Acid detergent fiber – Acid detergent lignin

อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบทางเคมีของอาหารข้น พบว่ามีโปรตีนรวม เท่ากับ 16.10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าโปรตีนรวมที่ได้จากการคำนวณในสูตรอาหารเท่ากับ 16.00 เปอร์เซ็นต์ และองค์ประกอบทางเคมีของอาหารผสมแบบครบส่วน พบว่ามีโปรตีนรวมเท่ากับ 17.35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าโปรตีนรวมสูงกว่าค่าจากการคำนวณในสูตรอาหาร มีค่าเท่ากับ 16.06 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผสมนั้นมีความแตกต่างกันทางด้านสายพันธุ์ การใส่ปุ๋ย อายุการเก็บเกี่ยว และฤดูกาล จึงอาจจะทำให้ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าคลาดเคลื่อนกันกับค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการคำนวณ

3.2 ปริมาณการกินได้

ผลการศึกษาปริมาณการกินได้ของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังแสดงใน Table 3 พบว่า ปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วนและอาหารแบบแยกส่วน มีค่าเท่ากับ 975.11 และ 829.25 กรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งสูงกว่า Pukdethai and Pichawong (2018) ที่รายงานว่าใช้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมักในอาหารผสมแบบครบส่วนมีปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบเท่ากับ 690 กรัมต่อตัวต่อวัน และใช้กระถินหั่นสดรวมกับให้กินแบบเต็มที่เสริมอาหารสำเร็จรูปโปรตีน 14 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 200 กรัมต่อตัวต่อวัน มีปริมาณการกินได้

ของวัตถุดิบเท่ากับ 790 กรัมต่อตัวต่อวัน ด้านปริมาณการกินได้ของอินทรีย์วัตถุ เยื่อใยรวม ผนังเซลล์ ลิกโนเซลลูโลส และลิกนินของแพะที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) กับแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วน อย่างไรก็ตาม ปริมาณการกินได้ของโปรตีนรวม ไขมันรวม และเถ้า ของแพะที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วนมีค่าเท่ากับ 169.18, 40.47 และ 96.83 กรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ สูงกว่าแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วนมีค่าเท่ากับ 84.32, 22.88 และ 72.24 กรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) สอดคล้องกับ Wannapat (1990) รายงานว่า ระดับผนังเซลล์ในอาหารหยาบที่ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการกินได้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50-60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าอาหารผสมแบบครบส่วนมีค่าระดับผนังเซลล์เท่ากับ 54.74 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงทำให้มีปริมาณการกินได้ที่สูงกว่าอาหารแบบแยกส่วนซึ่งมีค่าผนังเซลล์ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก เท่ากับ 69.40 เปอร์เซ็นต์ และผนังเซลล์ของอาหารข้น เท่ากับ 36.88 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ Goetsh *et al.* (2011) ที่รายงานว่าปริมาณการกินได้มีความสัมพันธ์กับคุณภาพของอาหารหยาบที่นำมาใช้เลี้ยงแพะด้วย ซึ่งอาหารผสมแบบครบส่วนสามารถทำให้สัตว์ใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอาหารที่มีความยากินต่ำได้ดีเนื่องจากอาหารหยาบและอาหารข้นจะถูกบดให้มีขนาดเล็กและผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Vasupen *et al.*, 2006)

Table 3 Effects of feeding patterns on feed intake in Crossbred meat goat

Items (g/h/d)	TMR	Separate	P-value	SEM ^{1/}
Dry matter intake	975.11	829.25	0.16	50.30
Organic matter intake	878.28	756.93	0.18	45.05
Crude protein intake	169.18 ^a	84.32 ^b	<0.01	12.26
Ether extract intake	40.47 ^a	22.88 ^b	<0.01	2.43
Ash intake	96.83 ^a	72.24 ^b	0.02	14.85
Crude fiber intake	277.81	268.35	0.76	5.39
Neutral detergent fiber intake	533.77	481.92	0.37	18.52
Acid detergent fiber intake	347.33	299.22	0.20	28.04
Acid detergent lignin intake	45.24	49.81	0.37	2.49

^{1/}SEM = standard error of the mean^{a, b} means in the same row with different superscript in the same factor differ significantly (P< 0.05)**Table 4** Effects of feeding patterns on nutrient digestibility in Crossbred meat goat

Items (%)	TMR	Separate feed	P-value	SEM ^{1/}
Dry matter	67.32	72.07	0.17	1.66
Organic matter	74.85 ^a	70.35 ^b	0.03	1.12
Crude protein	79.03 ^a	60.10 ^b	<0.01	3.16
Ether extract	92.87 ^a	88.56 ^b	<0.01	0.81
Ash	38.73 ^a	17.08 ^b	<0.01	3.65
Crude fiber	68.29 ^a	62.33 ^b	0.03	1.50
Neutral detergent fiber	70.95 ^a	64.23 ^b	0.03	1.66
Acid detergent fiber	68.18 ^a	58.48 ^b	<0.01	1.99

^{1/}SEM = standard error of the mean^{a, b} means in the same row with different superscript in the same factor differ significantly (P< 0.05)

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนะ

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนะของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังแสดงใน Table 4 พบว่า แพะที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วนมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของอินทรีย์วัตถุ โปรตีนรวม ไขมันรวม เถ้า เยื่อใยรวม ฟังก์ชันเซลล์ และลิกโนเซลลูโลสเท่ากับ 74.85, 79.03, 92.87, 38.73, 68.29, 70.95 และ 68.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สูงกว่าแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วนเท่ากับ 72.07, 70.35, 60.10, 88.56, 17.08, 62.33, 64.23 และ 58.48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) อาจเนื่องจากระดับของลิกโนเซลลูโลสและลิกนินในอาหารที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดลองนี้พบว่าอาหารผสมแบบครบส่วนมีค่า ลิกโนเซลลูโลสและลิกนินเท่ากับ 35.62 และ 4.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งต่างกับอาหารแบบแยกส่วนที่มีค่าลิกโนเซลลูโลสและลิกนินในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

หมัก เท่ากับ 43.99 และ 6.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าลิกโนเซลลูโลสและลิกนินในอาหารชั้นเท่ากับ 21.23 และ 4.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงทำให้แพะที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วนมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่สูงกว่า โดยระดับของลิกโนเซลลูโลสในอาหารมีความสัมพันธ์เชิงลบกับการย่อยได้ เมื่อระดับของลิกโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การย่อยได้ของโภชนะลดลง (Van Soest, 1994) อย่างไรก็ตาม Sureyajantratong (1992) ยังรายงานอีกว่าลิกนินมีผลทำให้การย่อยได้ลดลง เนื่องจากลิกนินไปห่อหุ้มรอบบริเวณผิวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าย่อยได้ และโมเลกุลของลิกนินยังไปห่อหุ้มกับสารเยื่อใยอื่น ๆ ด้วยพันธะทางเคมีทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าย่อยได้ อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุดิบของแพะที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วนเท่ากับ 67.32 เปอร์เซ็นต์ กับแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วนเท่ากับ 72.07 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)

3.4 ค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะ

ผลของการศึกษาค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะเนื้อลูกผสมที่ได้รับการให้อาหารในรูปแบบที่ต่างกัน ดังแสดงใน Table 5 พบว่า ค่าความเข้มข้นกรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมดที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร ที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ยของกรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมดของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วน (44.44, 42.61 และ 43.53 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) กับแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วน (51.74, 54.08 และ 52.91 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ)

กรดอะซิติก ที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร ที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ยของกรดอะซิติกของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วน (62.02, 64.56 และ 63.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) กับแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วน (66.51, 66.79 และ 66.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ)

กรดโพรพิโอนิกที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร ที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ยของกรดโพรพิโอนิกของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วน (18.36, 18.05 และ 18.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) กับแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วน (22.49, 22.03 และ 22.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) กรดบิวทีริก ที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร ที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ยของกรดบิวทีริกของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วน (9.11, 7.63 และ 8.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) กับแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วน (8.15, 8.66 และ 8.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) กรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก ที่ 0 ชั่วโมงก่อนให้อาหาร ที่ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหาร และค่าเฉลี่ยของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกของแพะเนื้อที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วน (2.53, 2.68 และ 2.61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) กับแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วน (3.08, 3.14 และ 3.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ)

Table 5 Effects of feeding pattern on Volatile Fatty Acids in the rumen of Crossbred meat goat

Items	TMR	Separate feed	P-value	SEM ^{1/}
Total Volatile Fatty Acids, TVFA (mM/L)				
0 h post-feeding	44.44	51.74	0.32	3.44
4 h post-feeding	42.61	54.08	0.18	4.16
Mean	43.53	52.91	0.18	3.78
Acetic acid (C2), (%TVFAs)				
0 h post-feeding	62.02	66.51	0.25	1.88
4 h post-feeding	64.56	66.79	0.48	1.15
Mean	63.29	66.65	0.33	1.64
Propionic acid (C3), (%TVFAs)				
0 h post-feeding	18.36	22.49	0.43	2.01
4 h post-feeding	18.08	22.03	0.45	1.68
Mean	18.22	22.27	0.44	1.84
Butyric acid (C4), (%TVFAs)				
0 h post-feeding	9.11	8.15	0.76	0.44
4 h post-feeding	7.63	8.66	0.73	0.43
Mean	8.37	8.41	0.99	0.37
C2:C3 ratio				
0 h post-feeding	2.52	3.08	0.28	0.25
4 h post-feeding	2.68	3.14	0.35	0.23
Mean	2.61	3.06	0.32	0.24

^{1/}SEM = standard error of the difference

อย่างไรก็ตาม ผลของกรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมดจากการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 42.61-54.08 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Sadsadedej *et al.* (2015) ที่รายงานค่าความเข้มข้นของกรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมดของแพะลูกผสมพื้นเมืองแอ่งโคราชเป็นมีค่าอยู่ระหว่าง 28.26-40.18 มิลลิโมลต่อลิตร และสอดคล้องกับ Meesang *et al.* (2010) ที่รายงานค่าความเข้มข้นของกรดไขมันที่ระเหยง่ายทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 57.70-59.59 มิลลิโมลต่อลิตรและกรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงกว่ากรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก ตามลำดับ สอดคล้องกับ Chewaissakul (1999) ที่รายงานว่า กรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนที่พบมากที่สุด คือ กรดอะซิติก พบประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ กรดโพรพิโอนิก พบประมาณ 18-20 เปอร์เซ็นต์ และกรดบิวทีริก พบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่เหมาะสมในกระเพาะรูเมนอยู่ระหว่าง 1-4 ตามรายงานของ Wannapat (1990)

4. สรุป

จากการศึกษาผลของรูปแบบการให้อาหารต่อปริมาณการกินได้ การใช้ประโยชน์ได้ของโภชนา และค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะเนื้อลูกผสม สรุปได้ว่า แพะที่ได้รับอาหารผสมแบบครบส่วนส่งผลให้แพะมีปริมาณการกินได้ของโภชนา และค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนาสูงกว่าแพะที่ได้รับอาหารแบบแยกส่วน อย่างไรก็ตาม รูปแบบการให้อาหารไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากรดไขมันที่ระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนของแพะและอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการหมักในกระเพาะรูเมน ดังนั้นรูปแบบที่เหมาะสมในการเลี้ยงแพะเนื้อลูกผสมคาลาฮารีเรด 50 เปอร์เซ็นต์ x แอ่งโคราชเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ x พื้นเมือง 25 เปอร์เซ็นต์ ในพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนัง คือการให้อาหารในรูปแบบอาหารผสมแบบครบส่วน

5. ข้อเสนอแนะ

เกษตรกรในพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนังสามารถนำรูปแบบการให้อาหารผสมแบบครบส่วนไปใช้เลี้ยงแพะขุนโดยใช้สูตรอาหารจากการทดลองครั้งนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแพะขุนเชิงพาณิชย์ให้มีคุณภาพและเป็นไปในทิศทางเดียวกันภายในกลุ่มต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณฟาร์มแพะของเกษตรกรในพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนัง ที่สนับสนุนพันธุ์สัตว์ทดลอง และสถานที่ทดลอง พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 1990. **Official methods of analysis, 15th edition association of official analytical chemists.** Virginia, USA.
- Anukanon, M. 2017. **The eight-feed formulars help to reduce feeding budget in meat goats.** Rakbankerd. Available Source: www.rakbankerd.com/agriculture/hiligt-view.php?id=55&s=tblheight, September 11, 2022.
- Chewaissakul, B. 1999. **The biochemistry of animal science** (3rd eds). Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University.
- Goetsh, A.L., Merkel, R.C. and Gipson, T.A. 2011. Factors affecting goat meat production and quality. **Small Ruminant Research** 101: 173-181. (in Thai)
- Mesang, A., Chanchula, P., Ngampongsai, W. and Laopetch, A. 2010. The level results of palm kernel meal with concentrate feed effect on the ecological rumen and nitrogen balance of goats fed main diets containing dried Paspalum Plicatulum leaf. **Khon Kean Agriculture Journal** 38: 261-274. (in Thai)
- Pukdethai, K. and Pichawong, W. 2018. The results of TMR feed for meat goat farmer in Chainat province, pp. 240-249. *In The annual research reports 2018.* Bureau of Animal Nutrition Development. Pathum Thani. (in Thai)
- Pitcha, S. 2022. **The raising of meat goat is an easy career, sustainability and market demand.** Regional Office of Agricultural Economics 5, Nakhonratchasima. Available Source: <https://thainews.prd.go.th/th/news/detail/TCATG220121105039759>, September 11, 2022.
- Pornjantuek, B., Wachirapakorn, C., Cherdthong, A., Suphrap, N. and Wongnen, C. 2015. Effect of Cassava Pulp from Ethanol Production in Total Mixed Ration on Feed Intake, Digestibility and Growth Performance of Meat Goat. **Journal of Mahanakorn Veterinary Medicine** 10(2): 81-97. (in Thai)
- Sadsadedej, K., Prajakboonjetsada, S., Tiengtham, J. and Kongmun, P. 2015. The efficiency of production and quantity of fatty acid in meat goats, which are fed by purple guinea grass and acacia, pp. 777-784. *In The 53rd Kasertsat University Annual Conference.* Bangkok. (in Thai)

- Samuel, M., Sagathewan, S., Thomas, J. and Mathen, G. 1997. An HPLC method for estimation of volatile fatty acids of ruminal fluid. **Indian Journal of Animal Sciences** 67: 805-807.
- Schneider, B. H. and Flatt, W. P. 1975. **The Evaluation of Feeds through Digestibility Experiments**. Georia University Press, Georia. U.S.A.
- Sureyajantratong, W. 1992. **The crude fiber of animal feed**. Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University. (in Thai)
- Taowan, M. 2016. The results of productive performances by feeding TMR combined with Pak Chong 1 in goats and acceptance of small farmer group. **Academic Resources Journal** 27(1): 116-122. (in Thai)
- Van Keulen, J. and Young, B.A. 1977. Evaluation of acid-insoluble ash as a natural marker in ruminant digestibility studies. **Journal of Animal Science** 40: 281-287.
- Van Soest, P. J. , Robertso, J. B. , and Lewis, B. A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science** 74: 3583-3597.
- Van Soest, P.J. 1994. **Nutrition ecology of the ruminants** (2nd ed). Cornell University Press, New York.
- Vasupen, K., Yuangklang, C. , Samklong, C. , Wongsuthavas, S., Mitchaothai, J. and Srenanul, P. 2006. Effect of total mixed ration and fermented total mixed ration on voluntary feed intake, digestion nutrients digestibility, and milk production in lactating dairy cows, pp. 167-176. *In* **Proceeding of the Technical Conference of 44th Kasetsart University**. Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Wannapat, M. 1990. **The ruminant nutrition**. Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Khon Kean University. (in Thai)



Research Article

การแยกเพศนกสวยงามจากขนด้วยวิธีพีซีอาร์

Sex Identification of Beautiful Birds from Feathers by PCR Method

กิตติกร ไกรเทพ ปณิก หมวดทองอ่อน และ อุมพร ขิम्मากทอง *

Kittikorn Kraithep, Panik Muadthongon and Umaporn Khimmakthong *

คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80240

Faculty of Veterinary Science, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat Campus, Thung-Yai, Nakhon Si Thammarat 80240, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-01-12

Revised: 2024-08-07

Accepted: 2025-06-20

Keywords:

sex-identification;

bird;

feathers;

PCR

PCR is an accurate and effective method for sex identification of young birds. However, extracting DNA from birds' blood samples can cause stress and injury to the birds. Using feathers instead of blood for DNA extraction is a more convenient and safer alternative for birds. When comparing DNA extraction from blood and chicken feathers, DNA from feathers was found to be as effective as that from blood in amplifying DNA using PCR. Sex identification was performed by extracting DNA from their feathers and used two pairs of primers, P2-P8 and 2550F-2718R, specific to the CHD gene in birds, with the 18s rRNA gene primer as a control. The results showed that the P2-P8 primer pair could only be used to identify the sexes of Sun Conure parrots. Female sun conures have a DNA band of approximately 350 base pairs corresponding to the CHD gene. The 2550F-2718R primer pair can be used to identify the sexes of both Sun Conures and Green Cheek Normal parrots. The female Sun Conure parrot has a DNA band of the CHD gene measuring approximately 650 base pairs, and the female Green Cheek Normal parrot has a DNA band of the CHD gene measuring approximately 450 base pairs.

© 2025 Kraithep, K., Muadthongon, P. and Khimmakthong, U. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: tal_biot@hotmail.com

Cite this article as:

Kraithep, K., Muadthongon, P. and Khimmakthong, U. 2025. Sex-Identification of Beautiful Bird from Feathers by PCR Method. **Recent Science and Technology** 17(3): 257545.

บทคัดย่อ

พีซีอาร์เป็นวิธีการแยกเพศนกอายุที่น้อยที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพ แต่การสกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างเลือดของนกทำให้เกิดความเครียดและบาดเจ็บ การใช้ขนแทนการใช้เลือดในการสกัดดีเอ็นเอจึงเป็นทางเลือกที่สะดวกและปลอดภัยต่อขนมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบการสกัดดีเอ็นเอจากเลือดและขนไก่ พบว่าดีเอ็นเอจากขนมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยวิธีพีซีอาร์ได้ดีไม่ต่างจากเลือด และเมื่อทำการตรวจเพศของนกโดยสกัดดีเอ็นเอจากขน และใช้ไพรเมอร์ 2 คู่ คือ P2-P8 และ 2550F-2718R ที่จำเพาะต่อยีน CHD ในนก โดยมีไพรเมอร์ของยีน 18s rRNA เป็นไพรเมอร์ควบคุม ผลการทดลองพบว่าไพรเมอร์ P2-P8 สามารถใช้แยกเพศของนกแก้วชันคอเนอร์ได้เท่านั้น โดยนกแก้วชันคอเนอร์เพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 350 คู่เบส ในขณะที่ไพรเมอร์ 2550F-2718R สามารถใช้แยกเพศได้ทั้งนกแก้วชันคอเนอร์และนกแก้วกรีนชัตนอมอล โดยนกแก้วชันคอเนอร์เพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 650 คู่เบส และนกแก้วกรีนชัตนอมอลเพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 450 คู่เบส

คำสำคัญ: การแยกเพศ, นก, ขน, พีซีอาร์

1. บทนำ

ปัจจุบันนกสวยงามหลายชนิดเป็นสัตว์เลี้ยงที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในประเทศไทย การแยกเพศนกสวยงามเป็นสิ่งสำคัญในการบริหารจัดการประชากรนก การเพาะพันธุ์ และการทำวิจัยด้านชีววิทยา เนื่องจากนกหลายชนิดในช่วงอายุน้อยจะมีลักษณะภายนอกที่คล้ายคลึงกันระหว่างเพศผู้และเพศเมีย ซึ่งทำให้การแยกเพศด้วยการสังเกตลักษณะภายนอกเป็นเรื่องยาก ดังนั้นการใช้เทคนิคที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพในการแยกเพศจึงเป็นสิ่งจำเป็น วิธีการแยกเพศนกนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น จากการสังเกตจากลักษณะภายนอก (Reynolds *et al.*, 2008) การคลำตรวจลักษณะทางกายวิภาคของช่องเชิงกรานและทวารรวม นอกจากนี้วิธีการตรวจแยกเพศนกที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ การใช้กล้องส่องตรวจอวัยวะเพศผ่านทางช่องท้อง (Divers, 2015) และ การใช้เทคนิคทางชีวโมเลกุล เช่น การวิเคราะห์ดีเอ็นเอ เป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูงและเป็นที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน (Jensen *et al.*, 2003) ไพรเมอร์ที่นิยมใช้และมีรายงานความสำเร็จมากมายคือ ไพรเมอร์ P2-P8 และ 2550F-2718R โดยมีรายงานการใช้ไพรเมอร์ 2 คู่นี้ในการตรวจเพศตัวอย่างนก 58 สายพันธุ์ พบว่าประสบความสำเร็จในนก 50 สายพันธุ์ (Vucicevic *et al.*, 2013) นอกจากนี้ ในการตรวจเพศตัวอย่างนก 70 สายพันธุ์ พบว่า ไพรเมอร์ 2550F-2718R ประสบความสำเร็จในนก 49 สายพันธุ์ และไพรเมอร์ P2-P8 ประสบความสำเร็จในนก 46 สายพันธุ์ (Çakmak *et al.*, 2017) แต่ยังไม่มียานงานการใช้ไพรเมอร์ทั้ง 2 คู่นี้ในนกแก้วชันคอเนอร์ และนกแก้วกรีนชัตนอมอล

วิธีการตรวจจากการสังเกตลักษณะภายนอกและทางกายวิภาคให้ผลไม่แม่นยำนัก และสามารถตรวจได้เมื่อสัตว์ปีกเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์ ในสัตว์อายุน้อยแม้จะมีการตรวจด้วยกล้องส่องตรวจอวัยวะเพศผ่านทางช่องท้องหรือการใช้เลือดในการตรวจด้วยวิธีพีซีอาร์ แต่การตรวจด้วยวิธีเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อร่างกายสัตว์และความเจ็บปวดของสัตว์ ดังนั้นหากสามารถหาวิธีการอื่น ๆ เพื่อแยกเพศสัตว์ปีกโดยลดความเจ็บปวด และผลกระทบอื่น ๆ ต่อตัวสัตว์ปีกได้ จะเป็นวิธีการที่ดีสอดคล้องต่อหลักสวัสดิภาพสัตว์ และหาก

สามารถตรวจแยกเพศในช่วงอายุที่ยังน้อยได้ วิธีการนี้อาจเป็นทางเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่ง (TehSwee and Kumaran, 2010) ในอดีตการแยกเพศนกโดยใช้เทคนิคทางชีวโมเลกุลมักจะสกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างเลือดของนก ซึ่งมีขั้นตอนการเก็บตัวอย่างที่ซับซ้อนและต้องใช้ความระมัดระวังสูงเพื่อไม่ให้เกิดความเครียดหรือบาดเจ็บ (Jensen *et al.*, 2003) อย่างไรก็ตาม การใช้ขนแทนการใช้เลือดในการสกัดดีเอ็นเอเพื่อการแยกเพศนกเป็นทางเลือกที่สะดวกและปลอดภัยมากกว่า เนื่องจากการเก็บตัวอย่างขนนั้นง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อนก (Harvey *et al.*, 2006)

เทคนิคการสกัดดีเอ็นเอจากขนเพื่อนำมาใช้ในการแยกเพศนกโดยวิธี PCR ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง การใช้ไพรเมอร์ที่เฉพาะเจาะจงกับยีนเพศของนกจะช่วยให้การระบุเพศของนกได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว (Horváth *et al.*, 2005) ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจเพศของนกโดยสกัดดีเอ็นเอจากขน และใช้ไพรเมอร์ 2 คู่ คือ P2-P8 และ 2550F-2718R ที่จำเพาะต่อยีน CHD ในนก โดยมีไพรเมอร์ของยีน 18s rRNA เป็นไพรเมอร์ควบคุม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ไก่ไข่ม้วนแม่พันธุ์ อีซ่าบราวน์ (ISA Brown) จากสาขาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.นครศรีธรรมราช จำนวน 3 คู่ (ตัวผู้ 3 ตัว ตัวเมีย 3 ตัว) และนกแก้วจากชมรมกลุ่มนกบินอิสระ จ.ตรัง จำนวน 2 คู่ ประกอบด้วย นกแก้วชันคอเนอร์ (*Aratinga solstitialis*) ตัวผู้ 1 ตัว ตัวเมีย 1 ตัว และนกแก้วกรีนชัตนอมอล (*Pyrrhura molinae*) ตัวผู้ 1 ตัว ตัวเมีย 1 ตัว การดำเนินการกับสัตว์ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามพระราชบัญญัติสัตว์เพื่อนงานทางวิทยาศาสตร์ พ.ศ. 2558 ภายใต้การควบคุมของสัตวแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ

2.2 ไพรเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา

ไพรเมอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด 3 คู่ ได้แก่ 18s rRNA, P2-P8 และ 2550F-2718R ดังแสดงใน Table 1 ออกแบบ

Table 1 Primers for sex-identification used in this study.

Target genes	Primer sequence (5'-3')	T _m (°C)	PCR products size (bp)	Reference
18s rRNA	18s rRNA avian-F: TTTCTCGATTCCGTGGGTGG	59.4	208	This study
	18s rRNA avian-R: CCCGGACATCTAAGGGCATC	61.4		
CHD	P2: TCTGCATCGCTAAATCCTTT	53.2	species dependent	Griffiths <i>et al.</i> , 1998
	P8: CTCCCAAGGATGAGRAAYTG	57.3		
CHD	2550F: GTTACTGATTCTGCTACGAGA	55.9	species dependent	Fridolfsson and Ellegren, 1999
	2718R: ATTGAAATGATCCAGTGCTTG	54.0		

ไพรเมอร์ 18s rRNA โดยใช้ยีน *Columba livia* 18S ribosomal RNA (GenBank no. AF173630.1) ออกแบบด้วยโปรแกรมออนไลน์ Primer Blast และพิจารณาการเกิด self-complementary จะใช้โปรแกรมออนไลน์ oligonucleotide properties calculator ซึ่งไพรเมอร์ที่สามารถนำไปใช้ได้จะต้องไม่เกิด self-complementary ไพรเมอร์ 18s rRNA ใช้เป็นไพรเมอร์ควบคุม เพื่อยืนยันว่าดีเอ็นเอที่สกัดมาได้มีคุณภาพที่ดี ทุกตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะต้องมีแถบดีเอ็นเอของ 18s rRNA เกิดขึ้นเสมอ

2.3 การเก็บตัวอย่างเลือดและขน

เก็บเลือดไก่จากเส้นเลือดดำใหญ่ใต้ปีก (brachial vein) โดยใช้เข็มขนาด 25G ก่อนเจาะเลือดใช้สำลีชุบแอลกอฮอล์ทาผิวหนังเหนือเส้นเลือด เพื่อเป็นการฆ่าเชื้อที่ผิวหนัง และช่วยทำให้เส้นเลือดขยายใหญ่ขึ้น วางเข็มเป็นมุมเฉียงเล็กน้อยตรงตำแหน่งที่จะเจาะ หายปลายเข็มขึ้นแทงเขี่ยออกจากหัวใจ เข้าสู่เส้นเลือดและดูดเลือดออกมาช้า ๆ จนได้เลือดปริมาณ 0.5-1 มล. ดึงเข็มออกและกดห้ามเลือด นำเลือดใส่ในหลอดเก็บเลือดที่มีสารป้องกันการแข็งตัวของเลือด เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส การทดลองในไก่ทำเพื่อเปรียบเทียบว่าการสกัดดีเอ็นเอจากเลือดและขนจะให้ผลการทดลองออกมาเหมือนหรือต่างกัน เพื่อบ่งชี้ว่าจะสามารถใช้แทนการใช้เลือดสำหรับการตรวจเพศในไก่ได้หรือไม่

เก็บขนไก่และขนนกโดยดึงขนจากบริเวณปลายปีก สวมถุงมือปลอดเชื้อทุกครั้ง เก็บขนตัวละ 2-3 เส้น (เลือกใช้เฉพาะเส้นที่มีตุ่มเซลล์ขนเท่านั้น) ใส่ถุงซิปล็อคและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.4 การสกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างเลือดและขน

การสกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างเลือดและขนจะใช้วิธีเดียวกัน คือใช้ชุดสกัดจีโนมิกดีเอ็นเอสำเร็จรูป (New England Biolabs, UK) โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างให้เติมบัฟเฟอร์สกัด 200 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่าง แล้วนำมาบดด้วยแท่งบดพลาสติกเป็นเวลา 10 วินาที แล้วดูดสารละลายตัวอย่างใส่ลงในหลอดขนาด 1.5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาสกัดดีเอ็นเอโดยเติม

Proteinase K ปริมาตร 20 ไมโครลิตร แล้วผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vortex นาน 30 วินาที จากนั้นนำไปบ่มใน water bath อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วย้ายส่วนใสไปยังหลอดใหม่ เติมน้ำละลาย RNase A ลงไป แล้วบ่มที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที เติมน้ำ binding solution ปริมาตร 200 ไมโครลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน และบ่มใน water bath อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เติมน้ำ ethanol 200 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นจึงย้ายตัวอย่างลงใน spin column แล้วปั่นเหวี่ยงที่ 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที ทั้งส่วนที่ผ่านตัวกรอง แล้วเติมน้ำ binding solution ปริมาตร 300 ไมโครลิตร ไปยัง spin column แล้วปั่นเหวี่ยงที่ 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที ทั้งส่วนที่ผ่านตัวกรอง แล้วเติมน้ำ wash solution ปริมาตร 700 ไมโครลิตร แล้วปั่นเหวี่ยงที่ 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที (ทำซ้ำอีกครั้ง) ทั้งส่วนที่ผ่านตัวกรอง แล้วปั่นเหวี่ยง 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเอทานอลที่ตกค้าง จากนั้นให้ย้าย spin column ไปยังหลอดใหม่ และเติมน้ำ Elution solution ปริมาตร 50 ไมโครลิตร และรอ 2 นาที (ให้ความร้อน Elution solution 60-70 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาใช้) นำตัวอย่างปั่นเหวี่ยงที่ 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที ซึ่งจะได้น้ำดีเอ็นเอออกมา และวัดปริมาณดีเอ็นเอด้วยเครื่อง Nanodrop แล้วนำดีเอ็นเอเก็บที่ -20 องศาเซลเซียส

2.5 การเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอด้วยวิธีพีซีอาร์

เตรียมตัวอย่างดีเอ็นเอสำหรับการทำพีซีอาร์ โดยใช้ TopTaq Master Mix Kit (QIAGEN, Germany) ในหลอดปฏิกิริยา 12.5 ไมโครลิตร ประกอบด้วย Toptaq Master Mix (2X) 6.25 ไมโครลิตร ไพรเมอร์ F (10 µM) 0.5 ไมโครลิตร ไพรเมอร์ R (10 µM) 0.5 ไมโครลิตร CoralLoad Concentration (10X) 1.25 ไมโครลิตร และดีเอ็นเอต้นแบบ 4 ไมโครลิตร สำหรับ Negative control ให้เติมน้ำ DPC water 4 ไมโครลิตร แทนดีเอ็นเอ จากนั้นนำหลอดพีซีอาร์ใส่ลงในเครื่องพีซีอาร์ (FlexCycler²) เพื่อเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอโดยตั้งค่าโปรแกรมตามโปรโตคอลของไพรเมอร์แต่ละคู่ โดยใช้อุณหภูมิช่วง annealing ที่แตกต่างกันคือ 55, 50 และ 50 องศาเซลเซียส สำหรับไพรเมอร์ 18s rRNA, P2-P8 และ 2550F-

2718R ตามลำดับ สภาวะพีซีอาร์ที่ใช้คือ อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จำนวน 1 รอบ อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วินาที อุณหภูมิ annealing เป็นเวลา 45 วินาที และอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จำนวน 40 รอบ และอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 1 รอบ นำผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ที่ได้ไปรันเจล (agarose gel electrophoresis) โดยใช้เจลความเข้มข้น 1.5% ภายใต้กระแสไฟฟ้า 100 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองจะแสดงในรูปของผลิตภัณฑ์พีซีอาร์เทียบกับ 100 bp markers โดยผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ของไพรเมอร์ P2-P8 และ 2550F-2718R จะถูกนำมารันในเจลหลุมเดียวกันกับผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ของไพรเมอร์ 18s rRNA (ทำแยกหลอดปฏิกิริยากันเนื่องจากไพรเมอร์แต่ละคู่มีค่า T_m ต่างกัน แต่นำมารันเจลด้วยกัน) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ง่ายขึ้น

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การทดสอบไพรเมอร์ 18s rRNA ในเลือดไก่ ขนไก่ และขนนก

เมื่อทำการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอนแบบที่สกัดจากขนไก่และเลือดไก่ พบว่าได้แถบดีเอ็นเอขนาดประมาณ 208 คู่เบส เหมือนกันในทุกตัวอย่าง บ่งชี้ว่าการใช้ขนแทนการใช้เลือดในการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยวิธีพีซีอาร์นั้นทำได้ และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอนแบบที่สกัดจากขนนก ก็ได้แถบดีเอ็นเอขนาดประมาณ 208 คู่เบส เช่นเดียวกัน (Figure 1) แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ไพรเมอร์ 18s rRNA เป็นไพรเมอร์ควบคุมสำหรับการตรวจเพศในการทดลองต่อไปได้

การใช้ไพรเมอร์ 18s rRNA เป็นไพรเมอร์ควบคุมนั้นมีความจำเป็น เนื่องจากหากในสปีชีส์ของนกที่นำมาตรวจเพศให้ผลการทดสอบไปในแนวทางที่เพศหนึ่งขึ้นแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ส่วนอีกเพศไม่ขึ้น การที่มีแถบดีเอ็นเอของ 18s rRNA ก็จะช่วยยืนยันว่าผลการตรวจเพศนี้มีความน่าเชื่อถือ การที่มีแถบดีเอ็นเอของ CHD ไม่ขึ้นนั้นเป็นความจริง ไม่ได้เกิดจากคุณภาพของดีเอ็นเอที่ไม่ดี ดังนั้นในทุกตัวอย่างที่ทดสอบจะต้องมีแถบดีเอ็นเอของ 18s rRNA เสมอ ส่วนแถบดีเอ็นเอของ CHD นั้นจะขึ้นหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับเพศและสปีชีส์ของนกที่นำมาทดสอบ

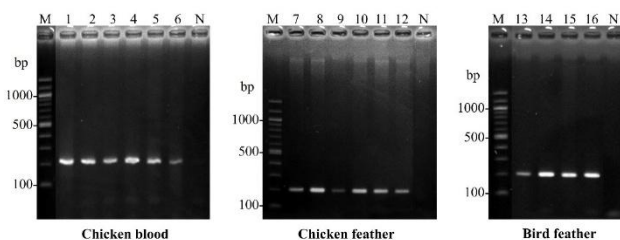


Figure 1 PCR product, approximately 208 base pairs, of the primer 18s rRNA in chicken blood, chicken feather, and bird feather samples. M: 100 bp markers, 1-3, 7-9: male chickens, 4-6, 10-12: female chickens, 13: male Sun Conure parrot, 14: male Green Cheek Normal parrot, 15: female Sun Conure parrot, 16: female Green Cheek Normal parrot and N: negative control.

3.2 การตรวจเพศนกด้วยไพรเมอร์ P2-P8 โดยใช้ขน

นกแก้วชั้นคอนัวร์ และนกแก้วกรีนชีคโนมอล ทั้งสองสายพันธุ์อยู่ในวงศ์ *Psittacidae* ซึ่งเป็นวงศ์ของนกแก้วที่มีความหลากหลายมากที่สุดและกระจายอยู่ทั่วโลก นกแก้วในวงศ์นี้มีลักษณะร่วมกันหลายประการ เช่น จะงอยปากโค้งแข็งแรง ขนสีสดใส และนิ้วเท้าที่เรียกว่า zygodactylous (สองนิ้วหน้า สองนิ้วหลัง) นกทั้งสองชนิดอยู่ในสกุล *Aratinga* ซึ่งบ่งบอกว่าทั้งสองสายพันธุ์นี้มีบรรพบุรุษร่วมกันและมีความใกล้ชิดกันในเชิงวิวัฒนาการ (Ribas and Miyaki, 2004)

P2-P8 และ 2550F-2718R เป็นไพรเมอร์ที่ออกแบบมาให้จำเพาะกับยีน chromo-helicase-DNA binding (CHD) เหมือนกัน โดยที่ยีน CHD พบได้ทั้งบนโครโมโซม Z (CHD-Z) และโครโมโซม W (CHD-W) แตกต่างกันที่ความยาวบริเวณ intron ของยีน CHD ระหว่างโครโมโซม Z (CHD-Z) กับโครโมโซม W อีกทั้งนกแต่ละสปีชีส์ก็มี ลำดับเบสและความยาวของยีน CHD ที่แตกต่างกัน ดังนั้นขนาดของผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ที่ได้จากไพรเมอร์ทั้ง 2 คู่จึงแตกต่างกันไปตามสปีชีส์ของนก (species dependent) (Poeaim *et al.*, 2012)

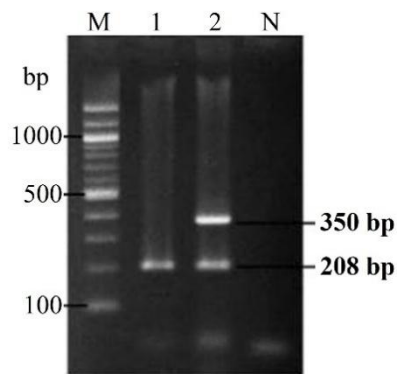


Figure 2 PCR product of primer 18s rRNA and P2-P8 in feather samples of Sun Conure parrot. M: 100 bp markers, 1: male Sun Conure parrot, 2: female Sun Conure parrot and N: negative control.

จากการทดสอบไพรเมอร์ P2-P8 ในนกแก้วชันคอเนอร์ และนกแก้วกรีนซีคอนมอล พบว่าไพรเมอร์ P2-P8 สามารถแยกเพศของนกแก้วชันคอเนอร์ได้เท่านั้น ไม่สามารถแยกเพศของนกแก้วกรีนซีคอนมอลได้ (ไม่มีแถบดีเอ็นเอเกิดขึ้น) โดยนกแก้วชันคอเนอร์เพศผู้ไม่เกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ส่วนนกแก้วชันคอเนอร์เพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 350 คู่เบส และมีแถบดีเอ็นเอของยีนควบคุม (18s rRNA) ขนาด 208 คู่เบสในทั้งสองตัวอย่าง (Figure 2) ขณะที่ในนกแก้วกรีนซีคอนมอลไม่เกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ทั้งเพศผู้และเพศเมีย มีเพียงแถบดีเอ็นเอของยีน 18s rRNA เท่านั้น (Figure 3) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าไพรเมอร์ P2-P8 มีความจำเพาะเจาะจงสูงต่อการตรวจเพศนกแก้วชันคอเนอร์เท่านั้น แต่ไม่สามารถใช้กับนกแก้วกรีนซีคอนมอลได้ สาเหตุที่เป็นไปได้คือความแตกต่างทางพันธุกรรมระหว่างสายพันธุ์นกแก้วที่ทำให้ไพรเมอร์ P2-P8 ไม่สามารถจับกับดีเอ็นเอของนกแก้วกรีนซีคอนมอลได้ ความจำเพาะเจาะจงอาจเป็นข้อจำกัดในการใช้ไพรเมอร์ P2-P8 สำหรับการตรวจเพศในนกแก้วชนิดอื่น ซึ่งต่างจากการศึกษาของ Oktanella (2019) ที่ศึกษาการตรวจเพศนกเกาะคอนและนกแก้วจากชนก 13 ตัวอย่าง จากนั้นทำการเพิ่มจำนวนยีน CHD ด้วยไพรเมอร์ P2 และ P8 ซึ่งเป็นไพรเมอร์สากลสำหรับการตรวจเพศด้วยดีเอ็นเอ ผลการศึกษาพบว่า เพิ่มจำนวนยีนเป้าหมายได้สำเร็จในทุกตัวอย่าง ขนาดแถบดีเอ็นเอที่ได้อยู่ในช่วง 365-500 คู่เบส โดยเพศผู้ปรากฏแถบเดียว เพศเมียปรากฏแถบคู่ ความแตกต่างในผลการทดสอบอาจเกิดจากความหลากหลายทางพันธุกรรมระหว่างสายพันธุ์นกแก้วชันคอเนอร์และนกที่ศึกษาโดย Oktanella การที่เพศผู้ไม่ปรากฏแถบดีเอ็นเอ และเพศเมียปรากฏเพียง 1 แถบในนกแก้วชันคอเนอร์อาจบ่งบอกถึงความแตกต่างในโครงสร้างยีน CHD ระหว่างสายพันธุ์เหล่านี้ ไพรเมอร์ P2-P8 เป็นไพรเมอร์สากลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจเพศนก แต่ผลการทดสอบที่แตกต่างกันระหว่างการศึกษาสองครั้งนี้อาจบ่งชี้ว่า การเลือกใช้

ไพรเมอร์ควรพิจารณาสายพันธุ์ของนกด้วย โดยเฉพาะเมื่อมีความแตกต่างทางพันธุกรรมที่อาจส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของยีนเป้าหมาย

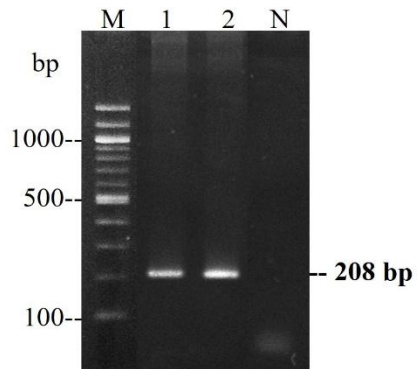


Figure 3 PCR product of primer 18s rRNA and P2-P8 in feather samples of Green Cheek Normal parrot. M: 100 bp markers, 1: male Sun Conure parrot, 2: female Sun Conure parrot and N: negative control.

3.3 การตรวจเพศนกด้วยไพรเมอร์ 2550F-2718R โดยใช้ชน

จากการทดสอบไพรเมอร์ 2550F-2718R ในนกแก้วชันคอเนอร์พบว่า นกแก้วชันคอเนอร์เพศผู้ไม่เกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ส่วนนกแก้วชันคอเนอร์เพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 650 คู่เบส และมีแถบดีเอ็นเอของยีนควบคุม (18s rRNA) ขนาด 208 คู่เบส ในทั้งสองตัวอย่าง (Figure 4) ไพรเมอร์ 2550F-2718R สามารถแยกเพศของนกแก้วชันคอเนอร์ได้อย่างชัดเจน โดยพบแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาด 650 คู่เบสในนกเพศเมียเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุว่ายีน CHD เป็นยีนที่อยู่บนโครโมโซมเพศของนกและมีความแตกต่างระหว่างเพศผู้และเพศเมีย (Çakmak *et al.*, 2017) ความแตกต่างนี้เกิดจากการที่เพศเมียของนกมีโครโมโซม ZW ในขณะที่เพศผู้มีโครโมโซม ZZ ทำให้สามารถใช้ไพรเมอร์ที่จำเพาะเจาะจงกับยีน CHD ในการแยกเพศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ไพรเมอร์ของยีน 18s rRNA เป็นไพรเมอร์ควบคุมในการทดลองนี้ ช่วยยืนยันความถูกต้องของการสกัดและการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ เนื่องจากพบแถบดีเอ็นเอขนาด 208 คู่เบสในตัวอย่างทั้งเพศผู้และเพศเมีย แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ PCR ทำงานได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ การใช้ไพรเมอร์ควบคุมนี้เป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพของดีเอ็นเอที่สกัดและกระบวนการ PCR เอง

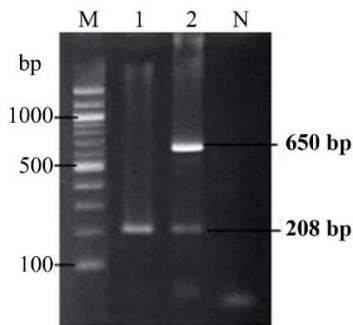


Figure 4 PCR product of primer 18s rRNA and 2550F-2718R in feather samples of Sun Conure parrot. M: 100 bp markers, 1: male Sun Conure parrot, 2: female Sun Conure parrot and N: negative control.

จากการทดสอบไพรเมอร์ 2550F-2718R ในนกแก้วกรีนชีคอนมอล พบว่านกแก้วกรีนชีคอนมอลเพศผู้ไม่เกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ส่วนนกแก้วกรีนชีคอนมอลเพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 450 คู่เบส และมีแถบดีเอ็นเอของยีนควม (18s rRNA) ขนาด 208 คู่เบส ในทั้งสองตัวอย่าง (Figure 5) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Vucicevic *et al.* (2013) ที่ทำการสกัดดีเอ็นเอจากขนนก และทำการเพิ่มจำนวนยีน CHD ด้วยชุดไพรเมอร์ 2 ชุด คือ 2550F/2718R และ P2/P8 ในนก 58 สายพันธุ์ พบว่าสามารถแยกเพศนกด้วยไพรเมอร์ 2 ชุดนี้ได้ประสบความสำเร็จใน 50 สายพันธุ์ บ่งชี้ว่าไพรเมอร์ 2550F/2718R และ P2/P8 มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงในการแยกเพศนกในหลายสายพันธุ์ อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาว่าประสิทธิภาพของไพรเมอร์อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความหลากหลายทางพันธุกรรมของนกในแต่ละสายพันธุ์ การที่ไพรเมอร์ 2 ชุดนี้ไม่สามารถแยกเพศใน 8 สายพันธุ์ได้ แสดงให้เห็นว่ามีข้อจำกัดในการใช้ไพรเมอร์นี้กับนกบางสายพันธุ์ อาจเกิดจากความแตกต่างในลำดับยีน CHD หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างทางพันธุกรรมของนกในสายพันธุ์เหล่านั้น การศึกษาเพิ่มเติมและการพัฒนาไพรเมอร์ใหม่หรือการปรับปรุงไพรเมอร์ที่มีอยู่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกเพศนกในทุกสายพันธุ์จึงเป็นสิ่งสำคัญ

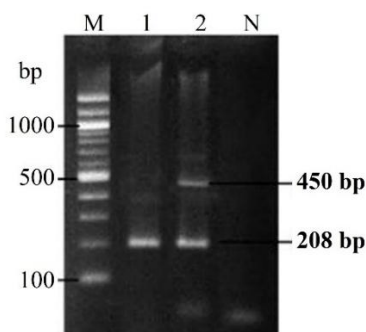


Figure 5 PCR product of primer 18s rRNA and 2550F-2718R in feather samples of Green Cheek Normal parrot. M: 100 bp

markers, 1: male Green Cheek Normal parrot, 2: female Green Cheek Normal parrot and N: negative control.

4. สรุป

เราสามารถตรวจสอบเพศนกได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับเลือด แต่สะดวกและปลอดภัยกับนกมากกว่า ไพรเมอร์ P2-P8 สามารถใช้แยกเพศของนกแก้วชันคอนัวร์ได้เท่านั้น โดยนกแก้วชันคอนัวร์เพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 350 คู่เบส ในขณะที่ไพรเมอร์ 2550F-2718R สามารถใช้แยกเพศได้ทั้งนกแก้วชันคอนัวร์และนกแก้วกรีนชีคอนมอล โดยนกแก้วชันคอนัวร์เพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 650 คู่เบส และนกแก้วกรีนชีคอนมอลเพศเมียเกิดแถบดีเอ็นเอของยีน CHD ขนาดประมาณ 450 คู่เบส

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และสถานที่ในการทำวิจัยคือ ห้องปฏิบัติการไวรัสวิทยาทางสัตวแพทย์ และห้องปฏิบัติการชีวเคมีทางสัตวแพทย์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช ท่าใหญ่

6. เอกสารอ้างอิง

- Çakmak, E., PekŞen, Ç.A. and Bilgin, C.C. 2017. Comparison of three different primer sets for sexing birds. **Journal of Veterinary Diagnostic Investigation** 29(1): 59-63.
- Divers, S.J. 2015. Endoscopic sex identification in chelonians and birds (psittacines, passerines, and raptors). **Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice** 18(3): 541-554.
- Fridolfsson, A.K. and Ellegren, H. 1999. A simple and universal method for molecular sexing of non-ratite birds. **Journal of Avian Biology** 30(1): 116-121.
- Griffiths, R., Double, M.C., Orr, K. and Dawson, R.J.G. 1998. A DNA test to sex most birds. **Molecular Ecology** 7(8): 1071-1075.
- Harvey, M.G., Bonter, D.N., Stenzler, L.M. and Lovette, I.J. 2006. A comparison of plucked feathers versus blood samples as DNA sources for molecular sexing. **Journal of Field Ornithology** 77(2): 136-140.
- Horváth, M.B., Martínez-Cruz, B., Negro, J.J., Kalmár, L. and Godoy, J.A. 2005. An overlooked DNA source for

- non-invasive genetic analysis in birds. **Journal of Avian Biology** 36: 84-88.
- Jensen, T., Pernasetti, F.M. and Durrant, B. 2003. Conditions for rapid sex determination in 47 avian species by PCR of genomic DNA from blood, shell-membrane blood vessels, and feathers. **Zoo Biology** 22: 561-571.
- Oktanella, Y. 2019. Sex identification based on molecular marker of CHDZ and CHDW gene in some species of Indonesian birds. **Advances in Animal and Veterinary Sciences** 7(10): 844-847.
- Poeaim, S., Chobarporn, N., Weeraphan, T., Puttharak, N. and Poeaim, A. 2012. Sex identification of some parrots. **Thai Journal of Genetics** 5(2): 194-202.
- Reynolds, S.J., Martin, G.R., Wallace, L.L., Wearnand, C.P., and Hughes, B.J. 2008. Sexing sooty terns on Ascension Island from morphometric measurements. **Journal of Zoology** 274: 2-8.
- Ribas, C.C. and Miyaki, C.Y. 2004. Molecular systematics in *Aratinga* parakeets: species limits and historical biogeography in the "*solstitialis*" group, and the systematic position of *Nandayus nenday*. **Molecular Phylogenetics and Evolution** 30(2004): 663-675.
- TehSwee, A. and Kumaran, J. 2010. Gender identification of domesticated chicken using a PCR-based method. **Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science** 33(2): 329-336.
- Vucicevic, M., Stevanov-Pavlovic, M., Stevanovic, J., Bosnjak, J., Gajic, B., Aleksic, N. and Stanimirovic, Z. 2013. Sex determination in 58 bird species and evaluation of CHD gene as a universal molecular marker in bird sexing. **Zoo Biology** 32(3): 269-276.



Research Article

ตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งของประเทศไทย A Model for Forecasting the Gold Bullion Selling Price in Thailand

วารangkha รียนสุทธิ์^{a*}, ศุภมิตร วิริยกุลโอภาส^b, นิปัท ตันติพุฒิกุล^b และ เนติธร ขาวมะลิ^b

Warangkha Riansut^{a*}, Supamit Wiriyakulopast^b, Nipat Tantiputtikul^b and Netitorn Kawmali^b

^a หลักสูตรคณิตศาสตร์และการจัดการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

^a Mathematics and Data Management Program, Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Paphayom, Phatthalung 93210, Thailand.

^b โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัยนครศรีธรรมราช อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80330

^b Princess Chulabhorn Science High School Nakhon Si Thammarat, Muang, Nakhon Si Thammarat 80330, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-11-08

Revised: 2025-03-04

Accepted: 2025-06-12

Keywords:

Gold Bullion Forecasting;

Box-Jenkins;

Exponential Smoothing;

Combined Forecasting

This study aims to construct models for forecasting the gold bullion selling price. The gold bullion time series, gathered from the reliable website of the Gold Traders Association from January 2012 to May 2023, contained 137 values and was divided into 2 sets. The first set, consisting of 125 values from January 2012 to May 2022, was used to construct forecasting models using the Box-Jenkins method, Holt's exponential smoothing method, Brown's exponential smoothing method, the damped trend exponential smoothing method, and the combined forecasting method. The second set, comprising 12 values from June 2022 to May 2023, was used to compare the forecasting models' accuracy using the lowest mean absolute percentage error (MAPE) and root mean square error (RMSE). The results indicated that the combined forecasting method using Box-Jenkins and Holt's exponential smoothing was the most accurate, with an error of 1.44% (MAPE = 1.4391) and 537.72 baht (RMSE = 537.72).

* Corresponding author.

E-mail address: warang27@gmail.com

Cite this article as:

Riansut, W., Wiriyakulopast, S., Tantiputtikul, N. and Kawmali, N. 2025. A Model for Forecasting the Gold Bullion Selling Price in Thailand. **Recent Science and Technology** 17(3): 261162.

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่ง โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาจากเว็บไซต์ของสมาคมค้าทองคำ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 137 ค่า ผู้วิจัยได้แบ่งอนุกรมเวลาออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 จำนวน 125 ค่า ใช้สร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี และวิธีการพยากรณ์รวม ชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 12 ค่า ใช้เปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์ร้อยละค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษพบว่า วิธีการพยากรณ์รวมที่รวมค่าพยากรณ์จากวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์เป็นวิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งร้อยละ 1.44 (MAPE = 1.4391) และ 537.72 บาท (RMSE = 537.72)

คำสำคัญ: การพยากรณ์ทองคำแท่ง, บ็อกซ์-เจนกินส์, การทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลัง, การพยากรณ์รวม

1. บทนำ

ทองคำเป็นโลหะที่มีมูลค่าสูง มีความคงทน และเป็นที่ยอมรับอย่างสากลมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เมื่อมีการนำโลหะมาใช้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยน ทองคำจึงเป็นหนึ่งในโลหะที่เป็นที่ยอมรับนอกเหนือจากเงิน ดีบุก และทองแดง ซึ่งโลหะเหล่านี้ต่างมีมูลค่าในตัวเองลดหลั่นกันไป ต่อมาเมื่อถึงยุคที่มีการใช้ธนบัตรซึ่งไม่มีมูลค่าในตัวเอง ความเชื่อมั่นในมูลค่าของธนบัตรจึงอยู่ที่ทุนสำรองเงินตรา ทองคำจึงมีบทบาทสำคัญในฐานะทุนสำรองเงินตราสากลที่ทั่วโลกยอมรับ (Bank of Thailand Learning Center, 2022) ปัจจุบันราคาทองคำมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นักลงทุนจึงเข้ามาลงทุนทองคำในฐานะเป็นสินทรัพย์ที่ปลอดภัย การขึ้นลงของราคาทองคำจึงมีผลต่อการตัดสินใจถือครองทองคำหรือขายออก ดังนั้นการทราบแนวโน้มราคาทองคำล่วงหน้าจึงเป็นข้อมูลที่ดีสำหรับการวางแผนการลงทุน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ราคาทองคำ ดังนี้ Ungprasert (2010) ได้ศึกษาการพยากรณ์ราคาทองคำโดยศึกษาจากปัจจัยภายนอกด้วยวิธีเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม ผลการวิจัยพบว่าราคาทองคำจากการพยากรณ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับราคาทองคำที่เกิดขึ้นจริง โดยผลการพยากรณ์ที่น่าสนใจของตลาดนิวยอร์ก, ลอนดอน, ฟิกซิง เอเอ็ม (London fixing AM) และลอนดอน ฟิกซิง พีเอ็ม (London fixing PM) เป็นการใช้อย่างแปรปรวนร่วมกับดัชนีอุตสาหกรรมดาวโจนส์ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนจากวิธีร้อยละของค่า نرمแบบสัมพัทธ์ (Percent Norm Relative Error: %NRE) เท่ากับร้อยละ 0.83, 1.93 และ 21.91 ตามลำดับ และผลการพยากรณ์ที่น่าสนใจของตลาดฮ่องกงเป็นการใช้อย่างแปรปรวนร่วมกับอัตราเงินเฟ้อประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อน %NRE เท่ากับร้อยละ 7.43 Riansut (2016) ได้ศึกษาการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี ผลการวิจัยพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์มีความแม่นยำมากที่สุด Manoj and Suresh (2019) ได้ศึกษาการ

พยากรณ์ราคาทองคำในประเทศอินเดียด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น พหุคูณที่มีการพิจารณาตัวแปรทางการเงิน 7 ตัว ได้แก่ ความต้องการทองคำ อัตราแลกเปลี่ยนเงินดอลลาร์สหรัฐต่อรูปีอินเดีย ดัชนี S&P ดัชนี NIFTY BSESENSEX ราคาน้ำมันในอินเดีย และดัชนีดอลลาร์สหรัฐ แต่การใช้ตัวแปรเชิงเส้นหลายตัวแปรอธิบายขัดแย้งกับสมมติฐานของตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นแบบคลาสสิก ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis) เพื่อปรับตัวแปรให้ลดลงเหลือเพียง 2 ปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องกัน ทำให้มีการตีความง่ายขึ้น โดยตัวแบบที่สร้างขึ้นได้รับการอนุมานว่ามีนัยสำคัญ และการวิเคราะห์ส่วนเหลือยังให้ผลสนับสนุนว่าตัวแบบเหมาะสม และ Goganutapon (2020) ได้ศึกษาการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี ผลการวิจัยพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความแม่นยำมากที่สุด

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า มีการศึกษาพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่ง โดยมีการสร้างตัวแบบพยากรณ์สำหรับการพยากรณ์ค่าในอนาคต อย่างไรก็ตาม ตัวแบบดังกล่าวเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างในปี 2559 (Riansut, 2016) และปี 2563 (Goganutapon, 2020) จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานในปัจจุบัน เนื่องจากราคาทองคำมีการปรับตัวสูงขึ้นกว่าในอดีตมาก (Gold Traders Association, 2022) ด้วยเหตุผลดังกล่าววัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้านี้คือ เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งด้วยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ เมื่อได้ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมจะสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ทิศทางและราคาขายทองคำแท่งในอนาคต รวมถึงยังใช้เป็นแนวทางในการรักษาเสถียรภาพของราคา เป็นทางเลือกหนึ่งในการช่วยตัดสินใจเพื่อการลงทุน วางแผน ป้องกันความเสี่ยงจากความผันผวนของราคาที่จะอาจทำให้เกิดความเสียหาย และใช้กำหนดนโยบายการนำเข้าทองคำแท่งของประเทศต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การรวบรวมข้อมูล การตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล

2.1.1 รวบรวมอนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่งเฉลี่ยต่อเดือน (บาท) จากเว็บไซต์ของสมาคมค้าทองคำ (Gold Traders Association, 2022) ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 137 ค่า เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ราคาขายทองคำแท่งมีแนวโน้มครบทุกรูปแบบ คือ ลดลง (มกราคม 2555 ถึง ธันวาคม 2556) คงที่ (มกราคม 2557 ถึง ธันวาคม 2561) และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (มกราคม 2562 ถึง พฤษภาคม 2566)

2.1.2 แบ่งอนุกรมเวลาออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 จำนวน 125 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยโปรแกรม SPSS version 17 ชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 12 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ร้อยละค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) และเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ที่ต่ำที่สุด

2.1.3 ตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลของอนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 1 ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคัล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's One-Way Analysis of Variance by Rank) โดยการตรวจสอบแนวโน้มจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวจำแนกข้อมูลเป็นรายปี เพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาแต่ละปีมีค่ามัธยฐานแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าพบความแตกต่างจะสรุปว่าอนุกรมเวลามีแนวโน้ม แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลง ต้องพิจารณาเพิ่มเติมจากกราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลา นอกจากการตรวจสอบแนวโน้มโดยใช้การทดสอบสมมุติฐานแล้ว การศึกษาจะพิจารณารูปฟังก์ชันสหสัมพันธ์ใน

ตัวบางส่วนของอนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่ง (Partial Autocorrelation Function: PACF) และกราฟฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัว (Autocorrelation Function: ACF) ควบคู่กันไปด้วย ขณะที่การตรวจสอบอิทธิพลของฤดูกาลจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวจำแนกข้อมูลเป็นรายเดือน (ข้อมูลหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้ว) เพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาแต่ละเดือนมีค่ามัธยฐานแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าพบความแตกต่างจะสรุปว่าอนุกรมเวลามีอิทธิพลของฤดูกาล

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการพยากรณ์

จากผลการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล ถ้าพบว่า อนุกรมเวลามีเฉพาะแนวโน้ม วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins) ที่เป็นตัวแบบรวมการถดถอยในตัวกับการเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Autoregressive Integrated Moving Average: ARIMA) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ (Holt's Exponential Smoothing) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ (Brown's Exponential Smoothing) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบดัมป์ (Damped Trend Exponential Smoothing) และวิธีการพยากรณ์รวม (Combined Forecasting) อนุกรมเวลามีเฉพาะอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย (Simple Seasonal Exponential Smoothing) และอนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่เป็นตัวแบบรวมการถดถอยในตัวกับการเฉลี่ยเคลื่อนที่เชิงฤดูกาล (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average: SARIMA) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก (Winters' Additive Exponential Smoothing) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ (Winters' Multiplicative Exponential Smoothing) และวิธีการพยากรณ์รวม (Combined Forecasting) (Ket-iam, 2003; Manmin, 2006; Box *et al.*, 2015) แสดงดังตารางที่ 1

Table 1 Forecasting methods appropriate for time series characteristics

Cases	Time series characteristics	Appropriate forecasting methods
1	Trends	Box-Jenkins (ARIMA), Holt, Brown, Damped, Combined Forecasting
2	Seasonal	Simple Seasonal
3	Trends and Seasonal	Box-Jenkins (SARIMA), Winters' Additive, Winters' Multiplicative, Combined Forecasting

จากผลการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลในผลการวิจัยแสดงว่า ราคาขายทองคำแท่งมีเพียงแนวโน้ม เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้จะการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ ARIMA วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลด์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมป์ และวิธีการพยากรณ์รวม

แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ก่อนที่จะคัดเลือกตัวแบบที่เป็นไปได้เริ่มต้น หรือการกำหนดค่า p และ q ต้องดำเนินการให้อนุกรมเวลามีลักษณะคงที่หรือมีความนิ่งก่อน ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการหารผลต่าง 1 ครั้ง ($d = 1$) เพื่อให้อนุกรมเวลาคงที่ และตรวจสอบความนิ่งของอนุกรมเวลา โดยใช้วิธี Augmented Dickey-Fuller Test (ADF) (Box *et al.*, 2015)

Table 2 Forecast modeling

No.	Forecasting Method	Forecasting Model
1	Box-Jenkins (Box <i>et al.</i> , 2015)	$ARIMA(p, d, q) : \hat{\phi}_p(B)(1-B)^d \hat{Y}_t = \hat{\delta} + \hat{\theta}_q(B)e_t$
2	Holt (Manmin, 2006)	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t(m)$ where $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$, $b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1}$
3	Brown (Ket-iam, 2003)	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t \left[(m-1) + \frac{1}{\alpha} \right]$ where $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)a_{t-1}$, $b_t = \alpha(a_t - a_{t-1}) + (1-\alpha)b_{t-1}$
4	Damped (Manmin, 2006)	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t \sum_{i=1}^m \phi^i$ where $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + \phi b_{t-1})$, $b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)\phi b_{t-1}$
5	Combined (Manmin, 2006; Montgomery, <i>et al.</i> , 2006)	$\hat{Y}_t = b_1 \hat{Y}_{it} + b_2 \hat{Y}_{2t}$ where $\hat{Y}_{it}$ is forecasting value from method i with low MAPE and RMSE and b_i is the regression coefficients from the least squares method

ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ในตารางที่ 2 แสดงดังนี้

$\hat{Y}_t$ และ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา t และเวลา $t + m$ ตามลำดับ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

e_t แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t โดยมีการแจกแจงปกติ เป็นอิสระกัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา

$\hat{\delta} = \mu \hat{\phi}_p(B)$ แทนค่าคงตัว (Constant) โดยที่ μ แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (Stationary)

$\hat{\phi}_p(B) = 1 - \hat{\phi}_1 B - \hat{\phi}_2 B^2 - \dots - \hat{\phi}_p B^p$ แทนตัวดำเนินการถดถอยในตัวเองอันดับที่ p กรณีไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล (Non-Seasonal Autoregressive Operator of Order p : AR(p))

$\hat{\theta}_q(B) = 1 - \hat{\theta}_1 B - \hat{\theta}_2 B^2 - \dots - \hat{\theta}_q B^q$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ q กรณีไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล (Non-Seasonal Moving Average Operator of Order q : MA(q))

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 โดยที่ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 1 ($n_1 = 125$)

d แทนลำดับที่ของการหาผลต่าง

B^j แทนตัวดำเนินการถดถอยหลัง (Backward Operator) ไป j ช่วงเวลา นั่นคือ $B^j Y_t = Y_{t-j}$

a_t และ b_t แทนค่าประมาณ ณ เวลา t แสดงระยะตัดแกน Y และความชันของแนวโน้ม ตามลำดับ

α , γ และ ϕ แทนค่าคงตัวการทำให้เรียบ โดยที่ $0 < \alpha < 1$, $0 < \gamma < 1$ และ $0 < \phi < 1$

2.3 การตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์

ข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์ คือ ตัวแบบพยากรณ์มีความเหมาะสม กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวของ Lag ต่าง ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ และอนุกรมเวลาของค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ เป็นอิสระกัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์และความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน โดยใช้สถิติ Ljung-Box Q ตรวจสอบอนุกรมเวลาของค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ โดยใช้การทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov Test: KS Test) ตรวจสอบค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ โดยใช้การทดสอบที (T-Test) และตรวจสอบความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา โดยใช้การทดสอบของเลวีเนภายใต้การใช่มัธยฐาน (Levene's Test based on Median) หากพบว่าข้อสมมุติ

ข้อใดข้อหนึ่งไม่เป็นจริงจะสรุปว่าตัวแบบพยากรณ์ไม่เหมาะสมและไม่ควรนำไปใช้ในการพยากรณ์ต่อไป

2.4 การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์

ตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์ที่นำมาศึกษา โดยการเปรียบเทียบราคาขายทองคำแท่งของอนุกรมเวลาชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 จำนวน 125 ค่า ($n_1 = 125$) กับค่าพยากรณ์ เพื่อคำนวณค่า MAPE และ RMSE ซึ่งค่า MAPE และ RMSE ที่ได้ควรอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม เช่น ค่า MAPE ไม่เกินร้อยละ 5 หมายความว่า ค่าพยากรณ์มีความแม่นยำสูงมาก และค่า RMSE ควรมีค่าต่ำ ๆ เนื่องจากเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีหน่วยเดียวกับข้อมูล หลังจากนั้นเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้น โดยการเปรียบเทียบราคาขายทองคำแท่งของอนุกรมเวลาชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 12 ค่า ($n_2 = 12$) กับค่าพยากรณ์ เพื่อคำนวณค่า MAPE และ RMSE ตัวแบบพยากรณ์ที่ให้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด จัดเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด สูตร MAPE และ RMSE แสดงดังนี้ (Ket-iam, 2003)

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} \left| \frac{e_t}{Y_t} \right| \quad \text{และ} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} e_t^2}$$

เมื่อ $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$ แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t
 Y_t และ $\hat{Y}_t$ แทนข้อมูลจริงและค่าพยากรณ์ ณ เวลา t
 ตามลำดับ

n_i แทนจำนวนข้อมูลชุดที่ i เมื่อ $i = 1$ และ 2

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล

จากการพิจารณาราคาขายทองคำแท่งในช่วงเดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 พบว่า ราคาขายทองคำแท่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบ่งพิจารณาราคาขายทองคำแท่งในช่วงเดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนธันวาคม 2561 แนวโน้มมีลักษณะคงที่ แล้วกลับมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงเดือนพฤษภาคม 2565 อีกทั้งยังพบว่า อนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่งไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล เนื่องจากราคาขายทองคำแท่งไม่ได้มีรูปแบบซ้ำเติมในแต่ละปี แสดงดังภาพที่ 1 เมื่อตรวจสอบลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 จำนวน 125 ค่า โดยใช้การทดสอบสมมติฐาน พบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีแนวโน้ม ($\chi^2 = 101.176$, $p\text{-value} < 0.0001$) แต่ไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล ($\chi^2 = 2.924$, $p\text{-value} = 0.992$) รวมถึงเมื่อพิจารณาราคา ACF ในภาพที่ 2 พบว่า ราคาขายทองคำแท่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวเองลดลงอย่างช้า ๆ และกราฟ PACF ในภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ราคาขายทองคำแท่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวเองบางส่วนของ Lag ที่ 1 สูงเกินขอบเขตที่กำหนด จึงเป็นเหตุผลยืนยันว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีแนวโน้ม ผู้วิจัยได้กำจัดแนวโน้มด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 ($d = 1$) ได้กราฟ ACF และกราฟ PACF แสดงดังภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า อนุกรมเวลามีลักษณะคงที่หรือมีความนิ่ง เนื่องจากผลการทดสอบด้วยวิธี Augmented Dickey-Fuller Test (ADF) พบว่า $t = -7.35765$ น้อยกว่าค่าวิกฤต -3.448021 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นอนุกรมเวลาหลังจากการกำจัดแนวโน้มมีความเหมาะสมกับการคัดเลือกตัวแบบในลำดับถัดไป

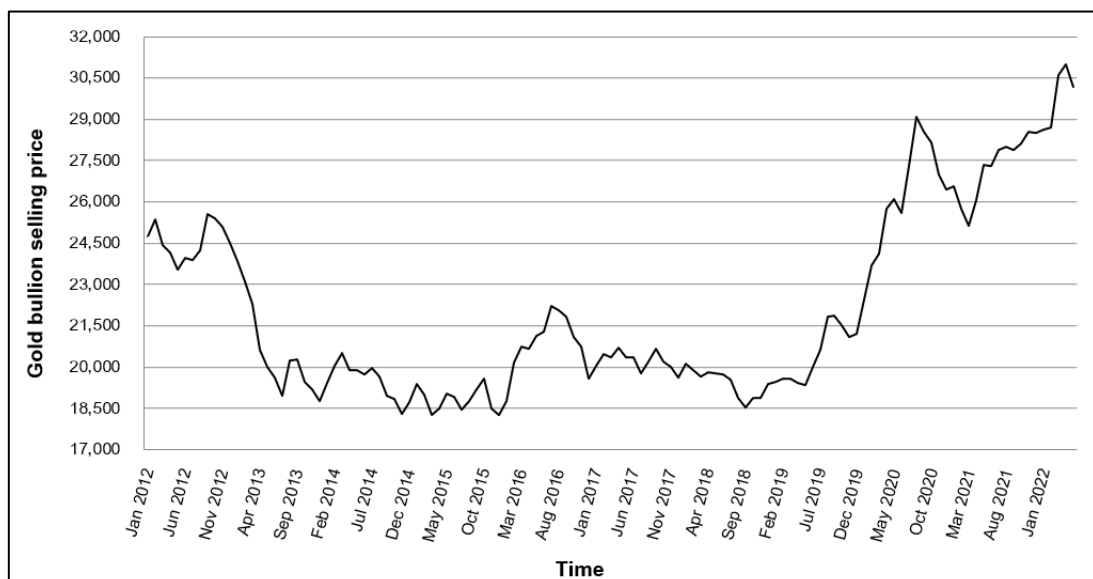


Figure 1 Run plot of the gold bullion selling price from January 2012 to May 2022

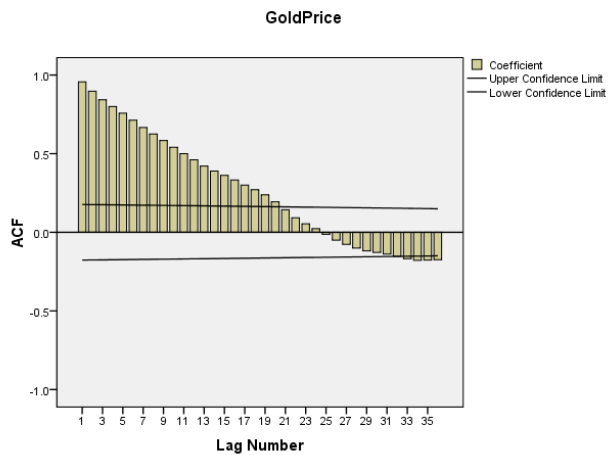


Figure 2 ACF of the gold bullion selling price

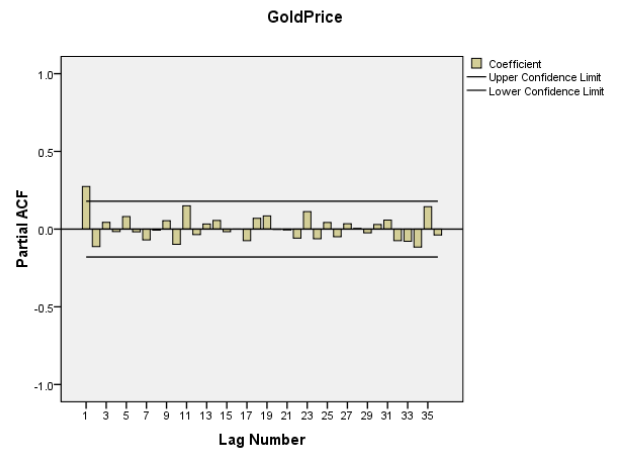


Figure 5 PACF of the first difference ($d = 1$) of the gold bullion selling price

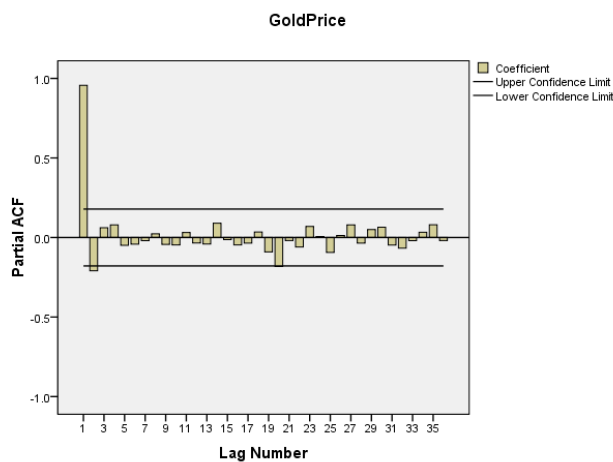


Figure 3 PACF of the gold bullion selling price

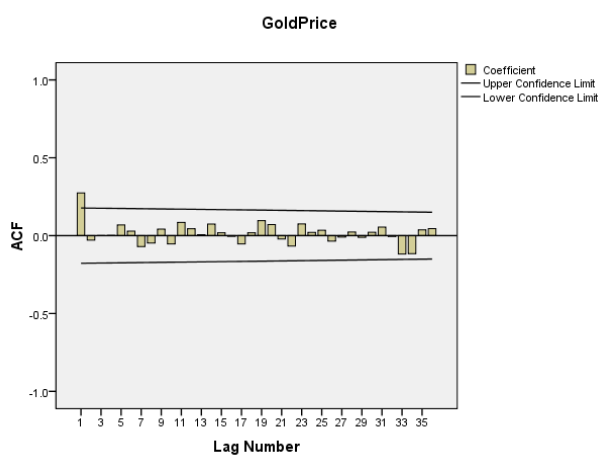


Figure 4 ACF of the first difference ($d = 1$) of the gold bullion selling price

3.2 ผลการพยากรณ์

ดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์ของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ โดยการพิจารณารูป ACF และ PACF ในภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ พบว่า จากรูป ACF ในภาพที่ 4 อนุกรมเวลามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวของ Lag ที่ 1 เกินขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จึงกำหนดให้ $q = 1$ และจากรูป PACF ในภาพที่ 5 อนุกรมเวลามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวของ Lag ที่ 1 เกินขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จึงกำหนดให้ $p = 1$ จะได้ตัวแบบพยากรณ์ที่เป็นไปได้เริ่มต้น คือ ตัวแบบ ARIMA(1, 1, 1) ผลการคัดเลือกตัวแบบให้เหลือเฉพาะพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมคือ ตัวแบบ ARIMA(0, 1, 1) ไม่มีพจน์ค่าคงตัว เมื่อแทนค่าประมาณพารามิเตอร์จากโปรแกรม SPSS จะได้ตัวแบบพยากรณ์ของแต่ละวิธีการพยากรณ์ แสดงดังตารางที่ 4 โดยการศึกษาครั้งนี้จะสร้างตัวแบบพยากรณ์รวม จำนวน 2 ตัวแบบ คือ ตัวแบบพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมปี และตัวแบบพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ต่ำ ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ต่อไป

Table 3 Parameter estimates of the Box-Jenkins method

Parameter		ARIMA(1, 1, 1)	ARIMA(0, 1, 1)	ARIMA(0, 1, 1) no constant
Constant	estimate	45.11403	44.43672	-
δ	p-value	0.530	0.553	-
AR(1):	estimate	-0.15992	-	-
ϕ_1	p-value	0.547	-	-
MA(1):	estimate	-0.48018	-0.33455	-0.33631
θ_1	p-value	0.043	0.0002	0.0001

Table 4 Forecast modeling results

No.	Forecasting Method	Forecasting Model
1	Box-Jenkins	$\hat{Y}_t = Y_{t-1} + 0.34e_{t-1}$
2	Holt	$\hat{Y}_{t+m} = 30,186.55 + 45.62(m)$
3	Brown	$\hat{Y}_{t+m} = 30,339.82 + 66.36 \left[(m-1) + \frac{1}{0.66} \right]$
4	Damped	$\hat{Y}_{t+m} = 30,186.58 - 809.55 \sum_{i=1}^m (0.30)^i$
5	Combined (Box-Jenkins, Damped)	$\hat{Y}_t = 1.1558 \hat{Y}_{t(\text{Box-Jenkins})} - 0.1546 \hat{Y}_{t+m(\text{Damped})}$
6	Combined (Box-Jenkins, Holt)	$\hat{Y}_t = 0.9458 \hat{Y}_{t(\text{Box-Jenkins})} + 0.0554 \hat{Y}_{t+m(\text{Holt})}$

where Y_{t-1} represents the time series at time $t-1$, e_{t-1} represents the error at time $t-1$, and $m=1$ represents June 2022.

Table 5 Results of model assumption testing

No.	Forecasting Method	Ljung-Box Q	p	KS Test	p	T-Test	p	Levene Statistic	p
1	Box-Jenkins	8.315	0.959	0.862	0.447	0.565	0.573	0.755	0.684
2	Holt	14.648	0.551	0.851	0.464	0.067	0.947	1.049	0.683
3	Brown	25.139	0.092	0.909	0.381	0.039	0.969	0.458	0.925
4	Damped	9.612	0.843	0.866	0.442	0.524	0.601	0.714	0.723
5	Combined (Box-Jenkins, Damped)	-	-	0.824	0.506	0.081	0.935	0.760	0.678
6	Combined (Box-Jenkins, Holt)	-	-	0.866	0.442	0.078	0.938	0.759	0.680

- SPSS does not display this result

3.3 ผลการตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์

ผลการตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์ พบว่าตัวแบบที่สร้างขึ้นจากวิธีการพยากรณ์ 6 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี วิธีการพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี และวิธีการพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้

เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ มีข้อสมมุติเป็นจริงทุกข้อที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ ตัวแบบพยากรณ์มีความเหมาะสมหรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวของ Lag ต่าง ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ อนุกรมเวลาของค่าตลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ เป็นอิสระกัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา แสดงดังตารางที่ 5

3.4 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์และการ
วิจารณ์ผล

เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นจากตารางที่ 4 สำหรับการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 จำนวน 125 ค่า ค่าวนค่า MAPE และ RMSE พบว่า ทุกวิธีการพยากรณ์ที่นำมาศึกษา มีความเหมาะสม มีค่า MAPE อยู่ในช่วงร้อยละ 2.15 ถึง 2.49 และมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 617.66 ถึง 708.13 บาท แสดงดังตารางที่ 6 และเมื่อพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 12 ค่า จากนั้นเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าพยากรณ์จากเกณฑ์ MAPE และ RMSE พบว่า หากพิจารณาเฉพาะวิธีการพยากรณ์เดี่ยว 4 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมป์ พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด มีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งร้อยละ 1.48 (MAPE = 1.4771) และ 558.16 บาท

(RMSE = 558.16) วิธีที่มีความแม่นยำในการพยากรณ์รองลงมาเมื่อพิจารณาภายใต้เกณฑ์ MAPE คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมป์ (MAPE = 2.0511) และวิธีที่มีความแม่นยำในการพยากรณ์รองลงมาเมื่อพิจารณาภายใต้เกณฑ์ RMSE คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ (RMSE = 862.87) ดังนั้นการศึกษาคครั้งนี้จึงทำการสร้างตัวแบบพยากรณ์รวม จำนวน 2 ตัวแบบ คือ ตัวแบบพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมป์ และตัวแบบพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำพบว่า ตัวแบบพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งร้อยละ 1.44 (MAPE = 1.4391) และ 537.72 บาท (RMSE = 537.72) ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนลงได้จากตัวแบบพยากรณ์เดี่ยวคือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ร้อยละ 0.04 หรือ 20.44 บาท แสดงดังตารางที่ 7

Table 6 MAPE and RMSE of the first time series

Criteria	Forecasting Method					
	Box-Jenkins	Holt	Brown	Damped	Combined (Box-Jenkins, Damped)	Combined (Box-Jenkins, Holt)
MAPE	2.1549	2.2692	2.4949	2.1793	2.1660	2.1672
RMSE	618.35	647.83	708.13	622.92	617.68	617.66

Table 7 MAPE and RMSE of the second time series

Time	Gold Bullion Selling Price	Forecasting Method					
		Box-Jenkins	Holt	Brown	Damped	Combined (Box-Jenkins, Damped)	Combined (Box-Jenkins, Holt)
Jun 2022	30,421.15	29,942.58	30,232.16	30,440.74	29,944.70	29,979.59	29,993.48
Jul 2022	29,978.85	30,582.10	30,277.78	30,507.10	29,872.44	30,729.93	30,600.85
Aug 2022	29,962.96	29,775.97	30,323.39	30,573.46	29,850.84	29,801.52	29,840.95
Sep 2022	29,538.46	30,025.85	30,369.01	30,639.82	29,844.39	30,091.33	30,079.80
Oct 2022	29,915.38	29,374.55	30,414.63	30,706.18	29,842.46	29,338.84	29,466.33
Nov 2022	29,734.62	30,097.27	30,460.24	30,772.54	29,841.89	30,174.27	30,152.41
Dec 2022	29,600.00	29,612.66	30,505.86	30,838.90	29,841.72	29,614.17	29,696.59
Jan 2023	29,861.54	29,595.74	30,551.47	30,905.26	29,841.67	29,594.63	29,683.12
Feb 2023	29,922.92	29,950.93	30,597.09	30,971.62	29,841.65	30,005.17	30,021.58
Mar 2023	31,138.89	29,913.50	30,642.70	31,037.98	29,841.65	29,961.90	29,988.70
Apr 2023	32,390.00	31,551.00	30,688.32	31,104.34	29,841.64	31,854.58	31,539.97

Table 7 (Continuous)

Time	Gold Bullion Selling Price	Forecasting Method					
		Box-Jenkins	Holt	Brown	Damped	Combined (Box-Jenkins, Damped)	Combined (Box-Jenkins, Holt)
May 2023	32,257.41	32,672.16	30,733.93	31,170.71	29,841.64	33,150.46	32,602.89
MAPE		1.4771	2.4113	2.7145	2.0511	1.5993	1.4391
RMSE		558.16	862.87	919.05	1,096.95	589.08	537.72

Bold type represents the lowest value.

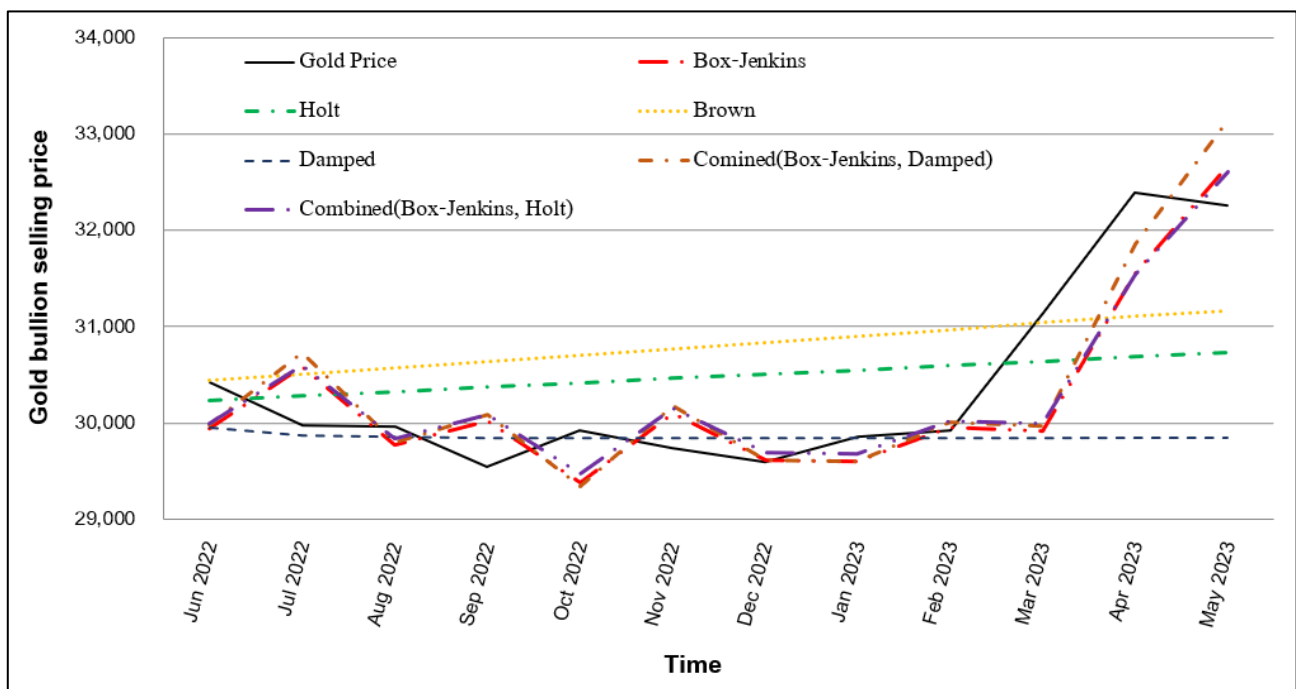


Figure 6 Comparison of the gold bullion selling price with forecast values

เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นจากตารางที่ 4 ในการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 จำนวน 125 ค่า พบว่า ค่าพยากรณ์จากทุกวิธีการพยากรณ์ใกล้เคียงกับค่าจริงมาก แต่เมื่อใช้ในการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 12 ค่า พบว่า ค่าพยากรณ์แตกต่างจากค่าจริงเล็กน้อย แสดงดังภาพที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE พบว่า วิธีการพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์มีความแม่นยำมากที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Goganutapon (2020) ที่พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความแม่นยำมากที่สุด และสอดคล้องกับการศึกษาของ Riansut (2016) ที่พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์มีความแม่นยำมากที่สุด อาจเนื่องมาจากการสร้างตัวแบบพยากรณ์ของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์จะพิจารณาลักษณะของอนุกรมเวลาว่ามีสหสัมพันธ์กันอย่างไร รวมถึงมีการพิจารณา

อนุกรมเวลาและค่าคลาดเคลื่อนในอดีตเพื่อนำมาสร้างเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม โดยวิธีการพยากรณ์นี้สามารถใช้ได้กับอนุกรมเวลาที่มีลักษณะการเคลื่อนไหวทุกรูปแบบ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ยังมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาราคาทองคำแท่งชุดที่ศึกษา อาจเนื่องมาจากราคาทองคำแท่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการของตัวแบบวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีแนวโน้มเชิงเส้น

จากการพิจารณาราคาขายทองคำแท่งชุดที่ 2 พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30,393.52 บาท โดยค่าพยากรณ์จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้อมูลจริง 89.53 และ 412.21 บาท ตามลำดับ ขณะที่วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี วิธีการพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี และวิธีการพยากรณ์รวมระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และ

วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโอสต์ให้ค่าพยากรณ์โดยเฉลี่ยต่ำกว่าข้อมูลจริง 135.66, 539.6, 35.48 และ 87.96 บาท ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 8 สอดคล้องกับที่พบว่า ค่า MAPE และ RMSE ของวิธีการพยากรณ์รวมจากตารางที่ 7 ต่ำกว่าค่า MAPE และ

RMSE ของวิธีการพยากรณ์เดี่ยว นั่นคือ วิธีการพยากรณ์รวมจะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนของวิธีการพยากรณ์เดี่ยวลงได้ถ้ามีการกำหนดน้ำหนักถ่วงที่เหมาะสม (Manmin, 2006)

Table 8 Average the gold bullion selling price (baht) from the second dataset

	Box-Jenkins	Holt	Brown	Damped	Combined (Box-Jenkins, Damped)	Combined (Box-Jenkins, Holt)
Average	30,257.86	30,483.05	30,805.72	29,853.89	30,358.03	30,305.56

จากตัวแบบสมการพยากรณ์ที่ได้ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ทิศทางและราคาขายทองคำแท่งในอนาคต เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจลงทุน วางแผน และป้องกันความเสี่ยงจากความผันผวนของราคาทองที่อาจทำให้เกิดความเสียหายได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ได้พยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งโดยพิจารณาเพียงปัจจัยของเวลาเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาครั้งต่อไป ผู้วิจัยควรพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความต้องการทองคำ นโยบายการเงินของภาครัฐ อัตราดอกเบี้ย อัตราแลกเปลี่ยนสกุลเงินดอลลาร์ อัตราเงินเฟ้อ ราคาน้ำมัน ดัชนีราคาหลักทรัพย์ของหุ้นกลุ่มอสังหาริมทรัพย์ ดัชนี S&P ดัชนี NIFTY และดัชนีดอลลาร์สหรัฐ เป็นต้น (Ungrasert, 2010; Manoj *et al.*, 2019; Finnomena, 2022) โดยนำปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มาสร้างเป็นสมการถดถอยและใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสำหรับการจัดกลุ่มตัวแปร (Manoj *et al.*, 2019; Montgomery, *et al.*, 2006) เพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมถึงควรพิจารณาวิธีการพยากรณ์อื่น ๆ เช่น วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network Method) เป็นต้น

4. สรุป

การศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่ง โดยใช้ราคาขายทองคำแท่งเฉลี่ยต่อเดือนจากเว็บไซต์ของสมาคมค้าทองคำตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 จำนวน 137 ค่า แบ่งอนุกรมเวลาออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนพฤษภาคม 2565 จำนวน 125 ค่า นำมาสร้างตัวแบบโดยวิธีการพยากรณ์ทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโอสต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมป์ วิธีการพยากรณ์รวมที่รวมค่าพยากรณ์จากวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมป์ และวิธีการพยากรณ์รวมที่รวมค่าพยากรณ์จากวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโอสต์ อนุกรมเวลาชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม

2566 จำนวน 12 ค่า นำมาเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีการพยากรณ์รวมที่รวมค่าพยากรณ์ระหว่างวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโอสต์เป็นวิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ราคาขายทองคำแท่งร้อยละ 1.44 หรือ 537.72 บาท ซึ่งสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนลงได้จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยวที่มีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ร้อยละ 0.04 หรือ 20.44 บาท ตัวแบบพยากรณ์รวมแสดงดังนี้

$$\hat{Y}_t = 0.9458 \hat{Y}_{t(\text{Box-Jenkins})} + 0.0554 \hat{Y}_{t+m(\text{Holt})}$$

โดยที่ $\hat{Y}_{t(\text{Box-Jenkins})} = Y_{t-1} + 0.34e_{t-1}$,

$$\hat{Y}_{t+m(\text{Holt})} = 30,186.55 + 45.62(m),$$

Y_{t-1} แทนอนุกรมเวลาราคาขายทองคำแท่ง ณ เวลา $t-1$,

e_{t-1} แทนอนุกรมเวลาของค่าคลาดเคลื่อน ณ เวลา $t-1$

และ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

5. เอกสารอ้างอิง

- Bank of Thailand Learning Center. 2022. **Average price of gold.** Available Source: https://www.botlc.or.th/item/museum_item/00003445016, August 12, 2022. (in Thai)
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. and Ljung, G.M. 2015. **Time Series Analysis: Forecasting and Control** (5th ed). Prentice Hall, New Jersey.
- Finnomena. 2022. **4 factors push the gold price up.** Available Source: <https://www.finnomena.com/channel/pocketmoney-ep42-goldprice/>, November 23, 2022. (in Thai)
- Goganutapon, K. 2020. A Comparison of the forecasting for the sale price of gold bar. **YRU Journal of Science and Technology** 5(1): 1-9. (in Thai)

- Gold Traders Association. 2022. **Monthly price of gold bullion 2012 – 2022**. Available Source: <https://www.goldtraders.or.th/AvgPriceList.aspx>, November 24, 2022. (in Thai)
- Ket-iam, S. 2003. **Forecasting Technique** (2nd ed). Thaksin University, Songkhla. (in Thai)
- Manmin, M. 2006. **Time Series and Forecasting**. Foreprinting, Bangkok. (in Thai)
- Manoj, J. and Suresh, K.K. 2019. Forecast model for price of gold: multiple linear regression with principal component analysis. **Thailand Statistician** 17(1): 125-131.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G.G. 2006. **Introduction to linear regression analysis** (4th ed). John Wiley and Sons, New York.
- Riansut, W. 2016. Forecasting the sale prices of gold bar. **Journal of Science Ladkrabang** 23(2): 41-53. (in Thai)
- Ungprasert, Y. 2010. Forecasting for gold price by external factors that using covariance matrix method. Master Thesis of Engineering, Silpakorn University. (in Thai)

Research Article

ปริมาณสารมลพิษทางอากาศจำแนกตามฤดูกาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

Air Pollutant Amounts Classified by Season in the Upper Northern Region of Thailand

สุจारी คำศรี* และ อนงนาฏ พรหมแก้ว

Sujaree Damsri* and Anongnat Promkaew

สาขาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, SuratThani Rajabhat University, Mueang, Surat Thani 84100, Thailand.

ABSTRACT**Article history:**

Received: 2023-12-11

Revised: 2024-08-04

Accepted: 2024-09-13

Keywords:air pollutant;
the upper northern region;
season;
Thailand

This research aimed to study and compare air pollutant amounts classified by season in the upper northern region of Thailand by collecting air pollutant data from January 2014 to December 2022 from eight Air Quality Monitoring Stations of the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment. The researcher divided the data into three seasons as follows: the rainy season (May-October, 6 months), the winter season (November-February, 4 months), and the summer season (March-April, 2 months). Descriptive statistics were used to analyze the amounts of air pollutants. The amounts of air pollutants were compared across different seasons using the Kruskal-Wallis test, and the pairwise medians were compared using the multiple comparison method with the Mann-Whitney U test at a significance level of 0.05.

The results of the average monthly air pollutant amounts for 9 years between 2014-2022 have shown that the upper northern region of Thailand has the highest amounts of particulate matter with a diameter of less than 2.5 microns and 10 microns, and carbon monoxide gas in March. Ozone gas is highest in March-April. Nitrogen dioxide gas has the highest amounts in February and March. As for sulfur dioxide gas, the amount does not vary much each month. The air pollutants that exceed the standard value in every province include particulate matter with a diameter of less than 2.5 microns and 10 microns, and ozone gas. When the seasons change, the amounts of particulate matter with a diameter of less than 2.5 microns and 10 microns, and ozone gas, are significantly different at the 0.05 significance level.

* Corresponding author.

E-mail address: sujaree.dam@sru.ac.th**Cite this article as:**Damsri, S. and Promkaew, A. 2025. Air Pollutant Amounts Classified by Season in the Upper Northern Region of Thailand. **Recent Science and Technology** 17(3): 261507.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณและเปรียบเทียบสารมลพิษทางอากาศจำแนกตามฤดูกาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยเก็บรวบรวมข้อมูลสารมลพิษทางอากาศตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 จาก 8 สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยแบ่งข้อมูลเป็น 3 ฤดูกาลดังนี้ ฤดูฝน คือ เดือนพฤษภาคม-เดือนตุลาคม จำนวน 6 เดือน ฤดูแล้ง คือ เดือนพฤศจิกายน-เดือนกุมภาพันธ์ จำนวน 4 เดือน และฤดูร้อน คือ เดือนมีนาคม-เดือนเมษายน จำนวน 2 เดือน สถิติเชิงพรรณนาใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารมลพิษทางอากาศ เปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณสารมลพิษทางอากาศจำแนกตามฤดูกาลด้วย Kruskal-Wallis Test และทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณด้วย Mann-Whitney U Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการศึกษารายการสารมลพิษทางอากาศเฉลี่ย 9 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 - พ.ศ. 2565 ได้แสดงให้เห็นว่าในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุดในเดือนมีนาคม ก๊าซโอโซนมีปริมาณมากที่สุดในเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีปริมาณมากที่สุดในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละเดือน ซึ่งปริมาณสารมลพิษทางอากาศที่เกินค่ามาตรฐานในทุกจังหวัด ได้แก่ ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และปริมาณก๊าซโอโซน ซึ่งเมื่อฤดูกาลต่างกันปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และปริมาณก๊าซโอโซนจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05

คำสำคัญ: สารมลพิษทางอากาศ, ภาคเหนือตอนบน, ฤดูกาล, ประเทศไทย

1. บทนำ

สารมลพิษทางอากาศถือเป็นความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมต่อสุขภาพมากที่สุดประการหนึ่ง คาดการณ์ว่าสารมลพิษทางอากาศจะทำให้มีผู้เสียชีวิตก่อนวัยอันควรทั่วโลกถึง 4.2 ล้านคนต่อปี ในปี 2562 การเสียชีวิตนี้เกิดจากการสัมผัสกับอนุภาคละเอียด ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคหลอดเลือดหัวใจ ระบบทางเดินหายใจ และมะเร็ง (WHO, 2023) ปัญหาสารมลพิษทางอากาศเกิดขึ้นมากในเมืองใหญ่ที่มีการขยายตัวทางอุตสาหกรรมและการก่อสร้าง ยิ่งในปัจจุบัน การกลายเป็นสังคมเมือง (Urbanization) การที่ผู้คนนิยมอาศัยและประกอบอาชีพอยู่ในเมืองเนื่องจากความพร้อมของปัจจัยสาธารณะ การที่ตลาดแรงงานต่าง ๆ มีการเคลื่อนย้ายเข้ามาสู่เมือง การเกิดขึ้นของเมืองขนาดใหญ่ ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดสภาวะและผลกระทบของสารมลพิษทางอากาศในทวีปเอเชีย โดยเฉพาะเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่ความรุนแรงขึ้น ปัญหาสารมลพิษทางอากาศที่คนในเมืองต้องประสบ ไม่เพียงแต่สารมลพิษทางอากาศภายนอกอาคาร (Outdoor Air Pollutant) เท่านั้น ปัญหาสารมลพิษทางอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Pollutant) จากการที่คนเราต้องใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ในอาคาร และการเดินทางระยะเวลานานด้วยพาหนะชนิดต่าง ๆ ยังเป็นปัญหาสำคัญต่อสุขภาพมนุษย์อีกเรื่องหนึ่งที่คนส่วนใหญ่ยังขาดความตระหนักและการป้องกันที่เพียงพอ (Pochanaet, 2012) สภาพทางอุตุนิยมวิทยาเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณและการแพร่กระจายของสารมลพิษทางอากาศ โดยความเร็วลมจะมีผลต่อความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศ ในขณะที่ทิศทางลมจะมีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของสารมลพิษ นอกจากนี้สภาพทางอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของสารมลพิษทางอากาศ เช่น อุณหภูมิอากาศ

ความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ ความกดอากาศ เป็นต้น (Eastern Economic Corridor (EEC) Office, 2020) ในฤดูฝนของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีลมมรสุมเขตร้อนและมรสุมอากาศเหนือมหาสมุทรอินเดียพัดผ่านเข้ามา ส่งผลให้ภูมิภาคได้รับผลกระทบจากสารมลพิษทางอากาศในปริมาณที่น้อยถึงปานกลาง ในฤดูแล้งเมื่อลมมรสุมฤดูหนาวพัดพาเอามลพิษทางอากาศที่ได้รับอิทธิพลจากแหล่งกำเนิดสารมลพิษในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะแพร่กระจายในระยะทางไกลและไหลเข้าสู่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ก่อให้เกิดสารมลพิษทางอากาศในภูมิภาคเพิ่มมากขึ้นกว่าฤดูฝน ประกอบกับเป็นช่วงฤดูกาลเผาไหม้ชีวมวล จึงทำให้ปริมาณสารมลพิษทางอากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตอนบนมากขึ้น (Pochanaet, 2014) สภาพอุตุนิยมวิทยาเป็นสาเหตุให้สถานการณ์วิกฤตสารมลพิษทางอากาศเกิดขึ้นเป็นประจำตามฤดูกาลในประเทศไทย โดยฤดูหนาวเดือนพฤศจิกายน-กุมภาพันธ์ กระแสลมอ่อนตัวประกอบกับอากาศเย็นในตอนกลางคืน ทำให้เกิดชั้นอุณหภูมิผกผันใกล้กับระดับผิวดินทำหน้าที่เป็นฝาครอบกักเก็บอากาศและสารมลพิษไว้ภายในส่งผลให้เกิดวิกฤตสารมลพิษทางอากาศ ในฤดูร้อนเดือนมีนาคม-เมษายน กระแสลมจากอ่าวไทยที่เข้าสู่พื้นที่กรุงเทพมหานคร ภาคกลาง และภาคตะวันออก เริ่มพัดแรงมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวคุณภาพอากาศดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ในช่วงนี้ประเทศเพื่อนบ้านมีการเผาในที่โล่งเป็นบริเวณกว้าง สารมลพิษที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือทำให้เกิดสถานการณ์วิกฤตสารมลพิษทางอากาศ ส่วนฤดูฝนเดือนพฤษภาคม-ตุลาคม มีกระแสลมแรงและมีฝนตกทำให้คุณภาพอากาศดีขึ้นในทุกภาคของประเทศ สำหรับภาคใต้ได้รับอิทธิพลจากกระแสลมทะเลจึงมีคุณภาพอากาศดีกว่าภาคอื่น ๆ ตลอดทั้งปี (Pollution Control Department, 2020)

ประเทศไทยเผชิญกับสถานการณ์ปัญหาสารมลพิษทางอากาศในหลายจังหวัด ซึ่งสารมลพิษทางอากาศไม่ได้เกิดจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) หรือ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}) เท่านั้น แต่ยังมีสารมลพิษทางอากาศจากก๊าซชนิดอื่น อาทิ โอโซน (O_3) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งระดับสารมลพิษทางอากาศจากโอโซนในกรุงเทพมหานครโดยใช้ค่าเฉลี่ย 8 ชั่วโมงจากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ ช่วงปี 2552-2560 พบว่า สารมลพิษดังกล่าวเกินค่ามาตรฐานที่แนะนำโดยองค์การอนามัยโลกและสหภาพยุโรป และยิ่งเกินค่ามาตรฐานของประเทศไทย ในอนาคตโอโซนจะมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้นจากภาวะโลกร้อนและแก้ปัญหาได้ยากกว่าสารมลพิษจากฝุ่นเพราะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Attavanich, 2019) ในปี 2562 ค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน มีค่ามากที่สุดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยเรียงจากมากไปหาน้อย ได้แก่ เชียงราย เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำพูน พะเยา ลำปาง น่าน และแพร่ ตามลำดับ และถ้าใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน รายปีไม่เกิน 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามที่องค์การอนามัยโลกเสนอ ทุกจังหวัดในประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยรายปีในปี 2562 เกินกว่าเกณฑ์ที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (Attavanich, 2020) สถานการณ์คุณภาพอากาศโดยรวมปี 2565 ดีขึ้นกว่าปีที่ผ่านมา แต่อย่างไรก็ตามยังพบปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน รวมทั้งก๊าซโอโซนเกินค่ามาตรฐานในหลายพื้นที่ เมื่อนำปริมาณสารมลพิษหลัก ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และก๊าซโอโซนมาคำนวณจำนวนวันที่มีคุณภาพอากาศเกินค่ามาตรฐาน จะได้ว่าจำนวนวันในรอบปี 2565 ที่คุณภาพอากาศเกินเกณฑ์มาตรฐาน 51-70 วัน ได้แก่ สระบุรี และสมุทรสงคราม คุณภาพอากาศเกินเกณฑ์มาตรฐานมากกว่า 70 วัน ได้แก่ กรุงเทพมหานคร พิษณุโลก หนองคาย นนทบุรี และสมุทรปราการ คุณภาพอากาศเกินเกณฑ์มาตรฐาน 31-50 วัน ได้แก่ แม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ ลำพูน และราชบุรี (Pollution Control Department, 2022)

จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาปริมาณและเปรียบเทียบสารมลพิษทางอากาศจำแนกตามฤดูกาล โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย เพื่อเป็นประโยชน์ในการวางแผนรับมือกับสารมลพิษทางอากาศได้อย่างเหมาะสมต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ข้อมูลและการเตรียมข้อมูล

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิของสารมลพิษทางอากาศ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 จากกรมควบคุมมลพิษ กระทรวง

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยคัดเลือกสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศที่มีการตรวจวัดค่าต่อเนื่อง เพื่อเป็นตัวแทนของพื้นที่ภาคเหนือตอนบน 8 จังหวัดของประเทศไทย ดังนี้ จังหวัดเชียงใหม่ใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลศรีภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ (36T) จังหวัดเชียงรายใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลเวียง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย (57T) จังหวัดลำปางใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลพระบาท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง (37T) จังหวัดลำพูนใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน (68T) จังหวัดแม่ฮ่องสอนใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลจองคำ อำเภอเมือง จังหวัดแม่ฮ่องสอน (58T) จังหวัดน่านใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลในเวียง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน (67T) จังหวัดแพร่ใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลนาจักร อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ (69T) และจังหวัดพะเยาใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด ตำบลบ้านต๋อม อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา (70T) โดยข้อมูลสารมลพิษทางอากาศ 6 ชนิด ที่เก็บรวบรวมประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน หน่วย $\mu g/m^3$ ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน หน่วย $\mu g/m^3$ ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของปริมาณ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หน่วย ppm ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงของปริมาณก๊าซโอโซน หน่วย ppb ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ หน่วย ppb และค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หน่วย ppb ซึ่งผู้วิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ชุด โดยพิจารณาแบ่งฤดูกาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย จากการพิจารณาข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนและอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนย้อนหลัง 30 ปี พ.ศ. 2534-2563 ซึ่งเก็บรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา ดังนี้ ฤดูฝนตั้งแต่เดือนพฤษภาคม-เดือนตุลาคม จำนวน 6 เดือน ฤดูหนาวตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน-เดือนกุมภาพันธ์ จำนวน 4 เดือน และฤดูร้อนตั้งแต่เดือนมีนาคม-เดือนเมษายน จำนวน 2 เดือน

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.2.1 วิเคราะห์ปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยเฉลี่ย 9 ปี จำแนกตามฤดูกาล ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 - พ.ศ. 2565 ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่ามากที่สุด (Max) ค่าน้อยที่สุด (Min) ค่าเฉลี่ย (Mean) และร้อยละของจำนวนครั้งที่มียกเกินค่ามาตรฐาน (The Standard Value) ของสารมลพิษทางอากาศต่อจำนวนครั้งที่ตรวจวัด

2.2.2 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล ตั้งแต่ เดือนมกราคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 ด้วยการทดสอบ Kruskal-Wallis Test และทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison) ด้วยการทดสอบ Mann-Whitney U Test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

3.1.1 ปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยรายเดือน เฉลี่ย 9 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 - พ.ศ. 2565

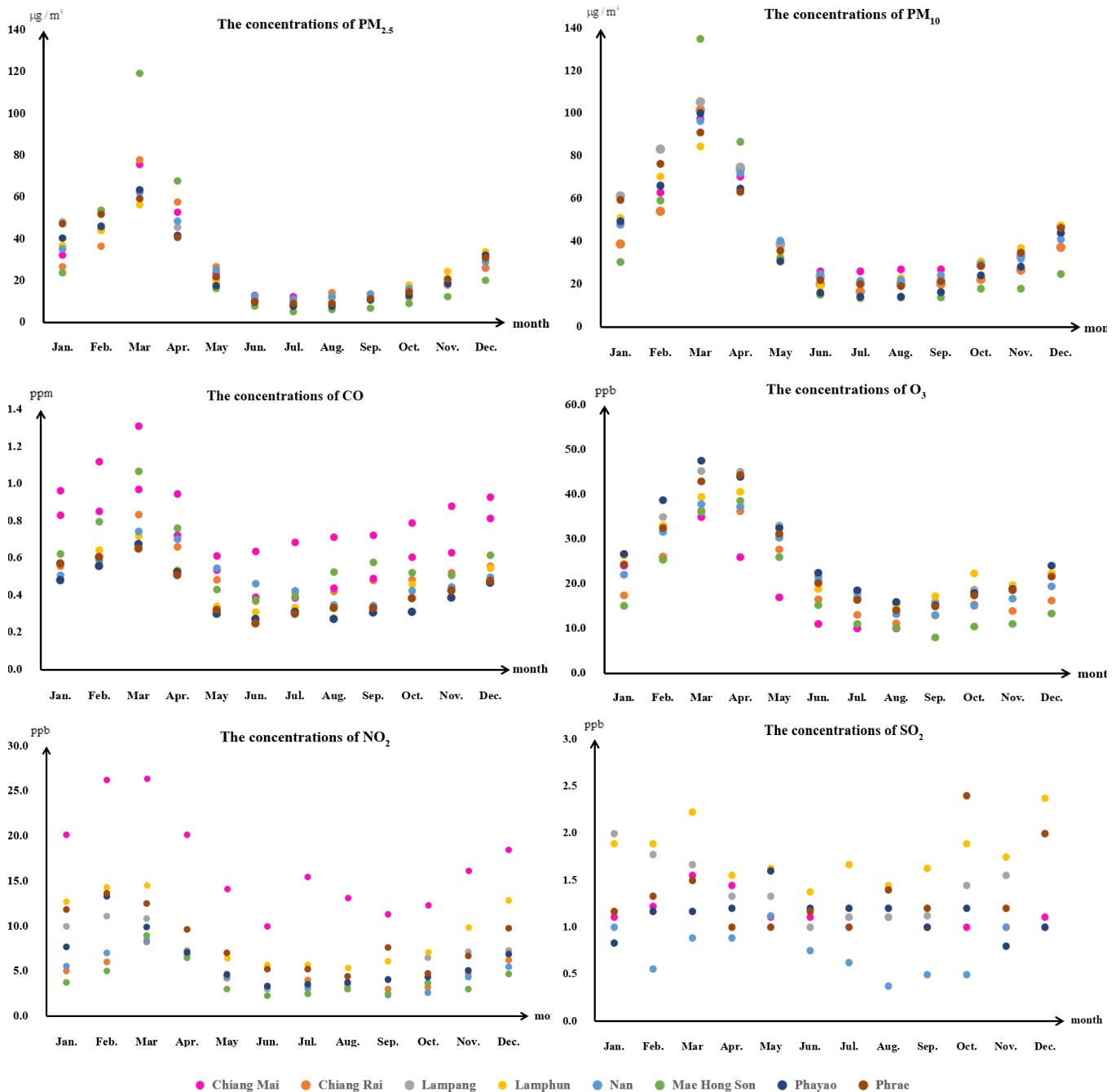


Figure 1 The average monthly air pollutant amounts for a 9-year period between 2014-2022 in the upper northern region of Thailand

จากข้อมูลปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยรายเดือน เฉลี่ย 9 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 - พ.ศ. 2565 ดังแสดงใน Figure 1 พบว่า สารมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณมากที่สุดในเดือนมีนาคมของทุกจังหวัด โดยจังหวัดแม่ฮ่องสอนมีค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน

และฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 119 และ 135 µg/m³ ตามลำดับ และจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 1.3 ppm รองลงมาคือจังหวัดแม่ฮ่องสอนมีค่าเฉลี่ย 1.1 ppm ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hansoongnem and Boonyawat (2010) ที่พบว่าภาคเหนือมีความเข้มข้นของปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศมากที่สุดเดือนมีนาคม และสอดคล้องกับ

การศึกษาของ Srinarang and Ket-ord (2020) ที่กล่าวว่าค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ของภาคเหนือมากที่สุดในเดือนมีนาคม ในเดือนมีนาคมถึงเมษายน พื้นที่ภาคเหนือตอนบนจะมีค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของก๊าซโอโซนมากที่สุด โดยจังหวัดพะเยามีค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของก๊าซโอโซนมากที่สุดในเดือนมีนาคมและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 47.6 ppb เดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคมจะมีค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มากที่สุด และเมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่า จังหวัดเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มากกว่าจังหวัดอื่น ๆ ทุกเดือน โดยในเดือนมีนาคมจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เท่ากับ 26.4 ppb สำหรับค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่องของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่า จังหวัดลำพูนมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูงเมื่อเทียบกับจังหวัดอื่น ๆ

3.1.2 ปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565

3.1.2.1 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน

จาก Table 1 การวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย จำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565 พบว่า ทุกจังหวัดจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนในฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการศึกษาของ Suburairat and Bunjongsiri (2020) ที่พบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนในฤดูแล้งจะสูงกว่าฤดูฝน จังหวัดแม่ฮ่องสอนมีค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนมากที่สุดเท่ากับ 93.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ในฤดูร้อนแต่เมื่อพิจารณาร้อยละของจำนวนครั้งที่มีความเกินค่ามาตรฐานต่อจำนวนครั้งที่ตรวจวัดจะเห็นได้ว่าจังหวัดลำปาง มีจำนวนครั้งที่มีความเกินค่ามาตรฐานมากที่สุด (ร้อยละ 15.55) รองลงมาเป็นจังหวัดเชียงใหม่ (ร้อยละ 14.57)

Table 1 The concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ classified by seasons for 9 years from 2014 to 2022

Province	Rainy Season			Winter			Summer			Percent values > std.
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	
Chiang Mai	66.00	4.00	14.45	96.00	6.00	30.17	266.00	5.00	64.11	14.57
Chiang Rai	178.00	4.00	13.50	94.00	4.00	26.33	259.00	8.00	67.63	11.82
Lampang	49.00	3.00	13.16	136.00	6.00	36.50	157.00	7.00	54.38	15.55
Lamphun	53.00	3.00	13.79	91.00	7.00	34.11	183.00	4.00	48.75	10.20
Mae Hong Son	38.00	2.00	8.21	168.00	4.00	26.17	323.00	8.00	93.50	13.98
Nan	82.00	4.00	14.75	107.00	6.00	31.56	168.00	7.00	55.25	12.44
Phrae	85.00	3.00	12.64	151.00	8.00	36.33	158.00	8.00	50.00	14.18
Phayao	38.00	3.00	10.87	99.00	5.00	33.17	246.00	9.00	54.14	12.69

The standard value (std.) for the 24-hour average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ is 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ until May 31, 2023, and from June 1, 2023, onwards, the 24-hour average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ is 37.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Table 2 The concentrations of PM_{10} classified by seasons for 9 years from 2014 to 2022

Province	Rainy Season			Winter			Summer			Percent values > std.
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	
Chiang Mai	99.00	9.00	29.15	150.00	10.00	47.56	296.00	13.00	84.06	3.05
Chiang Rai	201.00	2.00	22.93	118.00	7.00	39.28	371.00	13.00	87.89	3.59
Lampang	100.00	5.00	25.54	204.00	8.00	56.91	229.00	11.00	90.28	4.89
Lamphun	90.00	8.00	25.21	165.00	10.00	51.64	243.00	15.00	74.11	2.07
Mae Hong Son	89.00	4.00	17.81	179.00	8.00	32.97	340.00	11.00	110.83	6.53
Nan	126.00	7.00	27.13	133.00	6.00	46.94	214.00	14.00	84.31	2.60

Table 2 (Continues)

Province	Rainy Season			Winter			Summer			Percent values > std.
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	
Phrae	104.00	1.00	24.44	179.00	11.00	54.46	209.00	13.00	77.28	2.82
Phayao	76.00	2.00	19.10	125.00	5.00	46.97	298.00	15.00	83.65	2.91

The standard value (std.) for the 24-hour average concentration of PM_{10} is $120 \mu g/m^3$.

Table 3 The concentrations of carbon monoxide gas classified by seasons for 9 years from 2014 to 2022

Province	Rainy Season			Winter			Summer			Percent values > std.
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	
Chiang Mai	2.80	0.00	0.70	5.30	0.00	0.94	4.40	0.00	1.13	0.00
Chiang Rai	3.90	0.00	0.44	8.30	0.00	0.56	3.40	0.00	0.75	0.00
Lampang	1.60	0.00	0.48	2.70	0.10	0.81	3.20	0.00	0.85	0.00
Lamphun	5.60	0.00	0.35	4.30	0.00	0.55	2.90	0.00	0.63	0.00
Mae Hong Son	5.70	0.00	0.46	7.70	0.00	0.65	5.00	0.00	0.92	0.00
Nan	2.63	0.00	0.43	2.50	0.00	0.51	2.40	0.00	0.72	0.00
Phrae	2.90	0.00	0.32	2.80	0.00	0.52	4.20	0.00	0.58	0.00
Phayao	4.90	0.00	0.30	2.60	0.00	0.47	5.10	0.00	0.60	0.00

The standard value (std.) for the 1-hour average concentrations of carbon monoxide gas is 30 ppm.

3.1.2.2 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน

จาก Table 2 การวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565 พบว่า ทุกจังหวัดจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนในฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการศึกษาของ Suburairat and Bunjongsiri (2020) ที่พบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนในฤดูแล้งจะสูงกว่าฤดูฝน และจากการวิเคราะห์พบว่า ในฤดูร้อนจังหวัดแม่ฮ่องสอนมีค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน มากที่สุดเท่ากับ $110.83 \mu g/m^3$ และเมื่อพิจารณาร้อยละของจำนวนครั้งที่มียกเกินค่ามาตรฐานต่อจำนวนครั้งที่ตรวจวัดจะเห็นว่าจังหวัดแม่ฮ่องสอนมีจำนวนครั้งที่มียกเกินค่ามาตรฐานมากที่สุด (ร้อยละ 6.53) รองลงมาเป็นจังหวัดลำปาง (ร้อยละ 4.89) และจังหวัดเชียงราย (ร้อยละ 3.59) ตามลำดับ

3.1.2.3 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์

จาก Table 3 การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565 พบว่า ทุกจังหวัดจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ ซึ่งฤดูร้อนจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มากที่สุดเท่ากับ 1.13 ppm และทุกจังหวัดภาคเหนือตอนบนมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ไม่เกินค่ามาตรฐาน

3.1.2.4 ปริมาณก๊าซโอโซน

จาก Table 4 การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซโอโซนในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565 พบว่า ทุกจังหวัดจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซโอโซนในฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ ซึ่งในฤดูร้อนจังหวัดพะเยามีค่าเฉลี่ยก๊าซโอโซนมากที่สุดเท่ากับ 45.75 ppb เมื่อพิจารณาร้อยละของจำนวนครั้งที่มียกเกินค่ามาตรฐานต่อจำนวนครั้งที่ตรวจวัดจะเห็นว่าจังหวัดลำปางและแพร่มีจำนวนครั้งที่มียกเกินค่ามาตรฐานมากที่สุด (ร้อยละ 1.94) รองลงมาเป็นจังหวัดลำพูน (ร้อยละ 1.80) และจังหวัดน่าน (ร้อยละ 1.38) ตามลำดับ

Table 4 The concentrations of ozone gas classified by seasons for 9 years from 2014 to 2022

Province	Rainy Season			Winter			Summer			Percent values > std.
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	
Chiang Mai	52.00	0.00	12.00	93.00	1.00	25.00	136.00	0.00	30.50	0.44
Chiang Rai	190.00	0.00	16.11	118.00	0.00	18.39	119.00	1.00	36.28	0.52
Lampang	98.00	0.00	20.33	110.00	1.00	25.61	140.00	1.00	45.17	1.94
Lamphun	91.00	0.00	20.20	105.00	0.00	26.20	127.00	0.00	40.00	1.80
Mae Hong Son	89.00	0.00	13.94	130.00	0.00	16.42	157.00	0.00	37.33	1.19
Nan	97.00	0.00	18.28	113.00	0.00	22.71	139.00	0.00	37.56	1.38
Phrae	98.00	0.00	19.04	176.00	0.00	24.22	139.00	0.00	43.61	1.94
Phayao	99.00	0.00	20.24	122.00	0.00	27.09	146.00	0.00	45.75	1.24

The standard value (std.) for the 1-hour average concentration of ozone gas is 100 ppb.

Table 5 The concentrations of nitrogen dioxide gas classified by seasons for 9 years from 2014 to 2022

Province	Rainy Season			Winter			Summer			Percent values > std.
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	
Chiang Mai	134.00	0.00	12.75	165.00	0.00	20.50	104.00	0.00	23.54	0.00
Chiang Rai	51.00	0.00	3.04	42.00	0.00	4.89	78.00	0.00	7.38	0.00
Lampang	34.00	0.00	3.88	69.00	0.00	9.22	64.00	0.00	9.07	0.00
Lamphun	81.00	0.00	6.11	71.00	0.00	12.53	94.00	0.00	12.11	0.00
Mae Hong Son	40.00	0.00	2.56	39.00	0.00	3.63	54.00	0.00	7.75	0.00
Nan	39.00	0.00	3.16	56.00	0.00	5.65	86.00	0.00	7.67	0.00
Phrae	95.00	0.00	5.12	70.00	0.00	10.36	63.00	0.00	11.06	0.00
Phayao	29.00	0.00	3.96	63.00	0.00	7.14	70.00	1.00	8.59	0.00

The standard value (std.) for the 1-hour average concentration of nitrogen dioxide gas is 170 ppb.

3.1.2.5 ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

จาก Table 5 การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565 พบว่า ทุกจังหวัดจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ในฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ ยกเว้นจังหวัดลำปางและลำพูนจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในฤดูหนาวมากกว่าฤดูร้อน โดยในฤดูร้อนจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ยก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มากที่สุดเท่ากับ 23.54 ppb และทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ไม่เกินค่ามาตรฐาน

3.1.2.6 ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

จาก Table 6 การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565 พบว่า ทุกจังหวัดมีปริมาณ

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่เกินค่ามาตรฐาน โดยจังหวัดเชียงใหม่และน่านมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ จังหวัดลำปางและลำพูนมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฤดูหนาวสูงกว่าฤดูร้อนและฤดูฝนตามลำดับ จังหวัดแพร่จะมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฤดูหนาวสูงกว่าฤดูฝนและฤดูร้อนตามลำดับ และจังหวัดพะเยามีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฤดูฝนสูงกว่าฤดูร้อนและฤดูหนาวตามลำดับ ซึ่งจังหวัดลำพูนมีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุดเท่ากับ 1.89 ppb ในฤดูร้อน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - 2565 เห็นได้ว่าโดยภาพรวมมีปริมาณสารมลพิษทางอากาศในฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ ยกเว้นปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และปริมาณสารมลพิษทางอากาศที่เกินค่ามาตรฐาน ในทุกจังหวัด ได้แก่ ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และปริมาณก๊าซโอโซน สำหรับปริมาณสารมลพิษทางอากาศที่ไม่เกิน

ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย จากผลการศึกษาสอดคล้องกับ Pochanaet (2016) ที่พบว่าปัญหามลพิษหลักของจังหวัดเชียงใหม่ เกิดเนื่องจากหมอกควันไฟป่า การเผาไหม้ชีวมวลซึ่งทำให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็กในช่วงปลายฤดูหนาวและต้นฤดูร้อน

2022

Summer		Percent
Min	Mean	values > std.
0.00	1.50	0.00
-	-	-
0.00	1.50	0.00
0.00	1.89	0.00
-	-	-
0.00	0.89	0.00
0.00	1.25	0.00
0.00	1.20	0.00

9 years from 2014 to 2022 using the

Statistics	df	P-value
70.77	2	0.000*
65.61	2	0.000*
30.51	2	0.000*
5.85	2	0.054
42.70	2	0.000*
19.16	2	0.000*
33.83	2	0.000*
68.41	2	0.000*
26.57	2	0.000*
45.89	2	0.000*
7.21	2	0.027*
-	-	-

Table 7 (Continues)

The concentrations of air	Rainy Season		Winter		Summer		Statistics	df	P-value
pollutants	Median	IQR	Median	IQR	Median	IQR			
Lampang									
- PM _{2.5}	12.00	6.00	30.50	33.00	55.00	29.00	34.89	2	0.000*
- PM ₁₀	22.00	14.25	47.00	43.00	92.50	39.50	68.24	2	0.000*
- CO	0.44	0.16	0.81	0.30	0.83	0.28	45.07	2	0.000*
- O ₃	18.00	8.00	24.00	12.50	46.00	7.50	52.19	2	0.000*
- NO ₂	4.00	2.00	9.00	4.00	9.00	4.25	60.05	2	0.000*
- SO ₂	1.00	0.00	2.00	1.00	1.50	1.00	27.02	2	0.000*
Lamphun									
- PM _{2.5}	11.50	8.50	32.50	13.75	43.50	29.25	37.81	2	0.000*
- PM ₁₀	23.50	12.00	47.00	20.50	73.00	36.25	72.26	2	0.000*
- CO	0.34	0.13	0.51	0.20	0.61	0.29	40.89	2	0.000*
- O ₃	18.00	11.00	24.50	12.25	39.50	7.50	43.50	2	0.000*
- NO ₂	6.00	6.00	10.50	9.25	10.00	9.25	28.78	2	0.000*
- SO ₂	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	1.25	2.42	2	0.299
Mae Hong Son									
- PM _{2.5}	7.00	4.00	19.00	20.75	90.50	72.25	38.23	2	0.000*
- PM ₁₀	15.00	8.00	25.00	22.75	99.00	54.75	63.60	2	0.000*
- CO	0.42	0.24	0.62	0.17	0.92	0.52	34.09	2	0.000*
- O ₃	12.00	8.00	15.00	7.00	36.00	8.50	43.26	2	0.000*
- NO ₂	2.00	1.00	3.50	3.00	8.00	6.75	17.46	2	0.000*
- SO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nan									
- PM _{2.5}	13.00	8.25	30.00	20.00	55.50	26.50	34.29	2	0.000*
- PM ₁₀	24.00	12.00	43.00	24.50	83.50	30.25	58.09	2	0.000*
- CO	0.44	0.25	0.50	0.24	0.75	0.20	30.49	2	0.000*
- O ₃	17.00	8.00	19.00	12.00	39.00	6.00	42.93	2	0.000*
- NO ₂	3.00	2.00	6.00	1.50	8.00	3.00	59.84	2	0.000*
- SO ₂	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.40	2	0.497
Phrae									
- PM _{2.5}	11.00	6.50	32.00	22.25	45.50	20.25	34.77	2	0.000*
- PM ₁₀	21.50	10.25	46.00	32.00	74.50	33.50	72.61	2	0.000*
- CO	0.30	0.19	0.51	0.25	0.61	0.30	40.25	2	0.000*
- O ₃	17.50	6.50	23.00	10.50	43.00	9.00	53.31	2	0.000*
- NO ₂	5.00	2.00	10.00	7.00	12.00	4.75	52.24	2	0.000*
- SO ₂	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.04	2	0.595

Table 7 (Continues)

The concentrations of air pollutants	Rainy Season		Winter		Summer		Statistics	df	P-value
	Median	IQR	Median	IQR	Median	IQR			
Phayao									
- PM _{2.5}	10.00	6.00	29.00	24.50	55.00	29.00	35.82	2	0.000*
- PM ₁₀	18.00	10.00	44.00	27.75	78.00	54.00	73.78	2	0.000*
- CO	0.27	0.13	0.44	0.20	0.61	0.24	46.71	2	0.000*
- O ₃	18.00	7.00	26.00	11.50	46.00	12.00	46.25	2	0.000*
- NO ₂	4.00	2.00	7.50	3.50	9.00	4.50	51.12	2	0.000*
- SO ₂	1.00	0.25	1.00	0.00	1.00	0.00	1.55	2	0.460

* significant difference (p < 0.05)

3.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณสารมลพิษทางอากาศ จำแนกตามฤดูกาล เฉลี่ย 9 ปี พ.ศ. 2557 - พ.ศ. 2565

จาก Table 7 แสดงค่ามัธยฐาน (Median) และพิสัยควอไทล์ (IQR) ของปริมาณสารมลพิษทางอากาศในแต่ละฤดูกาล และจากการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย จำแนกตามฤดูกาล ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 - พ.ศ. 2565 ด้วยการทดสอบ Kruskal-Wallis Test พบว่า ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนแตกต่างกันอย่างน้อย 2 ฤดูกาลสำหรับทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน ดังนั้นจึงทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่เพื่อทดสอบว่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนของฤดูกาล คู่ใดที่แตกต่างกันโดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบ Mann-Whitney U Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนมีความแตกต่างกันทุกคู่ฤดูกาลในทุกจังหวัด โดยฤดูร้อนมีปริมาณสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนจำแนกตามฤดูกาล พบว่า ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนแตกต่างกันอย่างน้อย 2 ฤดูกาลสำหรับทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน ดังนั้นจึงทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบ Mann-Whitney U Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนมีความแตกต่างกันทุกคู่ฤดูกาลในทุกจังหวัด โดยฤดูร้อนมีปริมาณสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จำแนกตามฤดูกาล พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ฤดูกาลสำหรับทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน ดังนั้น จึงทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบ Mann-Whitney U Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า จังหวัดเชียงราย แม่ฮ่องสอน

น่าน และพะเยา มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันสำหรับทุกคู่ฤดูกาล ยกเว้นจังหวัดเชียงใหม่ ลำปาง ลำพูน และแพร่ ที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในฤดูร้อนไม่แตกต่างกับฤดูหนาว

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณก๊าซโอโซนจำแนกตามฤดูกาล พบว่า ทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนจะมีปริมาณก๊าซโอโซนแตกต่างกันอย่างน้อย 2 ฤดูกาล ยกเว้นจังหวัดเชียงใหม่ และเมื่อทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบ Mann-Whitney U Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ปริมาณก๊าซโอโซนมีความแตกต่างกันทุกคู่ฤดูกาลโดยฤดูร้อนมีปริมาณสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์จำแนกตามฤดูกาล พบว่า ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ฤดูกาลสำหรับทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน ดังนั้นจึงทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบ Mann-Whitney U Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า จังหวัดน่านมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์แตกต่างกันทุกคู่ฤดูกาล ยกเว้นจังหวัดเชียงใหม่ ลำปาง ลำพูน แพร่ และพะเยา ที่มีปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในฤดูร้อนไม่แตกต่างกับฤดูหนาว ส่วนจังหวัดเชียงราย และแม่ฮ่องสอนมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในฤดูฝนไม่แตกต่างกับฤดูหนาว

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จำแนกตามฤดูกาล พบว่า ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่แตกต่างกันในแต่ละฤดูกาลของจังหวัดลำพูน น่าน แพร่ และพะเยา สำหรับจังหวัดอื่นในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนจะมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ฤดูกาล และเมื่อทดสอบค่ามัธยฐานรายคู่โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบ Mann-Whitney U Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

พบว่า จังหวัดลำปางมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฤดูร้อนไม่แตกต่างกับฤดูหนาว ส่วนจังหวัดเชียงใหม่มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฤดูฝนไม่แตกต่างกับฤดูหนาว

4. สรุป

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณและเปรียบเทียบสารมลพิษทางอากาศโดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิของค่าเฉลี่ย สารมลพิษทางอากาศรายเดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 จากกรมควบคุมมลพิษ ผู้วิจัยคัดเลือกสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศที่มีการตรวจวัดค่าต่อเนื่อง เพื่อเป็นตัวแทนของพื้นที่ภาคเหนือตอนบน 8 จังหวัดของประเทศไทย ผลจากการศึกษาปริมาณสารมลพิษทางอากาศจำแนกตามฤดูกาลในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย พบว่า ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มีปริมาณมากที่สุดในเดือนมีนาคม ก๊าซโอโซนมีปริมาณมากที่สุดในเดือนมีนาคมถึงเมษายน ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีปริมาณมากที่สุดในเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคมโดยจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูงทุกเดือนเมื่อเทียบกับจังหวัดอื่น ๆ สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเดือนโดยจังหวัดลำปางมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูงเมื่อเทียบกับจังหวัดอื่น ๆ สารมลพิษทางอากาศที่ก่อให้เกิดปัญหาขึ้นทุกจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ประกอบด้วย ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และก๊าซโอโซน เนื่องจากพบว่าค่าที่เกินมาตรฐาน และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณสารมลพิษดังกล่าวพบว่า เมื่อฤดูกาลต่างกันปริมาณสารมลพิษจะแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาในภาพรวมพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยปริมาณสารมลพิษทางอากาศในฤดูร้อนสูงกว่าฤดูหนาว และฤดูฝนตามลำดับ ยกเว้นปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

5. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน และก๊าซโอโซนเป็นมลสารสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยปริมาณสารมลพิษดังกล่าวในฤดูร้อนจะสูงกว่าฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ ซึ่งฤดูร้อนจังหวัดที่ควรเฝ้าระวังการเกิดปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ จังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงรายและเชียงใหม่ จังหวัดที่ควรเฝ้าระวังการเกิดปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ จังหวัดแม่ฮ่องสอน ลำปางและเชียงราย สำหรับจังหวัดที่ควรเฝ้าระวังการเกิดปัญหาก๊าซโอโซนมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ จังหวัดพะเยา ลำปางและแพร่ ซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดมลพิษ

ดังกล่าว และนำมากำหนดมาตรการในการป้องกันให้ตรงกับสภาพปัญหาสารมลพิษทางอากาศของแต่ละจังหวัด วิเคราะห์หาแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมถึงรับมือกับปัญหาต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการอนุเคราะห์ข้อมูลกรมควบคุมมลพิษ และขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ที่ให้ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Attavanich, W. 2019. **Cost of Thai society from air pollution and countermeasures.** Available Source: <https://www.pier.or.th/abridged/2019/07/>, December 10, 2023. (in Thai)
- Attavanich, W. 2020. **Social Cost of air pollution from particulate matter 2.5 micrometers (PM2.5) in Thailand.** Working paper No.12/2020., Department of Economics, Faculty of Economics, Kasetsart University. (in Thai)
- Eastern Economic Corridor (EEC) Office. 2020. **Simple knowledge dissemination documents About the public AERMOD weather model.** Available Source: <http://eec-mtp.onep.go.th/report/aermod-2020.pdf>, December 8, 2023. (in Thai)
- Hansongnem, S. and Boonyawat, S. 2010. The relationship between atmospheric aerosol and meteorological factors in Thailand : net radiation, air temperature, annual rainfall, relative humidity and wind speed, pp. 26-33. In 48th Kasetsart University Annual Conference: Natural Resources and Environment. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Pochanaet, P. 2012. Air pollution and long-range transport in Asia: (1) East Asia. **NIDA Journal of Environmental Management** 8(1): 57-77. (in Thai)
- Pochanaet, P. 2014. Air pollution and long-range transport in Asia: (2) Southeast Asia. **Journal of Environmental Management** 10(2): 109-126. (in Thai)
- Pochanaet, P. 2016. The present state of urban air pollution problems in Thailand's large cities: cases of Bangkok, Chiang Mai and Rayong. **Journal of Environmental Management** 12(1): 113-132. (in Thai)

- Pollution Control Department. 2020. **Situation and management of air and noise pollution problems in Thailand.** Available Source: <https://www.pcd.go.th/publication/25841>, December 5, 2023. (in Thai)
- Pollution Control Department. 2022. **Situation and management of air and noise pollution problems in Thailand.** Available Source: <https://www.pcd.go.th/publication/30447>, December 11, 2023. (in Thai)
- Srinarang, T. and Ket-ord, R. 2020. Estimating the particulate matters (PM₁₀) with spatial interpolation methods in the northern of Thailand. **The Journal of Spatial Innovation Development** 1(2): 35-47. (in Thai)
- Suburairat, K. and Bunjongsiri, K. 2020. The quantitative relationships of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in each region and season. **Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal** 6(1): 94-103. (in Thai)
- WHO. 2023. **Ambient (outdoor) air pollution.** Available Source: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), December 10, 2023.



Research Article

แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ ของการไหลเวียนกระแสน้ำบริเวณชายฝั่ง จังหวัดตรัง

Two-Dimensional Numerical Modeling of Water Circulation along the Coast of Trang Province

นิคม อ่อนสี^{a,b}, กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์^{a,*}, สุริยันท์ สาระมูล^b และ อิซมิกา คิวยะพราหมณ์^bNikom Onsrī^{a,b}, Kattinat Sagulsawasdiṇ^{a,*}, Suriyan Saramul^b and Itchika Sivaipram^b^a สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150^a Department of Marine Science and Environment, Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya Trang Campus,

Sikao, Trang 92150, Thailand.

^b ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330^b Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-02-20

Revised: 2024-06-19

Accepted: 2024-06-25

Keywords:

Andaman Sea;

Delft3D-FLOW;

monsoon;

Malacca Strait

Investigating marine hydrodynamics along the Andaman Sea coast poses a significant challenge due to data limitations, which hinder a precise understanding of marine larvae transport and settlement patterns. To address this gap, this study aims to simulate hydrodynamics along the coast of Trang Province, focusing on two-dimensional water circulation to support effective aquatic resource management. The simulation results indicate that coastal sea circulation patterns are primarily influenced by tides, monsoons, and runoff. During flood currents, the average current flows toward the coast to the northeast of the study area, while during ebb currents, it shifts southwest. Additionally, variations in monsoon winds significantly influence surface currents; during the southwest monsoon, the currents are notably stronger, moving toward the northeastern to eastern coastline than usual. In contrast, during the northeast monsoon, surface currents distinctly shift away from the coastline toward the southwest to south of the study area. It was also observed that the average monthly current during each monsoon period is regulated by the flow entering the Malacca Strait. Consequently, the mean current at the model 's open boundary uniformly flows northwest, where it collides with the downstream flow from the north of the study area. This interaction redirects the current westward. The southern region of the study area, particularly the eastern coastal area, is influenced by runoff from the Trang River and the Palian River. The current in this area exhibits a clockwise eddy current south of Koh Libong and west of Koh Sukorn.

© 2025 Onsrī, N., Sagulsawasdiṇ, K., Saramul, S. and Sivaipram, I. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: kattinat.s@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Onsrī, N., Sagulsawasdiṇ, K., Saramul, S. and Sivaipram, I. 2025. 2-Dimensional Numerical Modeling of Water Circulation in the Coast of Trang Province. **Recent Science and Technology** 17(3): 262233.

บทคัดย่อ

การตรวจสอบอุทกพลศาสตร์ทางทะเลตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามันถือเป็นความท้าทายที่สำคัญเนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูล ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อความเข้าใจที่แม่นยำเกี่ยวกับรูปแบบการขนส่งและการตั้งถิ่นฐานของสัตว์น้ำวัยอ่อนในทะเล เพื่อแก้ไขช่องว่างนี้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองอุทกพลศาสตร์ตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามัน จังหวัดตรัง โดยเน้นไปที่การไหลเวียนของกระแสน้ำแบบ 2 มิติ เพื่อช่วยในการจัดการทรัพยากรสัตว์น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง ลมมรสุม และน้ำท่าเป็นหลัก ในช่วงขณะน้ำขึ้น กระแสน้ำเฉลี่ยจะเคลื่อนที่ไปทางชายฝั่งทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา ในขณะที่น้ำลงกระแสน้ำเฉลี่ยจะเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ นอกจากนี้ความผันแปรของลมมรสุมยังส่งผลต่อการไหลเวียนของกระแสน้ำในช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กระแสน้ำเคลื่อนที่เข้าหาแนวชายฝั่งทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออก แรงกว่าปกติ ในขณะที่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือกระแสน้ำเคลื่อนที่ออกจากแนวชายฝั่งไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้-ทิศใต้ ของพื้นที่ศึกษาอย่างเห็นได้ชัด และยังพบว่ากระแสน้ำเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละช่วงลมมรสุมถูกควบคุมด้วยกระแสน้ำที่ไหลเข้ามาทางช่องแคบมะละกา ส่งผลให้กระแสน้ำเฉลี่ยบริเวณขอบเขตเปิดของแบบจำลองทางทิศใต้ไหลเข้าอย่างสม่ำเสมอขึ้นไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ กระแสน้ำนี้ไหลไปปะทะกับกระแสน้ำที่ไหลลงจากทางทิศเหนือของพื้นที่ศึกษา ส่งผลให้กระแสน้ำไหลออกนอกพื้นที่ศึกษาไปทางทิศตะวันตก และสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณตอนใต้ของพื้นที่ศึกษาพื้นที่ชายฝั่งตะวันออกได้รับอิทธิพลจากน้ำท่าจากแม่น้ำตรัง และแม่น้ำปะเหลียน กระแสน้ำบริเวณนี้มีการไหลเป็นวง (Eddy Current) ตามเข็มนาฬิกาบริเวณทิศใต้ของเกาะลิบง และทิศตะวันตกของเกาะสุกร

คำสำคัญ: ทะเลอันดามัน, Delft3D-FLOW, ลมมรสุม, ช่องแคบมะละกา

1. บทนำ

จังหวัดตรังตั้งอยู่ในพื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามัน โดยมีลักษณะทางธรณีสัณฐานเป็นชายฝั่งทะเลยุบตัว (Submerged Shoreline) ส่งผลให้น้ำทะเลเข้าท่วมบริเวณผืนดินชายฝั่ง จังหวัดตรังมีแนวชายฝั่งยาวประมาณ 119 กิโลเมตร ประกอบด้วยป่าชายเลน แหล่งหญ้าทะเล และแนวปะการังที่อุดมสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีเกาะจำนวน 46 เกาะ กระจายอยู่ในพื้นที่อำเภอกันตังจำนวน 12 เกาะ อำเภอปะเหลียนจำนวน 13 เกาะ และอำเภอสิเกาจำนวน 21 เกาะ ระบบนิเวศชายฝั่งเหล่านี้ได้รับการยอมรับว่าเป็นระบบนิเวศที่สำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งเลี้ยงตัวอ่อนสัตว์น้ำ และแหล่งหากินของสัตว์ทะเลหลากหลายชนิด ลักษณะทางธรณีสัณฐานชายฝั่งดังกล่าว ร่วมกับอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง ลม และน้ำท่า ส่งผลให้รูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่จังหวัดตรังมีความซับซ้อน (Yingarigul, 2021) การทำความเข้าใจพลวัตการไหลเวียนของกระแสน้ำในภูมิภาคนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการจัดการชายฝั่งและการอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลอย่างมีประสิทธิภาพ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษารูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำทั้งในทะเลเปิดและทะเลปิดในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วโลก (Rhomad *et al.*, 2022; Umgiesser *et al.*, 2022; Montañó *et al.*, 2023) แบบจำลองอุทกพลศาสตร์นี้เป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการทำความเข้าใจและวิเคราะห์กระแสน้ำ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวางแผนและบริหารจัดการพื้นที่ชายฝั่งอย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ไม่เพียงแต่นำไปใช้ในการอธิบายรูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ที่สนใจได้เท่านั้น ยังสามารถนำไปใช้ในการอธิบายกระบวนการขนส่งและการลงเกาะของ

ตัวอ่อนสิ่งมีชีวิตในทะเล รวมถึงการศึกษาประชากรสิ่งมีชีวิตในทะเลและความเชื่อมโยงทางนิเวศวิทยาได้ (Tanner *et al.*, 2017; Mao *et al.*, 2019) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลองการติดตามอนุภาค เพื่ออธิบายรูปแบบการกระจายตัวของตัวอ่อนสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีส่วนสำคัญในการจัดการทรัพยากรทางทะเลอย่างมีประสิทธิภาพ แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ยังสามารถนำมาใช้ในการศึกษาการขนส่งและการกระจายตัวของขยะทะเล และการรั่วไหลของน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากแบบจำลองสามารถช่วยระบุพื้นที่ที่มีแนวโน้มจะเกิดการสะสมขยะทะเลหรือการสะสมตัวของน้ำมันที่รั่วไหล นอกจากนี้ยังสามารถคาดการณ์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจที่อาจเกิดขึ้น (Cucco *et al.*, 2009; Canu *et al.*, 2012; Lucas and Deleersnijder, 2020)

ปัจจุบันการศึกษาสภาพทางอุทกพลศาสตร์ของทะเลอันดามันโดยเฉพาะสเกลระดับท้องถิ่น (Local Scale) ยังมีน้อยมาก งานวิจัยของ Wyrski (1961) ได้อธิบายลักษณะการไหลเวียนของกระแสน้ำในระดับภูมิภาค (Regional Scale) ส่วนงานของ Rizal *et al.* (2012) และ Yingarigul (2021) ได้สร้างแบบจำลองอุทกพลศาสตร์เพื่ออธิบายการไหลเวียนของกระแสน้ำที่เกิดจากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง ลมมรสุม ฟลักซ์ความร้อน และน้ำท่า อย่างไรก็ตาม ผลจากแบบจำลองเหล่านี้ ยังเป็นการอธิบายภาพรวมการไหลเวียนของกระแสน้ำในทะเลอันดามันและอ่าวเบงกอลซึ่งเป็นรูปแบบในระดับภูมิภาค เนื่องจากขนาดของกริดในแบบจำลองมีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ไม่เห็นรูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณใกล้ชายฝั่งที่ชัดเจน ดังนั้นการศึกษานี้จึงเน้นการพิจารณารูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดตรัง โดยใช้ขนาดกริดที่มีความละเอียดมากกว่าการศึกษาก่อนหน้า (Rizal *et al.*, 2012; Yingarigul, 2021) เนื่องจากชายฝั่ง

จังหวัดตรังเป็นพื้นที่ที่มีความลึกเฉลี่ยไม่เกิน 15 เมตร อีกทั้งน้ำขึ้นน้ำลงยังมีพิสัยน้ำขึ้นน้ำลงสูงสุดประมาณ 2.5 เมตร และปริมาณน้ำท่าที่ไหลจากแม่น้ำลงสู่ทะเลมีปริมาณน้อย ดังนั้นในการศึกษาจึงใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ ผลจากการศึกษาสามารถนำไปใช้เพื่อศึกษากระบวนการขนส่ง การแพร่กระจาย และการตั้งถิ่นฐานสัตว์น้ำวัยอ่อนที่อาศัยอยู่ตามแนวชายฝั่งจังหวัดตรัง ซึ่งคาดว่าจะประโยชน์ในการวางแผนการจัดการ การอนุรักษ์ และการฟื้นฟูทรัพยากรสัตว์น้ำบริเวณชายฝั่งจังหวัดได้ต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน จังหวัดตรัง โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข แบบ 2 มิติ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ การรวบรวมและเตรียมข้อมูล การเตรียมแบบจำลอง Delft3D-FLOW การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง และการพิจารณารูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำ

2.1 รวบรวมข้อมูลและเตรียมข้อมูลสำหรับแบบจำลอง

2.1.1 ข้อมูลระดับน้ำ

ทำการตรวจวัดข้อมูลระดับน้ำ ด้วยเครื่องวัดระดับน้ำ (HOBO Water Level) ในภาคสนามในเดือนเมษายน 2565 จำนวน 2 สถานี ได้แก่ สถานีท่าเรือเกาะสุกร และสถานีหาดราชมงคล แสดงดังภาพที่ 1

2.1.2 ข้อมูลความเร็วและทิศทางของกระแสน้ำ

ทำการตรวจวัดข้อมูลความเร็วและทิศทางของกระแสน้ำ ด้วยเครื่องวัด Acoustic Doppler Current Profiler ยี่ห้อ Sentinel V รุ่น S50 (ADCP) สถานีเกาะไหง ต่อเนื่อง 25 ชั่วโมง ในช่วงวันที่ 23 เมษายน 2565 เวลา 11:00 น. ถึงวันที่ 24 เมษายน 2565 เวลา 12:00 น. แสดงดังภาพที่ 1

2.1.3 ข้อมูลความลึกน้ำ

เตรียมความลึกน้ำ และปรับแก้ระดับความลึกน้ำ โดยใช้ชุดข้อมูลจาก GEBCO (<https://gebco.net>) (The British Oceanographic Data Centre (BODC), 2024) ร่วมกับแผนที่เดินเรือกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ราว 308 (ภูเก็ต-กันตัง) 309 (เกาะราวี-สตูล) 402 (ทางเข้ากันตัง) และ 354 (เกาะรังนก-กันตัง) โดยความลึกน้ำหลังจากการปรับแก้แล้ว แสดงดังภาพที่ 1

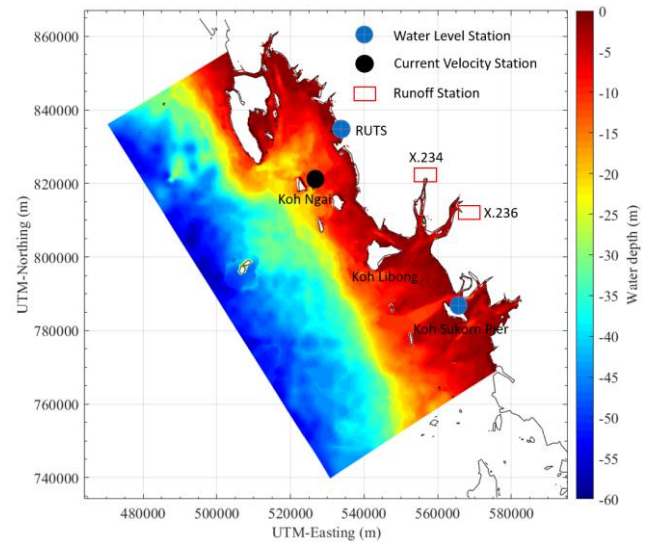


Figure 1 The map of model domain. The contour represents water depth obtained by combining data from GEBCO dataset and digitized data from nautical chart of the Navy Hydrographic Department nautical charts. The blue dots depict water level stations, the Rajamangala Beach Station (RUTS) and the Koh Sukorn Pier Station. While, black dot represents water level and current velocity station (Koh Ngai station).

2.1.4 ข้อมูลลม

ข้อมูลลมที่ระดับความสูง 10 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล ปานกลางทั้งความเร็วและทิศทางดาวน์โหลดจาก MERRA-2 (http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes/) (NASA, 2024) โดยข้อมูลมีความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.5 องศา และมีความละเอียดเชิงเวลาเท่ากับ 6 ชั่วโมง

2.1.5 ข้อมูลสำหรับแบบจำลองความร้อน

ข้อมูลเปอร์เซ็นต์เมฆปกคลุม (%Cloud coverage) อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (%Relative Humidity) ทำการรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองความร้อนของแบบจำลองเชิงตัวเลข Delft3D-FLOW

2.1.6 ข้อมูลน้ำท่า

รวบรวมข้อมูลน้ำท่า ที่สถานีบ้านป่าหมาก (X.234) แม่น้ำตรัง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง และสถานีบ้านย่านตาขาว (X.236) คลองปะเหลียนบ้านย่านตาขาว อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง จากสำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน แสดงดังภาพที่ 1

2.1.7 ข้อมูลอุณหภูมิและความเค็มของน้ำทะเล

อุณหภูมิและความเค็มของน้ำทะเลที่ขอบเขตเปิดในแบบจำลองใช้ค่าคงที่ เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีข้อมูลไม่เพียงพอ เป็นพื้นที่ชายฝั่งน้ำตื้น และมวลน้ำสามารถผสมผสานกันได้ดีตลอดคอลัมน์น้ำ โดยกำหนดอุณหภูมิหน้าที่ 30 องศาเซลเซียส และความเค็ม 31 PSU คงที่ตลอดปี ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามบริเวณสถานีเกาะไห่ (Koh Ngai) ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 แสดงดังภาพที่ 2

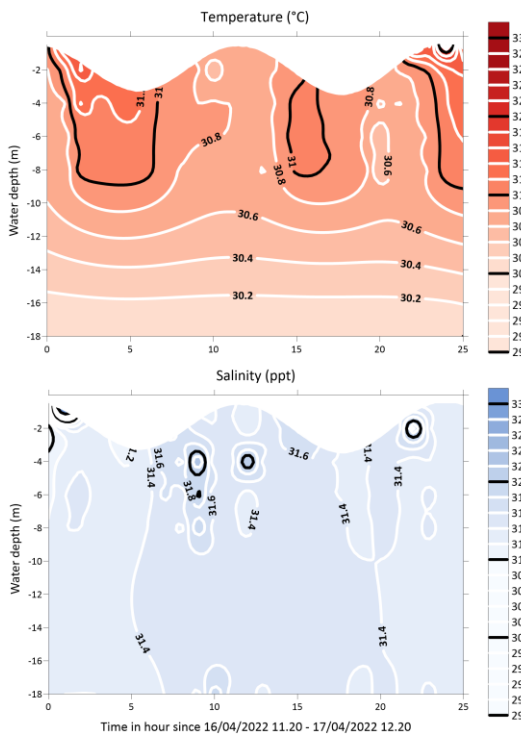


Figure 2 Water temperature (upper panel) and salinity (lower panel) over 25-hour period from April 16, 2022, at 11:20 AM to April 17, 2022, at 12:20 PM.

2.2 การเตรียมแบบจำลอง Delft3D-FLOW

2.2.1 การสร้างกริดและการประเมินความลึกบนกริด

สร้างกริดด้วยโปรแกรม RGFRID โดยกำหนดให้กริดมีลักษณะเป็นแบบ Regular Grid (กริดรูปสี่เหลี่ยม) ที่มีขนาดความกว้าง 165 เมตร และความยาว 205 เมตร บนระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ลักษณะกริดสำหรับแบบจำลองที่เตรียมแสดงดังภาพที่ 3 นำข้อมูลความลึกจากหัวข้อ 1.3 ทำการประมาณค่าลงบนกริดที่เตรียมได้โดยใช้โปรแกรม QUICKIN

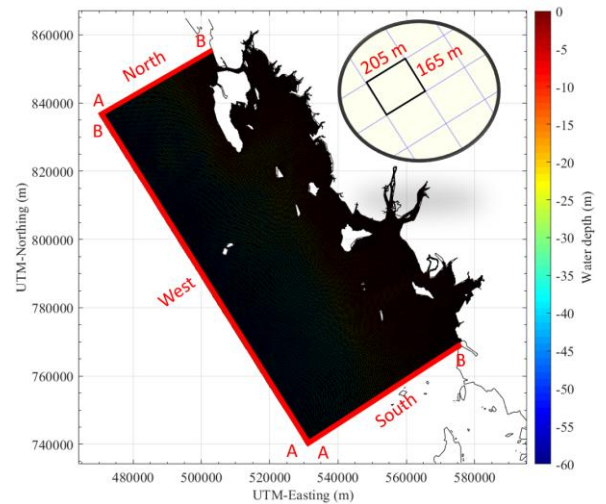


Figure 3 Detail of regular Grid in Cartesian Coordinates of model domain and the three open boundaries (highlighted by the red line), North, West, and South used in this study.

2.2.2 ระดับน้ำที่ขอบเขตเปิดของแบบจำลอง

ระดับน้ำที่ขอบเขตเปิดทั้ง 3 (เส้นสีแดงในภาพที่ 3) คำนวณจากค่าองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงจำนวน 14 องค์ประกอบ ได้แก่ M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 Q1 MF MM M4 MS4 และ MN4 ที่ดึงมาจากโปรแกรม Delft Dashboard (Van Ormondt *et al.*, 2020)

2.3 การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองที่เตรียมได้ในครั้งนี้ โดยเปรียบเทียบระดับน้ำรายชั่วโมงของเดือนเมษายน 2565 จากสถานีหาดราชมงคล และสถานีท่าเรือเกาะสุกร (จุดสีน้ำเงินในภาพที่ 1) ประเมินความสามารถของแบบจำลองโดยพิจารณา R^2 (R-squared) ของระดับน้ำจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง และค่า MAE (Mean Absolute Error) และค่า RMSE (Root Mean Square Error) ของผลต่างระดับน้ำจากผลการตรวจวัดและจากแบบจำลอง พร้อมทั้งคำนวณค่า Vectorial Difference หรือ VD (Tsimplis *et al.*, 1995) จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดและเฟสของ 8 องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง ได้แก่ M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 และ Q1 ระหว่างผลจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง ด้วยโปรแกรม Delft3D-TRIANA สำหรับการเปรียบเทียบความเร็วและทิศทางของกระแสน้ำได้ทำการวัดกระแสและระดับน้ำในภาคสนามด้วยเครื่อง ADCP ที่สถานีเกาะไห่ (ทิศตะวันออกของเกาะไห่ จุดสีดำ ในภาพที่ 1) ในช่วงวันที่ 23 เมษายน 2565 เวลา 11:00 น. ถึงวันที่ 24 เมษายน 2565 เวลา 12:00 น.

2.4 รูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำ

นำแบบจำลองอุทกศาสตร์สำหรับพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดตรังที่ได้จากการเปรียบเทียบในหัวข้อที่ 3 มา จำลองระดับน้ำและกระแสน้ำเป็นระยะเวลา 1 ปี (มกราคม-ธันวาคม 2565) โดยในการจำลองจะรวมปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ น้ำขึ้นน้ำลง ลมมรสุม พลังค์ความร้อน และน้ำท่า เข้าไปในแบบจำลองด้วย จากนั้นจะพิจารณารูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำแบบ 2 มิติ ในพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดตรัง จากนั้นจะพิจารณารูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำใน 3 ช่วงลมมรสุม ได้แก่ ช่วงเปลี่ยนลมมรสุมครั้งที่ 1 (เดือนเมษายน) ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (เดือนมิถุนายน) และช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (เดือนพฤศจิกายน) โดยในแต่ละช่วงลมมรสุมจะพิจารณารูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำเฉลี่ย 6 ชั่วโมง ของช่วงน้ำขึ้นและช่วงน้ำลง ในช่วงน้ำเกิดและช่วงน้ำตายของแต่ละช่วงลมมรสุม

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในส่วนนี้จะแบ่งผลการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งจังหวัดตรัง โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลจากการเปรียบเทียบแบบจำลอง และส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอรูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งจังหวัดตรังที่เกิดจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ

3.1 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

ในการเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงตัวเลขบริเวณชายฝั่งจังหวัดตรัง จะใช้ข้อมูลระดับน้ำตรวจวัดจาก 2 สถานี คือ สถานีท่าเรือเกาะสุกร และสถานีหาดราชฆงค ในช่วงเดือนเมษายน 2565 เป็นตัวเปรียบเทียบกับระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่เตรียมได้ในครั้งนี้จะใช้ค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่า R2 MAE และ RMSE เป็นตัวประเมิน ระดับน้ำรายชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลตรวจวัดและข้อมูลจากแบบจำลองของสถานีท่าเรือเกาะสุกรและสถานีหาดราชฆงค ในเดือนเมษายน 2565 แสดงดังภาพที่ 4 และ 5 จากภาพทั้งสอง พบว่าระดับน้ำจาก

แบบจำลองมีรูปแบบการขึ้นลงสอดคล้องจากระดับน้ำจากการตรวจวัด และเมื่อคำนวณค่าทางสถิติพบว่าค่า R2 ที่สถานีท่าเรือเกาะสุกรและสถานีหาดราชฆงค มีค่าเท่ากับ 0.97 และ 0.99 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ทางสถิติที่ดีเยี่ยม นอกจากนี้ค่า MAE ที่สถานีท่าเรือเกาะสุกรและสถานีหาดราชฆงค ยังมีค่าเพียง 0.10 และ 0.07 เมตร และค่า RMSE มีค่าเพียง 0.13 และ 0.09 เมตร ตามลำดับ ซึ่งทั้งค่า MAE และ RMSE ที่มีค่าต่ำ แสดงถึงความแม่นยำในการทำนายระดับน้ำด้วยแบบจำลอง อีกทั้งการวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) โดยค่าผลต่างระหว่างแอมพลิจูดที่คำนวณได้และแอมพลิจูดที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยมีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์และอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดที่คำนวณได้และแอมพลิจูดที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ 1 ขณะที่การวิเคราะห์ค่าเฟส (Phase) โดยผลต่างระหว่างเฟสที่คำนวณได้และเฟสที่ตรวจวัดได้มีค่าเฉลี่ยสูงสุดไม่เกิน 13 องศา (ตารางที่ 1) หากพิจารณาค่า VD ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า องค์ประกอบ M2 และ S2 เป็นองค์ประกอบที่มีค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่มีค่าแอมพลิจูดมากเป็นอันดับหนึ่งและอันดับสอง ตามลำดับ ที่สถานีท่าเรือเกาะสุกร ค่า VD ของ M2 และ S2 มีค่าประมาณ 9.8 และ 9.7 เซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่สถานีหาดราชฆงค มีค่าเท่ากับ 6.8 และ 6.7 ตามลำดับ ซึ่งค่า VD ดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับผลที่ได้จาก

ความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากข้อมูลรายชั่วโมง ที่พบว่าความคลาดเคลื่อนจะพบที่สถานีท่าเรือเกาะสุกรมากกว่าที่หาดราชฆงค และเมื่อคำนวณค่าผลรวมของค่า VD ของทั้ง 8 องค์ประกอบ พบว่ามีที่สถานีท่าเรือเกาะสุกรและสถานีหาดราชฆงค มีค่าเท่ากับ 26.0 และ 22.3 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของระดับน้ำรายชั่วโมง และแอมพลิจูดและเฟส ของ 8 องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลตรวจวัดและข้อมูลจากแบบจำลอง ทำให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายระดับน้ำในช่วงเวลาที่ระบุได้อย่างเที่ยงตรง ดังนั้นจึงนำแบบจำลองที่ได้ทำการเปรียบเทียบไปใช้ในการจำลองในช่วงที่มีการตรวจวัดกระแสน้ำด้วยเครื่อง ADCP ในบริเวณเกาะใหญ่เป็นเวลา 25 ชั่วโมง ผลของการเปรียบเทียบ แสดงดังภาพที่ 6 และ 7

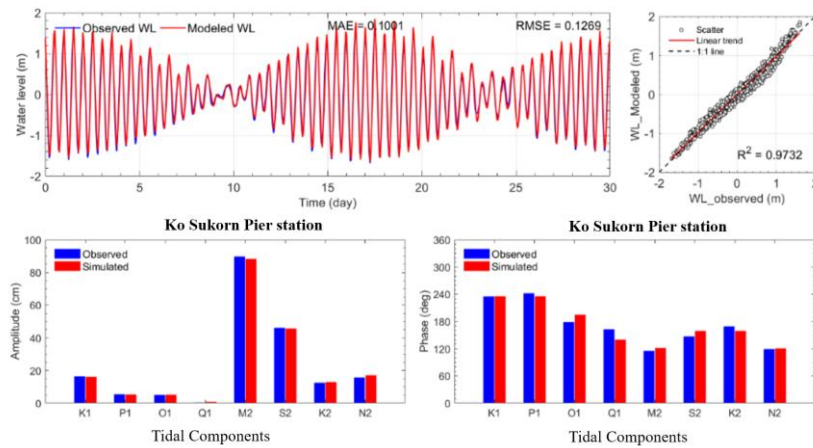


Figure 4 Water level comparison between the measurement (blue line) and model (red line) at Ko Sukorn Pier station during April 2022, including statistical values R^2 , MAE, and RMSE, as well as amplitude and phase values of 8 tidal components.

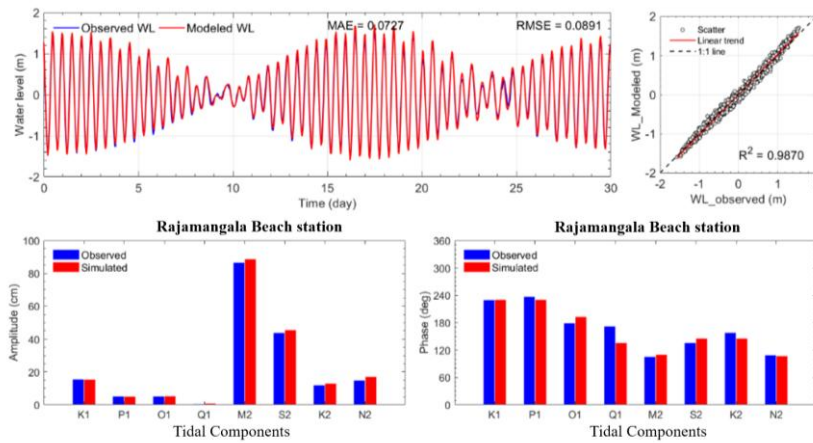


Figure 5 Water level comparison between the measurement (blue line) and model (red line) at Rajamangala Beach (RUTS) station during April 2022, including statistical values R^2 , MAE, and RMSE, as well as amplitude and phase of 8 tidal components.

Table 1 The evaluation of model simulation based on amplitude and phase 8 tidal component that obtained from model and observation.

Harmonic Constants	Ko Sukorn Pier Station				Rajamangala Beach Station (RUTS)			
	Hc-Ho (m)	Gc-Go (deg)	Hc/Ho	VD	Hc-Ho (m)	Gc-Go (deg)	Hc/Ho	VD
K1	-0.003	0.286	0.981	0.003	-0.001	0.721	0.993	0.002
P1	-0.001	-6.784	0.974	0.006	-0.001	-6.349	0.985	0.006
O1	0.001	16.239	1.013	0.015	0.001	14.191	1.016	0.013
Q1	0.004	-22.718	1.896	0.004	0.003	-36.247	1.657	0.005
M2	-0.014	6.239	0.984	0.098	0.021	4.247	1.025	0.068
S2	-0.004	12.177	0.991	0.097	0.016	9.756	1.036	0.077
K2	0.004	-10.223	1.035	0.023	0.010	-12.644	1.081	0.029
N2	0.014	1.510	1.086	0.014	0.022	-1.723	1.150	0.023
Mean	0.004	10.667	1.125	0.035	0.008	12.022	1.113	0.029

Note : Hc represents Computed Amplitude, Gc represents Computed Phase, Ho represents Observed Amplitude, Go represents Observed Phase, Hc-Ho indicates the difference between Computed Amplitude and Observed Amplitude, Gc-Go indicates the difference between Computed Phase and Observed Phase, Hc/Ho represents the ratio of Computed Amplitude to Observed Amplitude, VD represents Vector Difference between Computed Amplitude and Observed Amplitude

ผลจากการเปรียบเทียบระดับน้ำในระยะเวลา 25 ชั่วโมงที่สถานีเกาะใหญ่ พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.98 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ทางสถิติที่สูงมากระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลที่วัดจริง ขณะที่ผลการเปรียบเทียบความเร็วและทิศทางการกระแสน้ำพบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายกัน แต่ทิศทางการกระแสน้ำมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในการทำนายกระแสน้ำและระดับน้ำใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัด (ภาพที่ 6)

จากการวิเคราะห์ความแม่นยำของกระแสน้ำในทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (U) และกระแสน้ำในแนวเหนือ-ใต้ (V) โดย

เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลกระแสน้ำตรวจวัดที่ได้จาก ADCP กับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง ในระยะเวลา 25 ชั่วโมง ตั้งแต่วันที่ 23 เมษายน 2565 เวลา 11:20 พบว่าค่า R^2 สำหรับความเร็ว U และ V มีค่าเท่ากับ 0.70 และ 0.86 ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลที่ตรวจวัดได้ถึง 70% และ 86% ตามลำดับ ค่า MAE และ RMSE ที่ต่ำในทั้งสองทิศทางยืนยันถึงความแม่นยำในการทำนายกระแสน้ำของแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์นี้มีความสำคัญต่อการปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการพยากรณ์กระแสน้ำในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ (ภาพที่ 7)

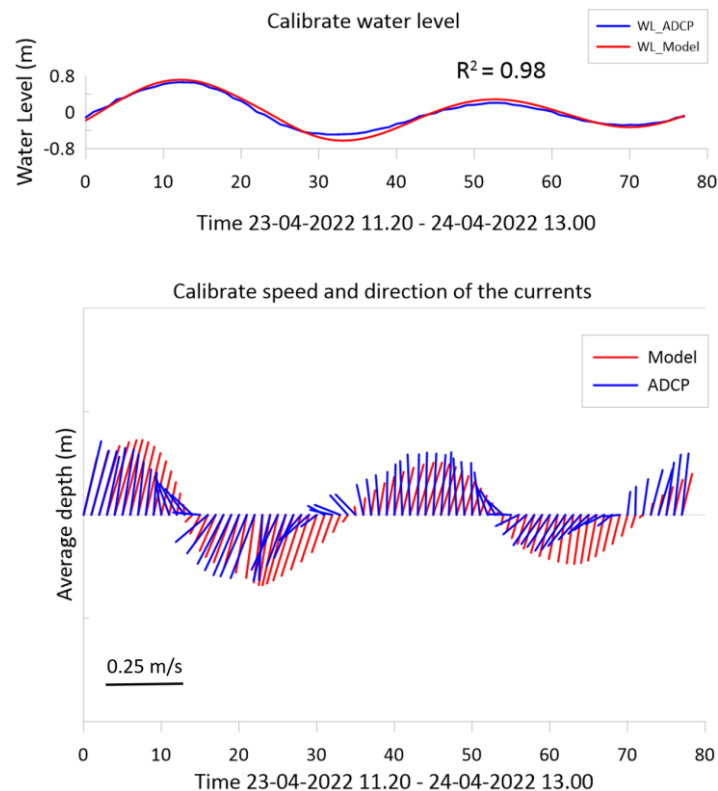


Figure 6 The water level (upper panel) and depth-averaged water current (lower panel) comparison between observation (blue) and model (red) over 25 hours at Ko Ngai station during 23 April 2022 11:20 to 24 April 2022 1:20.

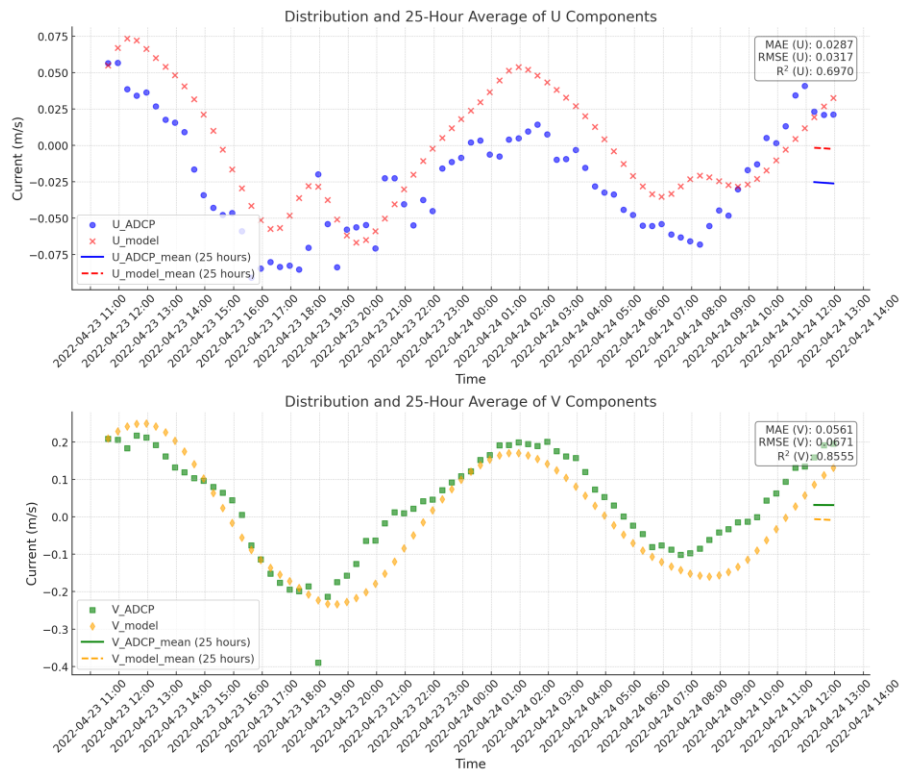


Figure 7 The water current comparison in x and y directions, over 25hours between observaion and model at Ko Ngai station during 23 April 2022 11:20 to 24 April 2022 1:20. The R^2 , MAE, and RMSE are also provided.

แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ ของพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดตรัง ที่ได้รับการเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำและกระแสน้ำแล้ว จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง ลมมรสุม พลังความร้อน และน้ำท่า มีผลต่อรูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำในลำดับถัดไป

3.2 รูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งจังหวัดตรัง

รูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามันในจังหวัดตรัง ภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง ลม พลังความร้อน และน้ำท่า สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ตามช่วงลมมรสุมที่แตกต่างกัน ได้แก่ ช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม (เดือนมีนาคม-เมษายน) ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (เดือนพฤษภาคม-กันยายน) และช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (เดือนพฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)

ในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม อิทธิพลของลมมรสุมในพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดตรัง ส่งผลต่อกระแสน้ำที่ผิวน้ำค่อนข้างน้อย เนื่องจากอิทธิพลของลมมีทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยลมจะพัดมาจาก 2 ทิศทางคือ ทิศตะวันตกและทิศตะวันออก (ภาพที่ 8a) ดังนั้น

ในช่วงนี้การไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งจังหวัดตรัง มีลักษณะแบบ Tidal Current กล่าวคือกระแสน้ำถูกควบคุมโดยอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงเป็นหลัก ในขณะที่ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ลมพัดทางทิศตะวันตกเฉียงใต้-ทิศตะวันตกเป็นหลัก (ภาพที่ 8b) ส่งผลให้กระแสน้ำที่ผิวน้ำที่เกิดเนื่องจากลมในขณะน้ำขึ้นมีการเคลื่อนตัวเข้าหาแนวชายฝั่งตลอดช่วงมรสุมเสริมกับทิศทางของกระแสน้ำที่เกิดเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนในขณะน้ำลง กระแสน้ำที่ผิวน้ำที่เกิดเนื่องจากลมมีทิศสวนทางกับทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงที่มีทิศไหลออกจากฝั่ง ส่งผลให้กระแสน้ำตามแนวชายฝั่งเคลื่อนตัวลงทางทิศใต้ของพื้นที่ศึกษาดังนั้นจึงพบว่าความเร็วกระแสน้ำช่วงน้ำลงจะช้ากว่าช่วงน้ำขึ้นสำหรับช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ภาพที่ 8c) ส่งผลให้กระแสน้ำที่ผิวน้ำที่เกิดเนื่องจากลมมีทิศไหลออกจากฝั่ง ซึ่งสวนทางกับกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง ในขณะน้ำขึ้นทำให้กระแสน้ำในขณะน้ำขึ้นไหลช้ากว่าขณะช่วงน้ำลง เนื่องจากช่วงน้ำลงได้รับแรงสนับสนุนของลมที่พัดออกจากฝั่งทาง

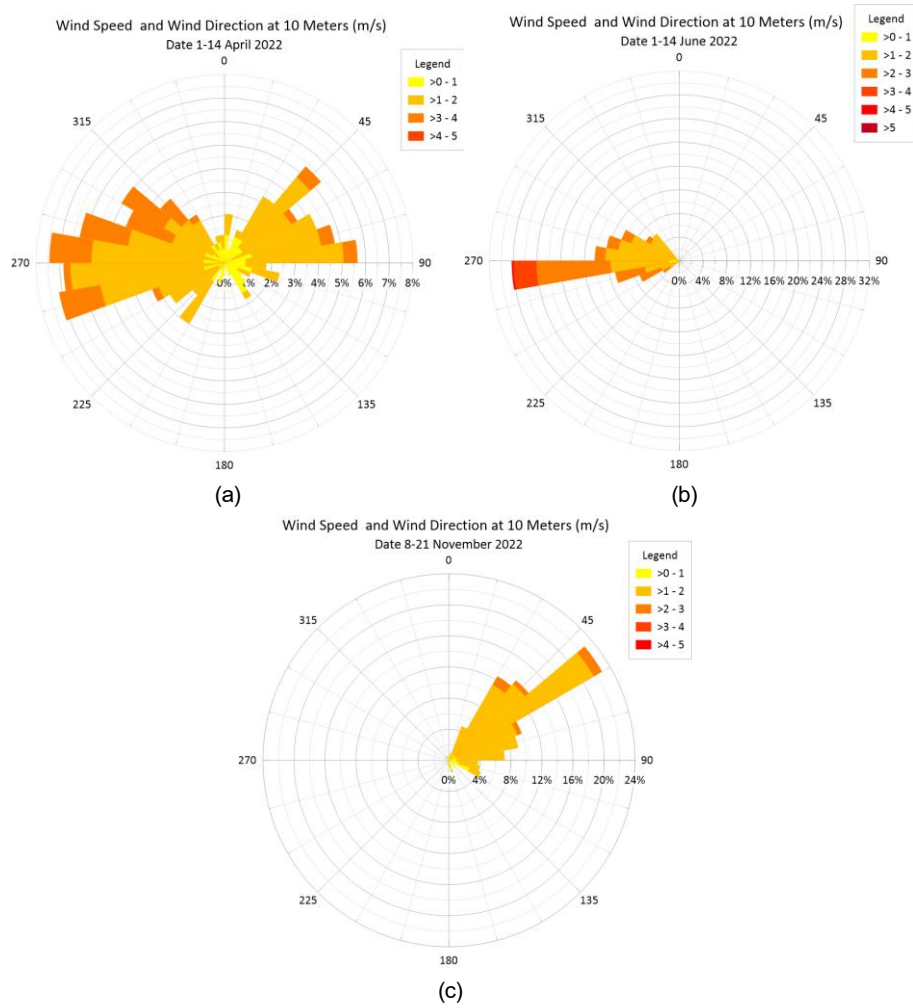


Figure 8 The diagram depicts the wind direction and speed (m/s) occurring in the study area during different monsoon periods: (a) inter-monsoon, (b) southwest monsoon, and (c) northeast monsoon.

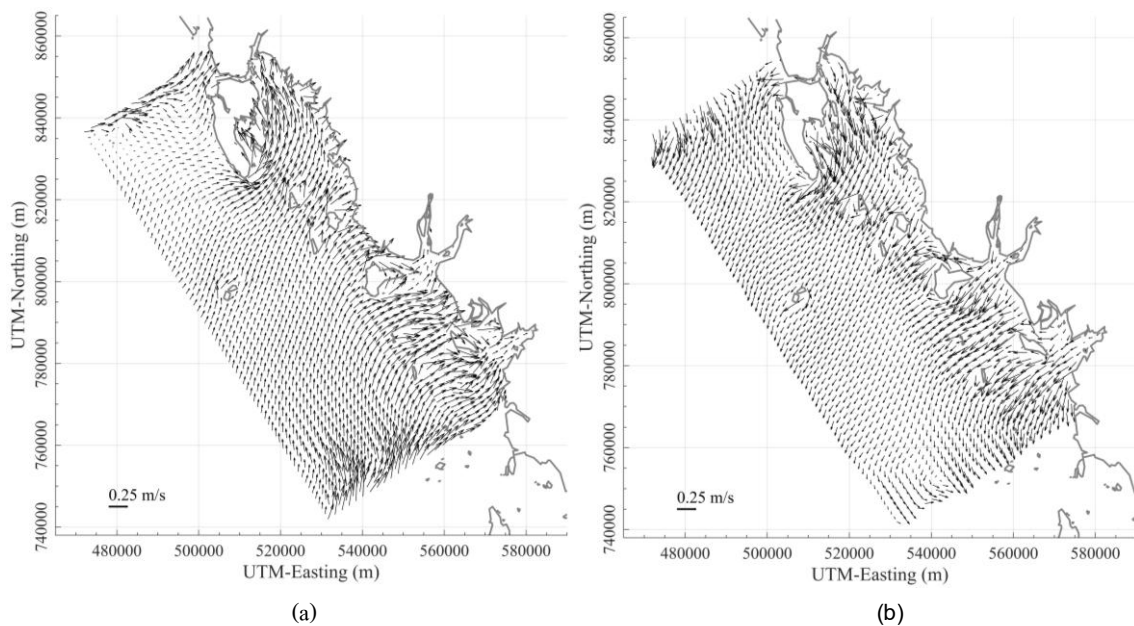


Figure 9 The flow velocity from the model during (a) flood tide and (b) ebb tide, averaged over 6-hour intervals, during the spring tides in the inter-monsoon period (April, 2022).

กระแสน้ำในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม

ในช่วงน้ำเกิด กระแสน้ำเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ในขณะน้ำขึ้น พบว่าความเร็วเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.05-0.45 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออก (ภาพที่ 9a) ส่วนในขณะน้ำลง พบว่าความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.06-0.52 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันออกเฉียงใต้-ทิศใต้ (ภาพที่ 9b) จากภาพที่ 9 พบว่าบริเวณตอนบนของพื้นที่ศึกษา กระแสน้ำเฉลี่ยขณะน้ำลงไหลเร็วกว่าขณะน้ำขึ้น ส่วนบริเวณตอนล่างของพื้นที่ศึกษา ความเร็วของกระแสน้ำเฉลี่ยขณะน้ำขึ้นไหลเร็วกว่าช่วงขณะน้ำลง และกระแสน้ำเฉลี่ยบริเวณแนวชายฝั่งมีความเร็วกว่าพื้นที่ทะเลเปิดอย่างเห็นได้ชัด คาดว่าอิทธิพลของลมในช่วงนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อความเร็ว

และทิศทางของกระแสน้ำมากนัก กระแสน้ำในช่วงนี้คาดว่าจะได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงเป็นหลัก

ในช่วงน้ำตาย กระแสน้ำเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ในขณะน้ำขึ้น มีค่าความเร็วอยู่ระหว่าง 0.01-0.23 เมตรต่อวินาที โดยมีทิศทางการไหลของกระแสน้ำไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออก (ภาพที่ 10a) ส่วนขณะน้ำลง พบว่าความเร็วมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.28 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้-ทิศใต้ (ภาพที่ 10b) เมื่อเปรียบเทียบกระแสน้ำเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย พบว่าความเร็วกระแสน้ำในช่วงน้ำตายไหลช้ากว่าในช่วงน้ำเกิดอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบมีการไหลของกระแสน้ำวน (Eddy Current) ในช่วงน้ำตายทั้งในช่วงน้ำขึ้นและช่วงน้ำลงอีกด้วย

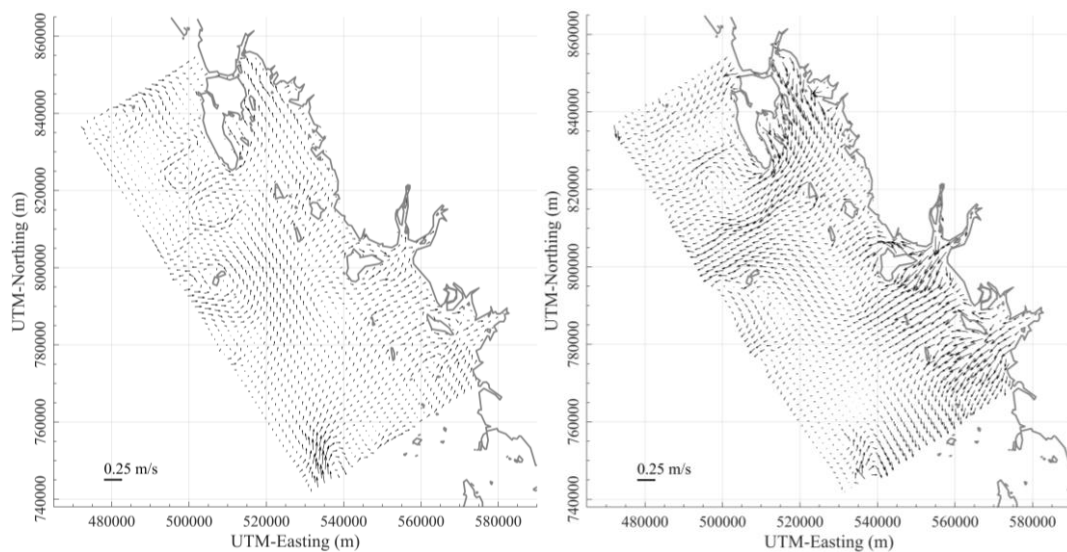


Figure 10 The flow velocity from the model during (a) flood tide and (b) ebb tide, averaged over 6-hour intervals, during the neap tides in the inter-monsoon period (April, 2022).

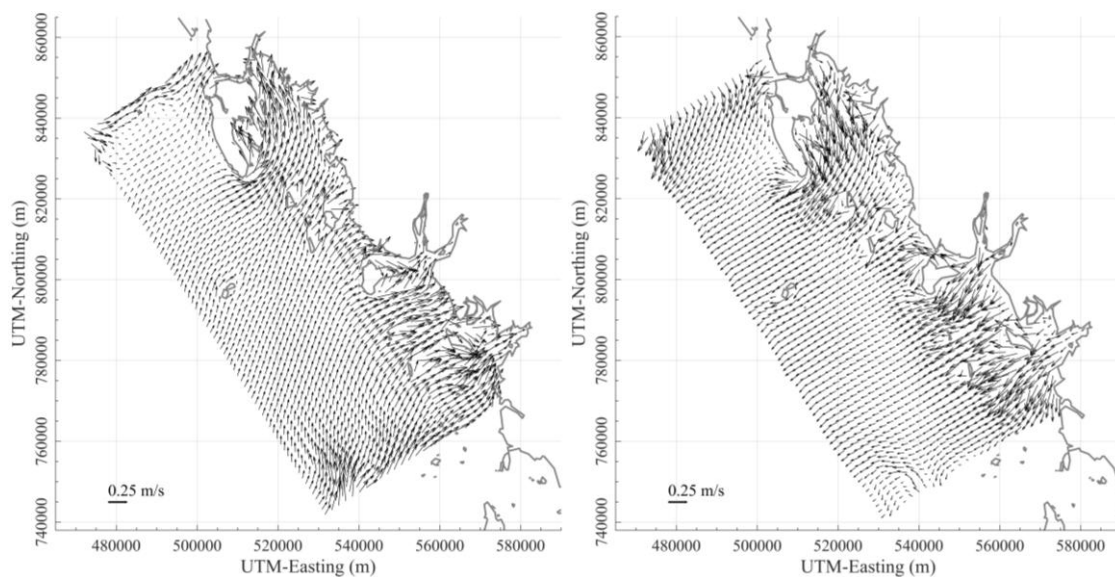


Figure 11 The flow velocity from the model during (a) flood tide and (b) ebb tide, averaged over 6-hour intervals, during the spring tides in the Southwest monsoon period (June, 2022).

กระแสน้ำในช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

ในช่วงน้ำเกิด กระแสน้ำเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ในขณะน้ำขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.47 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออก (ภาพที่ 11a) ส่วนในช่วงน้ำลง ความเร็วมีค่าอยู่ระหว่าง 0.06-0.48 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้ (ภาพที่ 11b) จากภาพที่ 11 พบว่าความเร็วของกระแสน้ำ บริเวณตอนบนของพื้นที่ศึกษา ในขณะน้ำลง จะไหลเร็วกว่าช่วงน้ำขึ้น ส่วนบริเวณตอนล่างของพื้นที่ศึกษาในช่วงน้ำขึ้น กระแสน้ำไหลเร็วกว่าในช่วงน้ำลง นอกจากนี้บริเวณแนวชายฝั่งด้านตะวันออก พบว่ามีกระแสน้ำในช่วงน้ำขึ้นไหลเร็วกว่าในช่วงน้ำลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงสนับสนุนจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

ในช่วงน้ำตาย กระแสน้ำเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ในขณะน้ำขึ้น มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.28 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออก (ภาพที่ 12a) ส่วนในช่วงน้ำลง ความเร็วมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.27 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้-ทิศใต้ (ภาพที่ 12b) เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 11 และ 12 พบว่ากระแสน้ำเฉลี่ยในช่วงน้ำตายไหลช้ากว่าในช่วงน้ำเกิดอย่างเห็นได้ชัด ทั้งขณะในช่วงน้ำขึ้นและในช่วงน้ำลง เมื่อเปรียบเทียบกระแสน้ำที่พบในช่วงเปลี่ยนลมมรสุมและในช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พบว่าอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ส่งผลให้กระแสน้ำเฉลี่ยบริเวณแนวชายฝั่งขณะน้ำขึ้นมีความเร็วกว่าช่วงน้ำลง

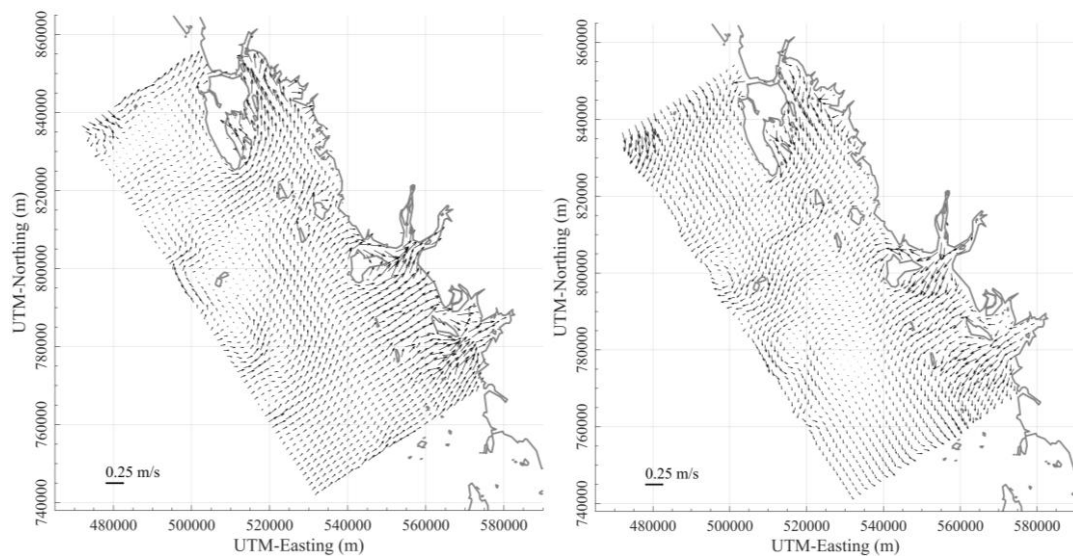


Figure 12 The flow velocity from the model during (a) flood tide and (b) ebb tide, averaged over 6-hour intervals, during the neap tides in the Southwest monsoon period (June, 2022).

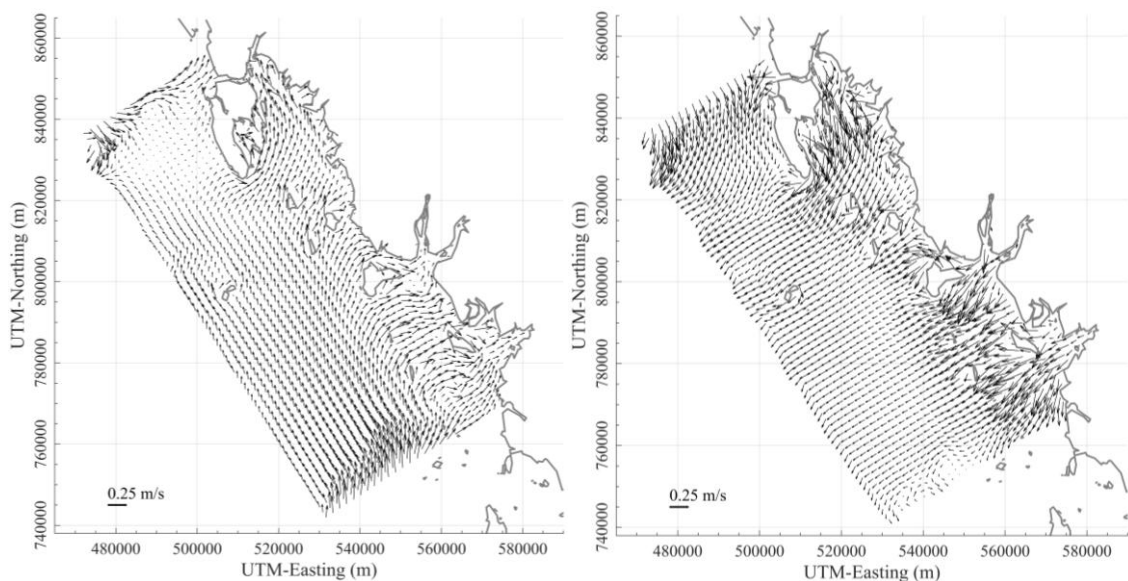


Figure 13 The flow velocity from the model during (a) flood tide and (b) ebb tide, averaged over 6-hour intervals, during the spring tides in the Southwest monsoon period (November, 2022).

กระแสน้ำในช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

ในช่วงน้ำเกิด กระแสน้ำเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ความเร็วของกระแสน้ำเฉลี่ยในช่วงน้ำขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.04-0.35 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออก (ภาพที่ 13a) ส่วนในช่วงน้ำลง พบว่าความเร็วของกระแสน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.06-0.49 เมตรต่อวินาที โดยมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้-ทิศใต้ (ภาพที่ 13b) จากภาพที่ 13 พบว่ากระแสน้ำเฉลี่ยบริเวณแนวชายฝั่งทางด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษาขณะน้ำลง ไหลเร็วกว่าช่วงน้ำขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณตอนบนของพื้นที่ศึกษา เมื่อเทียบกับช่วงลมมรสุมอื่นๆ กระแสน้ำขณะน้ำลงจะไหลเร็วกว่าขณะ

น้ำขึ้น เนื่องจากมีอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่ทำให้กระแสน้ำเนื่องจากลมไหลออกจากฝั่งเป็นแรงเสริม

ในช่วงน้ำตาย กระแสน้ำเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ขณะน้ำขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.22 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันออก (ภาพที่ 14a) ส่วนในช่วงน้ำลง พบว่าความเร็วมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.24 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางการไหลไปยังทิศตะวันตกเฉียงใต้-ทิศใต้ (ภาพที่ 14b) จากภาพที่ 14 พบว่ากระแสน้ำเฉลี่ยในช่วงน้ำตายไหลช้ากว่าในช่วงน้ำเกิดอย่างเห็นได้ชัดทั้งขณะช่วงน้ำขึ้นและน้ำลง กระแสน้ำมีทิศทางการไหลออกจากชายฝั่งขณะน้ำลง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับช่วงน้ำเกิด นอกจากนี้ยังพบการไหลของกระแสน้ำวน (Eddy Current) ขณะช่วงน้ำขึ้นและน้ำลงอีกด้วย

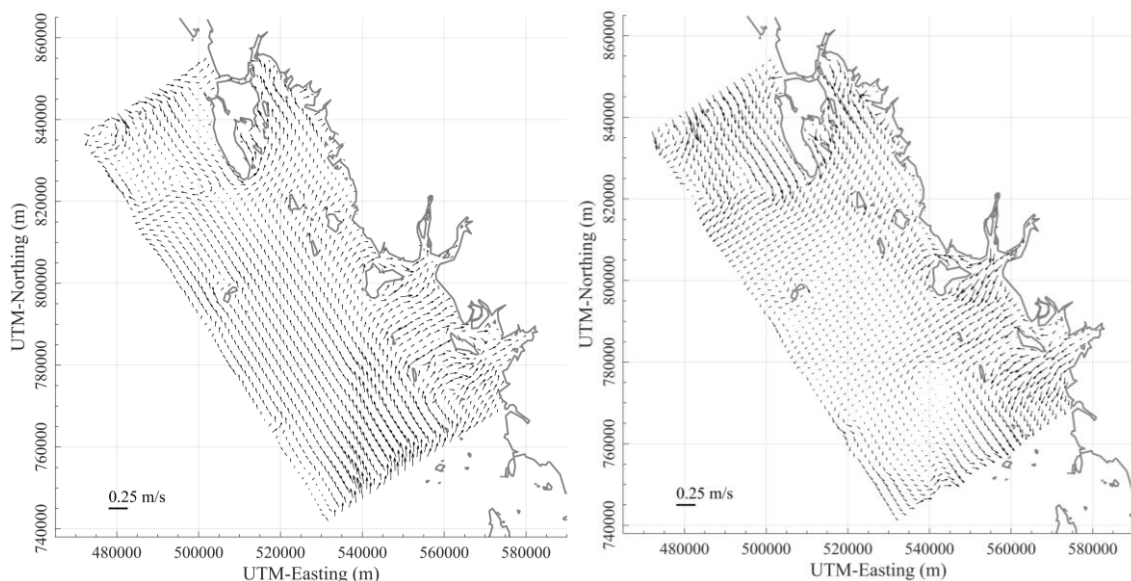


Figure 14 The flow velocity the model during (a) flood tide and (b) ebb tide, averaged over 6-hour intervals, during the neap tides in the Southwest monsoon period (November, 2022).

ภาพที่ 15 แสดงรูปแบบของกระแสน้ำเฉลี่ยรายเดือน ทั้ง 3 ฤดู ซึ่งส่วนใหญ่กระแสน้ำจะไหลไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ทิศเหนือเป็นหลัก ในบริเวณชายฝั่งบางส่วนช่วงตอนกลางและตอนบนพบกระแสน้ำไหลขนานไปตามแนวชายฝั่งตั้งแต่ชายฝั่งหาดเจ้าไหม ตำบลไม้ผาด อำเภอสิเกา ไหลเลียบไปทางชายฝั่งบ้านแหลมไทรและไหลย้อนกลับออกไปรวมกันบริเวณร่องน้ำระหว่างหัวเกาะโพงกับท้ายเกาะลันตา อำเภอเกาะลันตา จังหวัดกระบี่ และสังเกตเห็นกระแสน้ำจากฝั่งทิศเหนือไหลเข้ามาปะทะกับกระแสน้ำไหลเข้ามาต่อเนื่องจากทางทิศใต้ ส่งผลให้เกิดแนว

เส้นทางกระแสน้ำไหลออกต่อเนื่องไปจนถึงบริเวณทางทิศเหนือของเกาะรอกฝั่งขอบเขตเปิดของแบบจำลองทางทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษา และไหลออกนอกพื้นที่ศึกษาฝั่งทะเลเปิด บริเวณตอนใต้ของพื้นที่ศึกษาด้านแนวชายฝั่งตะวันออกได้รับอิทธิพลจากน้ำท่าจากแม่น้ำตรัง และแม่น้ำปะเหลียน กระแสน้ำที่พบบริเวณนี้มีการไหลเป็นวง (Eddy Current) ตามเข็มนาฬิกาบริเวณทิศใต้ของเกาะลิบง และทิศตะวันตกของเกาะสุกร นอกจากนี้พบว่าบริเวณชายฝั่งทางตอนใต้บางส่วนบริเวณขอบเขตเปิดมีการไหลออกนอกพื้นที่ศึกษาเช่นกัน

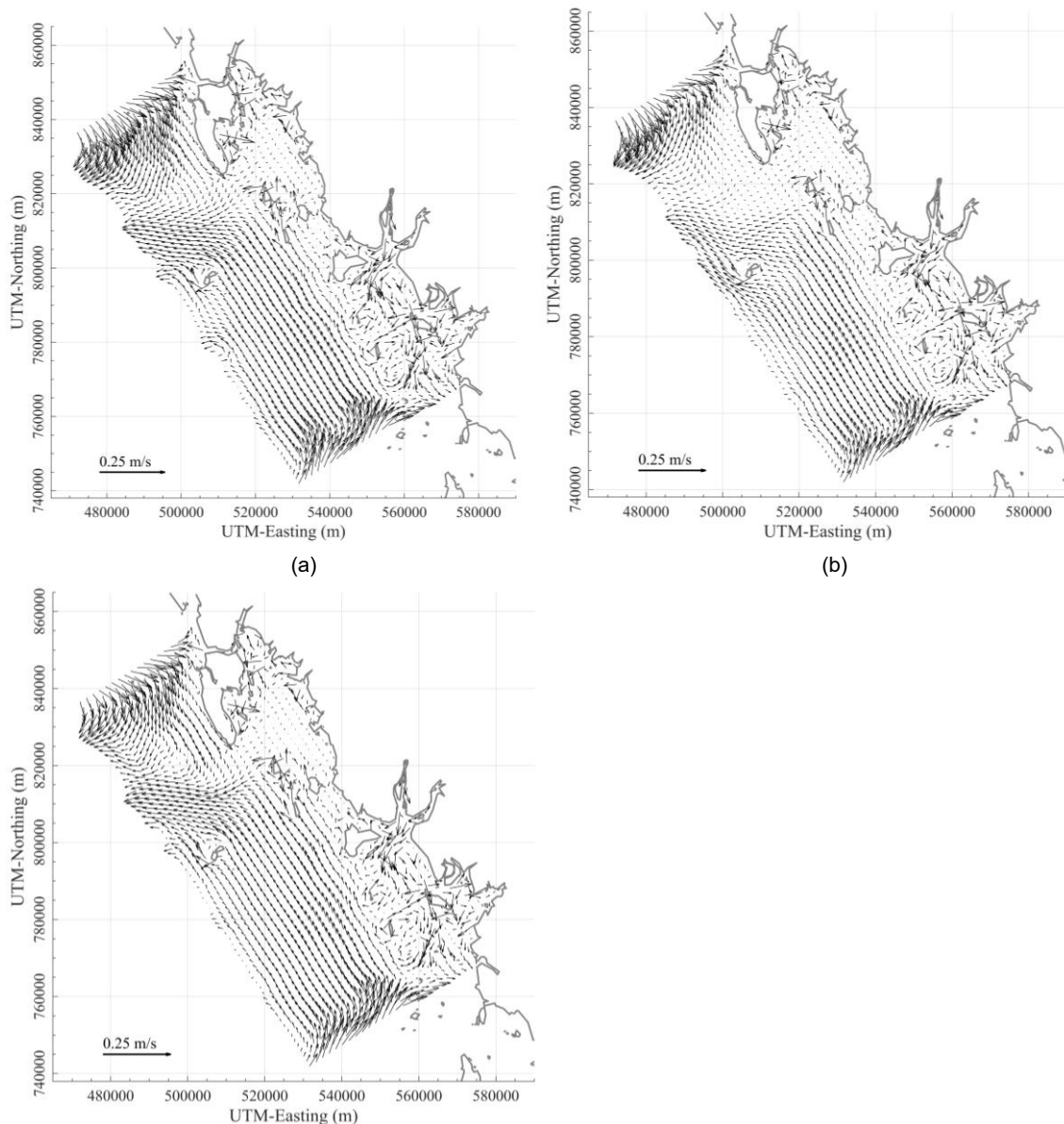


Figure 15 Two-dimensional average water flow patterns monthly during the inter-monsoon period (April, 2022 (a)), the southwest monsoon period (June, 2022 (b)), and the northeast monsoon period (November, 2022 (c)).

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งจังหวัดตรังโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ (การศึกษาครั้งนี้) และการศึกษาโดยใช้แบบจำลองอุทกศาสตร์แบบ 3 มิติ ของ *Onsri et al. (2024)* โดยภาพรวมไม่แตกต่างกันมากนักระหว่าง 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากพื้นที่ศึกษาเป็นเขตน้ำตื้น จึงมีอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้อิทธิพลของลมในช่วงเดือนที่เป็นตัวแทนมีความเร็วลมเฉลี่ยค่อนข้างต่ำไม่เกิน 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งสภาพนี้มีผลทำให้กระแสน้ำเฉลี่ยมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมากในระยะเวลาที่กำหนด อย่างไรก็ตาม จากภาพรวมของช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับผลจากการศึกษาที่ผ่านมาของ *Wyrski, 1961; Rizal et al., 2012; Yingarigul, 2021* ทั้ง 3 การศึกษานี้เป็นตัวอย่างที่สนับสนุนและ

ยืนยันความคล้ายคลึงกันของรูปแบบของกระแสน้ำเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษา โดยสังเกตได้ว่ากระแสน้ำจากช่องแคบมะละกามีการไหลขึ้นไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือสู่ทะเลอันดามันเข้าสู่พื้นที่ศึกษาทางทิศใต้อย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับผลการจำลองกระแสน้ำเฉลี่ยในช่วงฤดูลมมรสุมอื่น ๆ ในฝั่งตรงข้ามทางทิศเหนือของพื้นที่ศึกษาช่วงนี้กระแสน้ำมีการไหลเข้าสู่ทะเลอันดามันที่อยู่ใกล้ชายฝั่งของคาบสมุทรมลายูเซีย และไหลไปทางเกาะภูเก็ต ไหลผ่านพื้นที่ชายฝั่งกระบี่ และไหลเข้าสู่พื้นที่ศึกษา (*Wyrski, 1961; Rizal et al., 2012; Yingarigul, 2021*) ในขณะที่ช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือการไหลของกระแสน้ำเฉลี่ยในช่องแคบมะละกายังคงมีการไหลขึ้นไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือสู่ทะเลอันดามันเสมอ และไหลเข้าพื้นที่ศึกษาเสมอเช่นเดียวกับผลการจำลองกระแสน้ำเฉลี่ยในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมและช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ สอดคล้องกับผลจากการศึกษาที่ผ่านมาของ *Wyrski (1961); Rizal et al.*

(2012); Yingarigul (2021) แต่ในพื้นที่ตอนบน (ทางทิศเหนือของแบบจำลองบริเวณเกาะลันตา จังหวัดกระบี่) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองกระแสน้ำจากการศึกษานี้กับ Wyrski (1961); Rizal *et al.* (2012); Yingarigul (2021) มีความแตกต่างกันเล็กน้อย กระแสน้ำเฉลี่ยในแบบจำลองมีการไหลเข้ามาในพื้นที่ศึกษา ขณะที่ผลการศึกษาก่อนหน้าของ Wyrski (1961); Rizal *et al.* (2012); Yingarigul (2021) พบว่ากระแสน้ำยังคงไหลออกนอกพื้นที่ศึกษาไปทางเกาะภูเก็ต ซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับขนาดของกริด โดยที่การศึกษาของ Yingarigul (2021) มีขนาดกริดที่เล็กที่สุดเมื่อเทียบกับการศึกษาอื่น ๆ ก่อนหน้าประมาณ 18.3x18.3 กิโลเมตร ในขณะที่การศึกษานี้มีขนาดกริดประมาณ 0.2x0.2 กิโลเมตร ซึ่งทำให้มีความแตกต่างกันในพื้นที่กริดประมาณ 1,000 เท่า ความแตกต่างในขนาดกริดนี้อาจเป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้รูปแบบของกระแสน้ำแสดงรายละเอียดมากขึ้นในพื้นที่ศึกษา ดังนั้นจึงคาดว่าจะต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไปในอนาคต เพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ดังกล่าวในระดับที่ละเอียดอ่อนขึ้น นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองที่อาจส่งผลกระทบต่อไหลเวียนของกระแสน้ำ เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเค็มของน้ำทะเลบริเวณขอบเขตเปิดของแบบจำลอง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเค็มจากการไหลของน้ำท่า รวมถึงการขาดข้อมูลความเร็วลมแบบเรียลไทม์ในพื้นที่ศึกษา ข้อจำกัดเหล่านี้ควรได้รับการพิจารณาในงานวิจัยในอนาคตเพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการจำลอง

4. สรุป

การวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติสำหรับพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดตรัง โดยการปรับเทียบแบบจำลองจากข้อมูลระดับน้ำและกระแสน้ำในพื้นที่ศึกษา ผลการเปรียบเทียบค่าทางสถิติ เช่น R^2 , MAE และ RMSE แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างข้อมูลตรวจวัดและข้อมูลจากแบบจำลองมีค่าน้อยมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำเพียงพอในการอธิบายลักษณะของกระแสน้ำที่เกิดจากน้ำขึ้นน้ำลง แบบจำลองที่ได้รับการปรับเทียบนี้ได้นำมาศึกษาการไหลเวียนของกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งจังหวัดตรังในแต่ละฤดู ซึ่งได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง ลมมรสุม ฟลักซ์ความร้อน และน้ำท่า ผลการศึกษาพบว่าการไหลเวียนของกระแสน้ำมีความแตกต่างกันทั้งตามฤดูกาลและช่วงเวลาขึ้นลงของระดับน้ำ รวมถึงพื้นที่ที่พบกระแสน้ำ การพิจารณาตัวแปรเหล่านี้อย่างเป็นระบบช่วยให้เข้าใจแนวโน้มและพฤติกรรมการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดตรังได้อย่างละเอียดและแม่นยำ ส่งผลให้แบบจำลองนี้มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากขึ้น แบบจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติสำหรับการไหลเวียนของน้ำที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษานี้สามารถ

ใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทำนายและจำลองสถานการณ์ในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำนายการกระจายตัวของตัวอ่อนของสัตว์น้ำต่าง ๆ ในทะเล

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund (ววน.) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565” รหัสโครงการ 166640 ขอขอบคุณศูนย์เรียนรู้ธนาคารปูม้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และบ้านหาดทรายทอง 1 (เกาะสุกร) สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่ทำการศึกษาและการให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษา

6. เอกสารอ้างอิง

- Canu, D.M., Solidoro, C., Umgiesser, G., Cucco, A. and Ferrarin, C. 2012. Assessing confinement in coastal lagoons. **Marine pollution bulletin** 64(11): 2391-2398.
- Cucco, A., Umgiesser, G., Ferrarin, C., Perilli, A., Canu, D.M. and Solidoro, C. 2009. Eulerian and lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin. **Ecological Modelling** 220(7): 913-922.
- Lucas, L.V. and Deleersnijder, E. 2020. Timescale methods for simplifying, understanding and modeling biophysical and water quality processes in coastal aquatic ecosystems: A review. **Water** 12(10): 2717.
- Mao, X., Guo, X., Kubota, T. and Wang, Y. 2019. Numerical studies on snow crab (*Chionoecetes opilio*) larval survival and transport in the Sea of Japan. **Progress in Oceanography** 179: 102204.
- Montaño, M.M., Suanda, S.H. and de Souza, J.M.A.C. 2023. Modelled coastal circulation and Lagrangian statistics from a large coastal embayment: The case of Bay of Plenty, Aotearoa New Zealand. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 281: 108212.
- NASA. 2024. **Wind data at 10 meters above sea level**. Available Source: http://www.gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes, June 19, 2024.
- Onsri, N., Sivaipram, I., Boonsanit, P., Sagulsawasdiapan, K. and Saramul, S. 2024. Larval Dispersal Modelling of the Blue Swimming Crab *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) from the Crab Banks along the

Coast of Trang Province, Southern Thailand. **Water** 16(2): 349.

Rhomad, H., Khalil, K., Neves, R., Sobrinho, J., Dias, J.M. and Elkalay, K. 2022. Three-dimensional hydrodynamic modelling of the Moroccan Atlantic coast: A case study of Agadir bay. **Journal of Sea Research** 188: 102272.

Rizal, S., Damm, P., Wahid, M.A., Sündermann, J., Ilhamsyah, Y., Iskandar, T. and Muhammad, M. 2012. General circulation in the Malacca Strait and Andaman Sea: A numerical model study. **American Journal of Environmental Sciences** 8(5): 479-488.

Tanner, S.E., Teles-Machado, A., Martinho, F., Peliz, Á. and Cabral, H. N. 2017. Modelling larval dispersal dynamics of common sole (*Solea solea*) along the western Iberian coast. **Progress in Oceanography** 156: 78-90.

The British Oceanographic Data Centre (BODC). 2024. **The GEBCO_2022 Grid**. Available Source: https://www.gebcoscientific.org/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebcoscientific_2022/, June 22, 2024.

Tsimplis, M.N., Proctor, R. and Flather, R.A. 1995. A two-dimensional tidal model for the Mediterranean Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans** 100(C8): 16223-16239.

Umgiesser, G., Ferrarin, C., Bajo, M., Bellafiore, D., Cucco, A., De Pascalis, F. and Arpaia, L. 2022. Hydrodynamic modelling in marginal and coastal seas-The case of the Adriatic Sea as a permanent laboratory for numerical approach. **Ocean Modelling** 179: 102123.

Van Ormondt, M., Nederhoff, K. and van Dongeren, A. 2020. Delft Dashboard: a quick set-up tool for hydrodynamic models. **Journal of Hydroinformatics** 22(3): 510-527.

Wyrki, K. 1961. **Physical oceanography of the Southeast Asian waters** (Vol. 2). University of California, Scripps Institution of Oceanography.

Yingarigul, S. 2021. Circulation pattern in the Andaman Sea using three-dimensional hydrodynamic model. Master of Science (Marine Science), Chulalongkorn University. (in Thai)



Recent Science and Technology

Research and Development Institute,
Rajamangala University of Technology Srivijaya
179 M.3, Maifad, Sikao, Trang 92150, Thailand.
Tel: +66-0922-6004-39 Email: rst.journal@rmutsv.ac.th