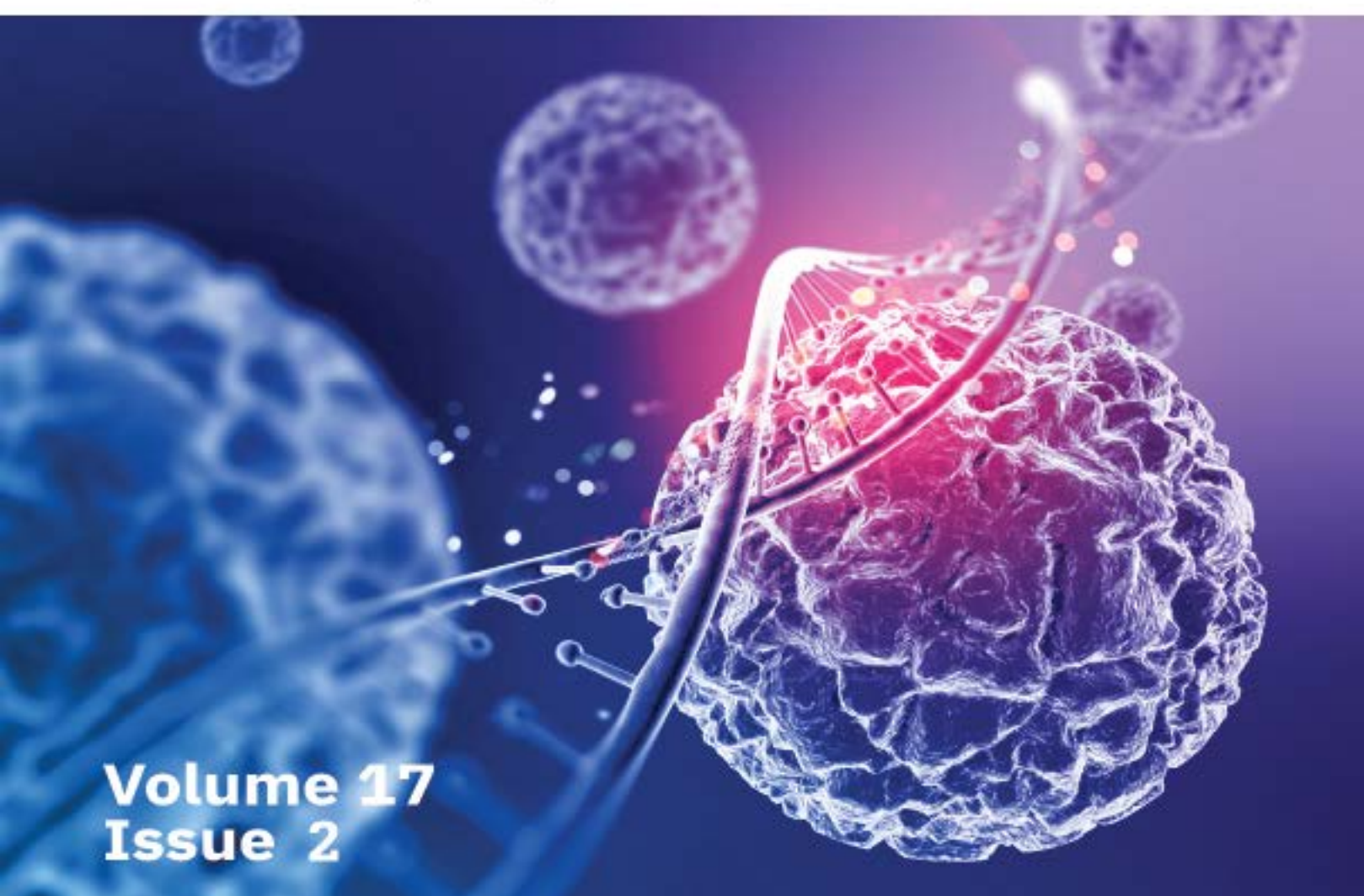


Recent Science and Technology

ISSN 3057-0786 (Online)



Volume 17
Issue 2

(May - August 2025)



Rajamangala University of Technology Srivijaya



TABLE OF CONTENTS

Simulation of Temperature Distribution and Biochar Properties in a 50-Liter Kiln Using Corncob Feedstock	264055
Numpon Panyoyai, Thanasit Wongsiriamnuay, Weeranut Intagun, Jirapol Klinbun and Tipapon Khamdaeng	
Development of a Competency Model for Foundation Foremen of Residential Construction Projects in the Digital Era	265685
Kritsaphon Thongprasit	
Implementing Total Dissolved Solids Automation in the 1st Leaching Station for Rubber Glove Manufacturing	264599
Nattapong Chotipan and Ratta Chotipan	
Comparative Analysis of Digital Agriculturist Support Tools: Evaluating Efficiency in Reducing Costs	264406
Kasidid Promproh, Wachirathorn Janchomphu and Vicharinee Sawadee	
Developing a Fish Tank Management System via an Online Application	265957
Wanpracha Nuansoi, Pichet Suwannoo and Supachai Maduea	
Establishment of an Application for Student Activity Attendance at a Community College Using a Digital Identity Methodology	265181
Werachart Muttitanon, Chumpol Mokarat and Saowakhon Nookhao	
Business Intelligence System for Lecturer Qualification Analysis: Optimizing ETL Workflows for KPI Extraction based on QOX	264981
Sureena Matayong, Suttida Saebao and Numtip Trakulmaykee	
Vermicomposting Mushroom Waste to Enhance Phoenix Oyster Mushroom (<i>Pleurotus pulmonarius</i>) Cultivation via Circular Economy	264330
Arpapan Satayavibul and Tantis Piekkoontod	

Molecular detection of Haemoparasitic <i>Babesia</i> spp. infection in Thai fighting bulls in Nakhon Si Thammarat province, Thailand	266483
Jaturapat Kompan, Vassakorn Khophlolklang, Anyarat Thiptara, Wandee Kongkaew and Nijjareeya Sirisiro	
Effects of Nutmeg and Coconut Milk Powder on Wheat-Rice Cookies	265411
Pakamart Purinthrapibal, Jareeporn Chuajedton and Preecha Muneesri	
A Study of Slot Milling Factors Affecting the Machined Surface Quality of Wood - Plastic Composites	262664
Wikanet Phetsuwan and Kunlapat Thongkaew	
The Effects of Water-Resistant Agents on Physical Properties, Mechanical Properties and Water Absorption Ability of Bamboo Culm Sheath Paper	262463
Voravadee Suchaiya, Pemika Khamweera, Jareonporn Chokboribal, Sutatip Thonglem and Aiyada Sirinjullapong	
Force Control in Electro-Hydraulic System using Pump Flow Rate Control Driven by AC Servo Motor	261694
Tossapol Jangnoi and Pisan Moonumca	
Displayable Portable Doppler Device Via the Line Application	261691
Siriwan Chokkha, Sukasem Watcharamaisakul, Thanasak Songbandhit, Ratchanon Arthit, Kunlayanee Srinamueang , Settawit Poochaya, Jantakan Kananawetang and Kamonwan Thipprasert	
Architecture for Cloud-based Advanced Application Development Tools of Container Platform	259694
Oranuch Pantho, Roselin Petagon, Panuwat Suwannakul and Kanchana Khatthachak	
The Application of Fishmeal Processing Wastes for Reducing Feed Cost of Butter Catfish (<i>Ompok bimaculatus</i>) Culture	262032
Thanapon Yooyen, Sira Laysing, Thaweedet Chainapong and Jamjun Pechsiri	

- Artificial Seawater Production for Pacific White Leg Shrimp** 259815
(*Litopenaeus vannamei*) Culture in Closed System
Chuthamat Thaklaewphan
- Using Pathumthani Native Plants “Khao Hom Pathum and Lotus Petal** 261091
(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)” for Sato Production
Sarawoot Nienvitoon, Kritchakhun Bhanityanakorn, Achiraya Rongthong
and Wanlapa Potasin
- Application of *Beauveria bassiana* (KMB1) to Spraying for Controlling of** 260494
***Hypomeces squamosus* (Fabricius) on Stage Young Leaves Period in Durian**
Trees
Sukritta Anutrakunchai, Khomsan Supong and Titi Thongkamngam
- The Equation for the Theoretical Ethanol Yield: A Case Study of Weed in** 261341
Muang District, Tak Province
Boondarick Rodbumrung and Narunchara Katemee



Research Article

Simulation of Temperature Distribution and Biochar Properties in a 50-Liter Kiln Using Corncob Feedstock

Numpon Panyoyai ^a, Thanasit Wongsiriamnuay ^a, Weeranut Intagun ^b, Jirapol Klinbun ^c
and Tipapon Khamdaeng ^{a*}

^a Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290, Thailand.

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakom University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

^c Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-07-17

Revised: 2025-01-24

Accepted: 2025-02-17

Keywords:

biochar;
slow pyrolysis;
simulation;
thermal characteristics

Biochar has been widely recognized as a beneficial soil amendment, enhancing soil physical and chemical properties. The yield of biochar production, however, is influenced by various processes and kiln parameters. Thus, the objectives of this study are to investigate the thermal characteristics inside a 50-liter biochar kiln and the effect of core puncture row numbers on temperature distribution and biochar yield. In this study, a 50-liter biochar kiln with dimensions of 500 mm × 380 mm (height × diameter) was developed for the study. The kiln design included a central core with a diameter of 115 mm and puncture holes of 6.35 mm in diameter. Experiments were conducted using cores with three different puncture row configurations: 3, 4, and 5 rows. Corncobs served as the raw material, while briquettes derived from agricultural waste were used as fuel. The temperature distribution for each configuration was analyzed through both experimental and numerical methods. Simulation results were validated against experimental data. The simulation results illustrated that the highest temperature was found at the core and decreased transversely in radial direction toward the kiln wall. The average temperature over the radial and longitudinal positions inside the kiln with 3, 4, and 5-row configurations was found to be equal to 392.4 ± 174.2 °C, 357.4 ± 210.4 °C, and 358.6 ± 221.7 °C, respectively. The experiment revealed that the biochar yield was found to be equal to 12.9 wt.%, 11.4 wt.%, and 15.7 wt.% for the 3, 4, and 5-row configurations, respectively. The average pH and electrical conductivity (EC) of the biochar were 8.7 ± 0.3 and 0.6 ± 0.1 dS m⁻¹, respectively. This study provides a detailed understanding of the thermal characteristics within a biochar kiln and their effects on biochar yield. The graphical temperature distribution results offer valuable insights for optimizing kiln design and improving biochar production efficiency.

© 2025 Panyoyai, N., Wongsiriamnuay, T., Intagun, W., Klinbun, J. and Khamdaeng, T. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

Biochar is a material composed of carbon produced from biomass through the heating separation

process without oxygen or with minimal oxygen (Pyrolysis) (Suksawang, 2009). Biochar can be utilized for keeping carbon in the soil in order to improve the soil physical properties due to its natural pores that help

* Corresponding author.

E-mail address: tipapon@mju.ac.th

Cite this article as:

Panyoyai, N., Wongsiriamnuay, T., Intagun, W., Klinbun, J. and Khamdaeng, T. 2025. Simulation of Temperature Distribution and Biochar Properties in a 50-Liter Kiln Using Corncob Feedstock. *Recent Science and Technology* 17(2): 264055.

improve the air circulation, water percolation, water absorption, plant nutrient accumulation and microorganism activities. Biochar can absorb heavy metals in the soil (Rinkam *et al.*, 2022) and the alkalinity of biochar is beneficial for acidic sandy soil, helping to neutralize the soil acidity, increase the soil pH and improve the nitrification (Shaaban *et al.*, 2013). As a result, biochar reduces fertilizer use and increases yield production, providing higher income for farmers (Chen *et al.*, 2022). In addition, biochar has properties that make it suitable for use as an energy source since it produces more heat than general wood charcoal and can be produced using simple technology with low energy input. Moreover, the production of biochar can be applied at both the family and community levels (Kaewluan *et al.*, 2021). Several studies have investigated biochar production, and production conditions, such as pyrolysis temperature, can affect not only the yield of biochar but also inside the quality (Petchaihan *et al.*, 2019; Somporn *et al.*, 2019).

At present, numerical methods play a significant role in engineering design, as they can be used to design and predict results without trial and error. This leads to reductions in both capital and time, making it easier to produce suitable workpieces for engineering and economics. The forecasting of heat distribution on the heat circulating fin attached to the heat electrical appliance was studied and the results help designers efficiently evaluate and appreciate the shape and number of fins to be used (Techaumpai *et al.*, 2009). The heat distribution in a small water heater was simulated in order to help design an appropriate heating system based on low energy consumption (Missaoui *et al.*, 2021). The temperature changes within a 200-liter vertical charcoal kiln using the gasification technique with wood as the raw material were studied and the results showed that this system could reduce the production period and increase heat energy, resulting in higher quality charcoal compared to normal burning (Maneechote and Seni, 2015). The simulation of heat transfer and distribution in the pyrolysis furnace under various conditions has been investigated to enhance product yields and quality (Intagun *et al.*, 2018; Panyoyai *et al.*, 2019; Srisophon *et al.*, 2019).

An understanding of the temperature distribution within a biochar kiln is important for optimizing the biochar process and production, which is influenced by core puncture row numbers. The core puncture row number is essential for enhancing heat distribution and gas management, as it enable uniform heating and efficient ventilation, leading to improved operational efficiency and consistent product quality. Validating the numerical simulation results with experimental data will increase the reliability of predictive models, allowing for better control over the production process. Additionally, exploring the relationship between temperature distribution and biochar yield and properties (such as pH and electrical conductivity) can provide valuable insights into producing high-quality biochar with desirable chemical and physical characteristics.

Therefore, the main objective of this study was to investigate the temperature distribution inside the biochar kiln under different core puncture row numbers. The experimental results were compared with the numerical simulation results to validate the model. The temperature distribution then was evaluated in this study. The biochar yields and properties were also investigated.

2. Materials and Methods

2.1 Biochar Kiln Design

Figure 1 illustrates the 50-liter biochar kiln used in the experiment with a 380 mm diameter and a 500 mm height. The kiln is made of steel and has a closing lid with a 115 mm central hole.

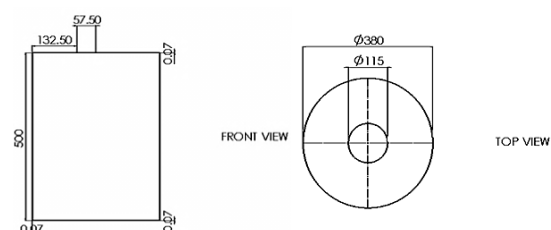


Figure 1 Biochar kiln (dimensions displayed in millimeters)

2.2 Core Configuration of Biochar Kiln

Figure 2 illustrates the core of cylindrical biochar kiln, which has a 115 mm diameter and 6.35 mm core hole diameter. The core was designed with 3, 4 and 5 rows of 6.35 mm holes. For the core with 3 rows, there were 6 holes per row, with the first, second and third rows positioned 50, 190 and 330 mm, respectively, above the floor as shown in Figure 2(a). For the core with 4 rows, there were 5 holes per row, with the first, second, third and fourth rows positioned 50, 155, 260 and 365 mm, respectively, above the floor as shown in Figure 2(b). For the core with 5 rows, there were 4 holes per row which the first, second, third, fourth and fifth rows were 50, 134, 218, 302 and 386 mm, respectively, above the floor as shown in Figure 2(c).

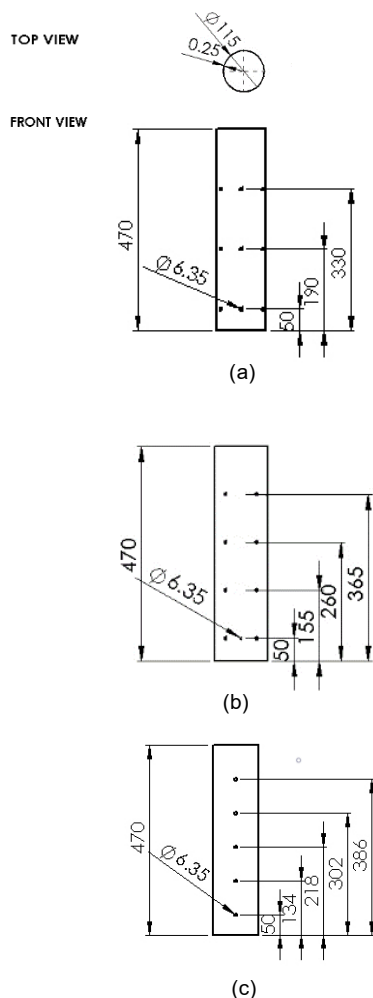


Figure 2 Core of cylindrical biochar kiln with (a) 3 (b) 4 and (c) 5 rows of 6.35 mm holes (dimensions displayed in millimeters)

2.3 Biochar Production Process

Seven kilograms of raw material, corncob with a length of 10-20 mm, were thermo-chemically decomposed in the biochar kiln after being dried to minimize humidity. Three kilograms of heat fuel briquette were placed into the upper core for 0-15 minutes and the biochar pyrolysis process was conducted for 3 hours. The outputs of the process, including completed biochar, non-completed biochar and ash, were weighed using a digital scale with an accuracy of ± 0.1 g.

2.4 Temperature Measurement

The temperature was measured at seven different points by use of the thermocouple as shown in Figure 3. The thermocouple probes with temperature range of 0 to 1,000°C were placed inside the kiln at radial positions 49 mm, 129 mm, and 187 mm from the kiln center and at longitudinal directions 108 mm, 244 mm, and 366 mm from the bottom of the kiln. Real-time temperatures were acquired and stored using a data logger (Wisco Online Datalogger OD04). The temperature was continuously recorded within 3 hours during the pyrolysis process and the temperature that reached steady state was selected for comparison with the simulated temperature.

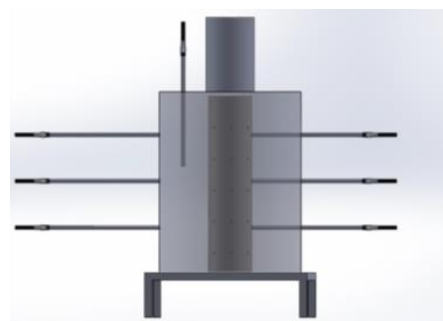


Figure 3 Thermocouple position

2.5 Simulation Methodology

The biochar kiln model has three main domains: the kiln wall, the core wall, and the pyrolysis gas fluid within the kiln. The kiln's core is used for fuel loading, with heat from combustion transferring radially outward to the kiln wall. To simplify the model, the following assumptions were made:

1. Heat transfer was considered under steady-state conditions.
2. Heat transfer from the inner core surface to the outer core surface occurred through conduction.
3. Heat transfer from the outer core surface to the pyrolysis chamber occurred through conduction and convection.
4. Heat transfer from the outer kiln wall to the surroundings occurred via natural convection.

The temperature results obtained from the biochar kiln simulation, based on the numerical scheme illustrated in Figure 4, were compared with experimental results from the pyrolysis process. The test conditions focused on varying the numbers of rows of holes on the core, which significantly influenced biochar productivity. The simulation was conducted using a model developed in Abaqus, which set the pyrolysis temperature at the kiln rim to analyze air circulation and temperature distribution under stable heat conditions. The governing equations for the simulations included the Navier-Stokes equations for fluid dynamics and the energy equation for temperature distribution. These equations were solved using the finite element method to simulate heat transfer and airflow within the kiln. The simulated temperatures were then compared with those recorded experimentally during the pyrolysis process in the biochar kiln. To ensure the accuracy and reliability of the simulation results, the experimental temperature data were compared with the simulated temperature profiles for each core configuration. The temperature measurements were taken at multiple radial and longitudinal positions within the kiln and averaged for comparison. Error percentages were calculated to quantify the deviation between experimental and simulated values.

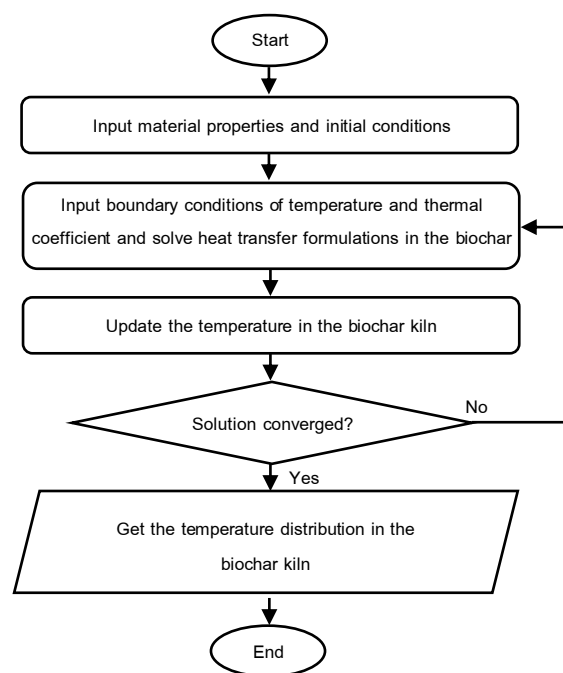


Figure 4 The diagram of numerical scheme

2.6 Yields and Properties Determination

The percentage of the biochar yield was calculated as follow:

$$\%Biochar\ Yield = \frac{W_{biochar}}{W_{biomass}} \times 100 \quad (1)$$

where $W_{biochar}$ is the weight of completed biochar after the pyrolysis and $W_{biomass}$ is the weight of raw material before the pyrolysis.

The gas produced by pyrolysis was inferred from the loss of total weight after the process, i.e.

$$\%Gas = \frac{W_{biomass} - W_{solid\ yields}}{W_{biomass}} \times 100 \quad (2)$$

where $W_{solid\ yields}$ is the weight of total solid yields obtained after the pyrolysis, i.e., completed biochar, non-completed biochar and ash.

The pH of the biochar was measured according to the DIN ISO 10390 standard using a 1:5 (W:V) ratio of biochar to 0.01 M $CaCl_2$ -solution, with 60 minutes of shaking, and the measurement was taken directly in the suspension. The EC was measured according to the DIN ISO 11265, by adding a 1:10 (W:V) ratio of H_2O to the sample, shaking for 60 min, followed by filtration of the solution.

3. Results and Discussion

3.1 The experimental results compared with the simulating by the computer program

The temperatures obtained from the pyrolysis in the biochar kiln and from the computer program simulation based on 3, 4 and 5 rows of 6.35 mm holes were compared (Figure 5). The results from the condition simulation provided some values that could not be measured in the experiment, as they were based on certain assumptions, such as radiation value, heat convection etc. These unmeasured values contributed to errors between the temperature results from the experiment and simulation. The error percentages found for the core with 3, 4 and 5 rows of 6.35 mm holes were 8.2 ± 10.8 , 10.8 ± 15.2 and 10.8 ± 16.8 , respectively.

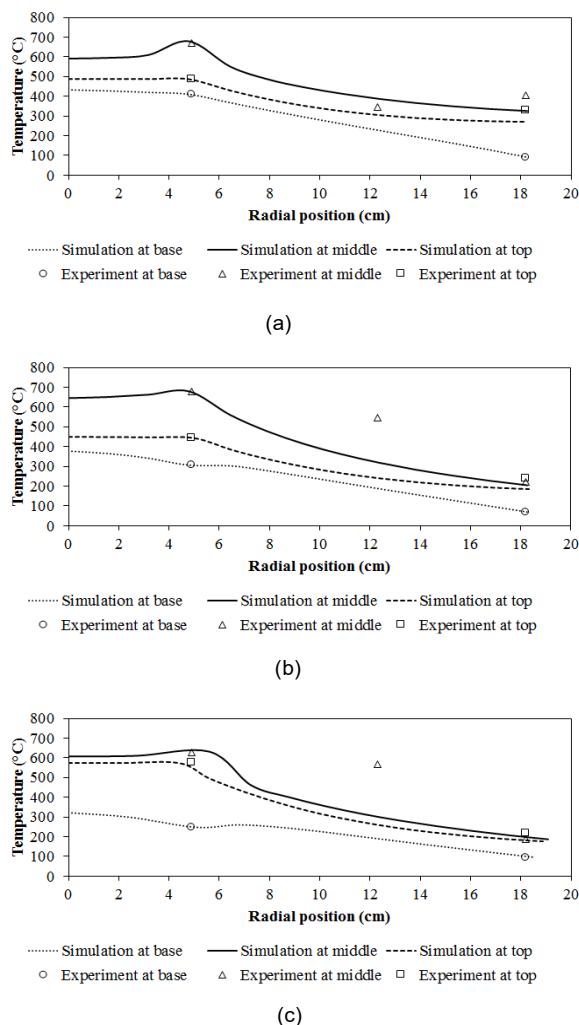


Figure 5 Comparison of temperatures from experiment and computer program simulation of (a) 3 (b) 4 and (c) 5 rows with 6.35 mm holes

For future work, the study should focus on investigating the temperature distribution affected by the placement of drilled holes and refining simulation models to enhance the validation of experimental and simulation results.

3.2 Vertical temperature distribution in the biochar kiln

The temperatures in the biochar kiln were distributed from the air holes at its core. The highest temperature was found at the core. The biomass around the core could therefore heat up quickly throughout the biochar kiln. The vertical temperature distributions in the biochar kiln with 3, 4 and 5 rows of 6.35 mm holes at the core are shown in Figure 6(a)-(c), respectively. The average temperatures over the radial and longitudinal positions in the biochar kiln with 3, 4 and 5 rows of 6.35 mm holes at the core were found to be equal to 392.4 ± 174.2 °C, 357.4 ± 210.4 °C, and 358.6 ± 221.7 °C, respectively.

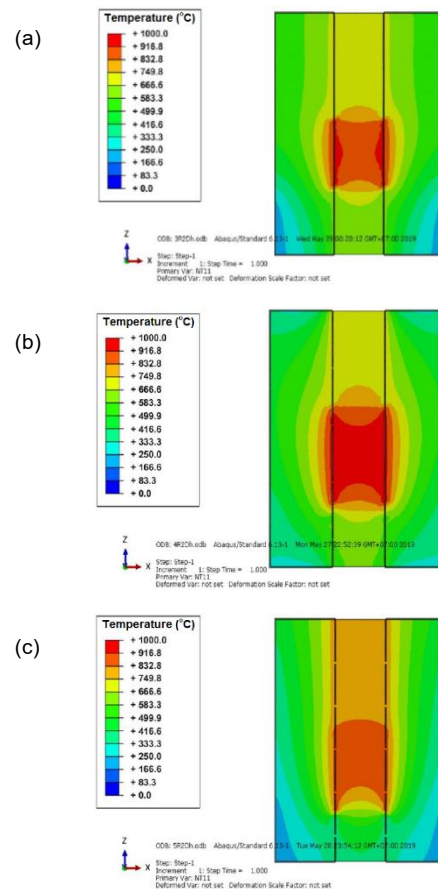


Figure 6 Vertical temperature distribution in the biochar kiln with (a) 3 (b) 4 and (c) 5 rows of 6.35 mm holes at the core

Table 1 Products and properties (pH and EC) obtained from each experiment

Number of rows	3	4	5
Non-Biochar (kg.)	3.6	3.47	3.3
Biochar (kg.)	0.9	0.8	1.1
Ashes (kg.)	0.09	0.07	0.14
Gas (wt.%)	34.4	38.0	35.1
Biochar (wt.%)	12.9	11.4	15.7
pH	8.45	8.98	8.67
EC (dS m ⁻¹)	0.57	0.50	0.74

As the number of rows of holes increases (from 3 to 4 or 5 rows), the gas flow in the kiln also increases. This enhances the distribution of heat across the kiln, which can reduce the temperature difference within the kiln. For example, with 4 and 5 rows of holes, the average temperature (357.4°C and 358.6°C, respectively) is lower than with 3 rows (392.4°C), as the increased gas flow helps distribute heat more efficiently. However, the overall temperature at the core remains the highest and decreases radially toward the kiln wall.

3.3 Yields and properties obtained from the experiment of biochar kiln

Table 1 summarizes the yields obtained from the experiment of biochar kiln with 3, 4, and 5 rows of 6.35 mm holes at the core. It was found that the biochar kiln with 5 rows of 6.35 mm holes at the core showed the highest yield of biochar equal to 15.7 wt.% while the core with 3 rows of 6.35 mm holes showed the highest yield of non-biochar around 51.4 wt.%. In addition, the biochar kiln with 4 rows of 6.35 mm holes at the core showed the highest yield of gas around 38.0 wt.%. The yield of gas was found to vary inversely with the yield of biochar which was in agreement with the findings of earlier studies (Sun *et al.*, 2014).

From pyrolysis temperature in this study, it was found that the biochar was alkaline, with a pH range of 8.45 to 8.98, which can adversely affect microorganisms in the soil. The pH of biochar derived from corncob was approximately 8-10 which was suitable for medium to strong acid soils (Somporn *et al.*, 2019). The electrical conductivity (EC) of biochar ranged from 0.50 to 0.74 which was suitable for

improving soil with strong alkalinity (Enders *et al.*, 2012).

4. Conclusion

The study evaluated the performance of a biochar kiln with cores having 3, 4, and 5 rows of 6.35 mm holes, utilizing corncob biomass as feedstock. The results demonstrated that the kiln configuration with 5 rows of 6.35 mm holes achieved the highest biochar yield, producing 15.7 wt.% of biochar. Conversely, the 3-row configuration yielded 12.9 wt.% of biochar. This shows that the core with 5 rows of 6.35 mm holes gives the highest yield of biochar and can be attributed to the increased gas flow and more efficient heat distribution inside the kiln. The average temperature in the biochar kiln with 5 rows of 6.35 mm holes at the core was found to be 358.6 ± 221.7 °C. As the number of rows of holes increased (from 3 to 4 or 5), the average temperature decreased, indicating that the increased gas flow helped distribute heat more uniformly throughout the kiln, resulting in a slightly lower average temperature. The temperature measurements and simulations revealed that the core with 3 rows of 6.35 mm holes provided the closest agreement between experimental and simulated temperatures, with the lowest error percentage of 8.2%. The core configurations with 4 and 5 rows had higher error percentages, both at 10.8%. These findings highlight that while the 5-row configuration maximizes biochar yield, the 3-row configuration offers the best alignment with simulated temperature data, suggesting a trade-off between yield and temperature accuracy.

5. Acknowledgments

This study was supported by the Thailand Research Fund (Contract no. RDG6250016) and the Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai, Thailand.

6. References

- Chen, L., Li, X., Peng, Y., Xiang, P., Zhou, Y., Yao, B., Zhou, Y. and Sun, C. 2022. Co-application of biochar and organic fertilizer promotes the yield and quality of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) by improving soil properties. **Chemosphere** 294: 133619.
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S. and Lehmann, J. 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource Technology** 114: 644-653.
- Intagun, W., Khamdaeng, T., Prom-ngarm, P. and Panyoyai, N. 2018. Effect of Core Puncture Diameter on Bio-Char Kiln Efficiency. **International Journal of Biotechnology and Bioengineering** 12: 435-439.
- Kaewluan, S., Sriromreun, P., Narrat Jansri, S., Asadamongkon, P. and Chuichulcherm, S. 2021. Charcoal and Wood Vinegar Products from Hedge Bambooby Using 200 Liters Community Charcoal Kiln Working with Gasified Biomass Burner. **Rajabhat Chiang Mai Research Journal** 22: 229-245.
- Maneechote, P. and Seni, L. 2015. Development of 200-liter vertical charcoal kiln by use of gasification, pp. 35-36. *In The 8th Thailand Renewable Energy for Community Conference*. Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi.
- Missaoui, S., Driss, Z., Slama, R.B. and Chaouachi, B. 2021. Numerical analysis of the heat pump water heater with immersed helically coiled tubes. **Journal of Energy Storage** 39: 102547.
- Panyoyai, N., Petchaihan, L., Wongsiriamnuay, T., Hiransatitporn, B. and Khamdaeng, T. 2019. Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types. **Engineering Access** 5: 59-64.
- Petchaihan, L., Panyoyai, N., Khamdaeng, T. and Wongsiriamnuay, T. 2019. Test of a modified small-scale biochar kiln. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 463: 012004.
- Rinkam, T., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Panyoyai, N., Tippayawong, N. and Khamdaeng, T. 2022. Heavy metal adsorption by biochar made from longan seeds and peels. **AIP Conference Proceedings** 2681: 020052.
- Shaaban, A., Se, S.M., Mitan, N.M.M. and Dimin, M.F. 2013. Characterization of Biochar Derived from Rubber Wood Sawdust through Slow Pyrolysis on Surface Porosities and Functional Groups. **Procedia Engineering** 68: 365-371.
- Somparn, W., Khamdaeng, T., Panyoyai, N. and Wongsiriamnuay, T. 2019. Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 463: 012005.
- Srisophon, M., Khamdaeng, T., Panyoyai, N. and Wongsiriamnuay, T. 2019. Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 463: 012079.
- Suksawang, A. 2009. Biochar technology: Solution of hot world, soil and poverty in agricultural sector, pp. 172-184. *In Conference on the hot world situation: Biodiversity and sustainable utility*. Kasetsart University, Kampangsan Campus.
- Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y., Chen, H. and Yang, L. 2014. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. **Chemical Engineering Journal** 240: 574-578.
- Techaumpai, P., Limtrakam, V., Sutjaritpatsakul, S. and Prathumwul, Y. 2009. **Application of finite element by solidworks simulation**. SE-ED, Bangkok.



Research Article

Development of a Competency Model for Foundation Foremen of Residential Construction Projects in the Digital Era

Kritsaphon Thongprasit *

Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-12-15

Revised: 2025-02-11

Accepted: 2025-02-17

Keywords:

development model;

competency;

foreman;

foundation;

residential building;

digital era

The research objectives are: 1) to study the components involved in developing a competency model for foundation foremen in residential construction projects in the digital era, and 2) to develop a competency model for foundation foremen in residential construction projects in the digital era. A questionnaire was used as a research instrument for quantitative data collection. The respondents were those involved in construction projects, including 376 foremen responsible for overseeing the construction sites in Bangkok and its vicinity. Mean, standard deviation, and exploratory factor analysis were used for statistical analysis.

The results show that: 1) The most prevalent factors associated with the development of foremen's competencies consist of: 1.1) Knowledge competency - knowledge about foundations on piles; 1.2) Skill competency - skills for checking the center position of columns, foundations, and piles; and 1.3) Attributes competency - practical and theoretical experience in construction work. 2) The developed competency model consists of 11 components and 84 subcomponents, with key elements as follows: 2.1) Knowledge competence, with 4 components and 33 subcomponents, including foundation construction techniques, digital technology in construction, pile driving and testing, and reading the foundation construction plan; 2.2) Skill competence, with 4 components and 32 subcomponents, including foundation construction inspection, application of digital technology, inspection of plan and materials list, and groundwater level monitoring; and 2.3) Attribute competence, with 3 components and 19 subcomponents, including work success, human relations, and creativity.

© 2025 Thongprasit, K. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

The expansion of the construction industry today has quite a lot of economic growth due to the rapid expansion of cities from the demands of the increasing population. When the economy grows, investment in construction projects from both the public and private sectors will increase. Lunkam (2024) stated

that the construction business trend in 2024-2026 is likely to grow in line with the total construction investment value, which is expected to expand by 3.0-4.0% per year, with the total construction investment value accounting for an average of 8.0% of the country's gross domestic product. (GDP) Most of the construction work is domestic, which is divided into 2

* Corresponding author.

E-mail address: t.kritsaphon@gmail.com

Cite this article as:

Thongprasit, K. 2025. Development of a Competency Model for Foundation Foremen of Residential Construction Projects in the Digital Era. **Recent Science and Technology** 17(2): 265685.

types according to the type of employer: government and private sector, with a proportion of construction investment value of 57:43 in 2023. Most of the government construction work is infrastructure investment projects, accounting for 81% of the total government construction value in 2023. The rest are construction projects for government agencies (17%) and civil servant housing (2%). As for private construction work, most of it is residential construction, accounting for 52% of the total private construction value. The rest is construction of industrial plants and commercial buildings, such as shopping malls, hotels, and hospitals.

Good management in the construction industry therefore requires many operational factors, as there are many work steps and time periods involved, starting from the planning, control, and implementation of construction projects from the beginning to the end, with the goal of achieving the desired quality within the budget and on time. Construction management does not only involve technical management, but also includes coordination, human resource management, and risk management during the project implementation, along with the development of modern technology in the digital age that plays a role in the construction industry, which helps develop and improve the construction process to be more efficient in terms of time, cost, safety, and quality of construction work. Such as Artificial Intelligence technology, technology linking intelligent devices (Internet of Things), big data structure technology, 3D printing technology or intelligent machine technology (Robots), unmanned aircraft technology (Drone) and solar photovoltaic technology (Solar PV), etc. (Sridaranon, 2019) Kasamjaru *et al.* (2021) A study was conducted on the development of a comprehensive construction business management model to increase competitiveness. The objectives were to study the components and create a development model for a comprehensive construction business management model to increase competitiveness. The research was a combination of qualitative and quantitative methods by analyzing the components of a survey. (Exploratory Factor Analysis: EFA) From the factors studied, data collection used a questionnaire

tool to collect data from personnel involved in construction projects, including entrepreneurs, project administrators, and project managers in Bangkok and its vicinity, totaling 469 people. The research results found that the business management development model consisted of 5 side and 13 components, namely: 1) Organizational management, including organization management; 2) Construction management, including construction law management, risk management, construction process management, occupational health and safety management, and construction machinery and technology management; 3) Financial management, including construction tools, machinery and equipment cost management, construction material procurement management, and financial accounting management; 4) People management, including human resource management and relationship management with key business partners; and 5) Customer management, including marketing and sales management.

Personnel in construction projects are one of the elements that have a significant impact on operations, according to the construction management concept in terms of human resource management. According to Kasamjaru *et al.* (2021), as it is a large industry that requires personnel to work together in many positions, such as construction workers, construction foremen, project engineers, project managers, project consultants, project owners, project administrators, etc., each position has a specific role and important responsibilities in each step of the construction process, from planning, construction design and quality inspection. The cooperation of teams with expertise in each area is important for the success of the construction project. One of the important roles of personnel in field work (Construction Site), for example the construction Foreman, is to oversee field operations. The construction Foreman works with craftsmen and other construction teams by coordinating and supervising the work of workers and other teams, such as electricians, masonry workers, ironworkers or other system technicians, etc., to ensure that the work performed complies with the specified requirements and standards and to ensure that the construction project proceeds according to the specified plan in

terms of quality, safety and time. Therefore, construction foremen must have competence in many areas to ensure efficient work, such as team management, techniques and work inspections, safety management, communication skills, time management, problem solving and budget management, etc.

The development of competence or potential of personnel in construction projects is therefore an important part to know the components of necessary factors in the work and for personnel development to improve their skills and abilities in the work to be able to manage construction work effectively and be able to cope with challenges that arise in the construction site. Wanitwat *et al.* (2023) conducted a study on the development of a potential model of project managers in the high-rise building construction industry in the digital economy era. The objective was to study the components and create a potential development model of project managers in the high-rise building construction industry in the digital economy era. The research was both qualitative and quantitative method using the Delphi technique. Data collection was conducted using a questionnaire tool to collect data from 26 personnel involved in construction projects, including experts from construction sites and civil engineering academics in Thailand. The research results found that the capacity development model consisted of 5 main components and 24 subcomponents, namely: 1) Planning aspect, including operational planning, digital technology planning, risk and safety planning, operational resource planning, and financial and budget planning; 2) Organizational management aspect, including organizational structure determination, responsibility determination, regulations determination, and personnel and work management; 3) Command aspects, including work assignment, decision making, work system development, construction technology and innovation use, and morale building; 4) Coordination aspect, including joint planning, internal and external coordination, information technology communication, information clarification meetings, and work consultation; and 5) Control aspect, including work tracking system determination, data recording and reporting, safety and work environment control, internal control and risk

management, and contract management. In addition, a study was conducted by Panitanwong *et al.* (2019) on the development model of executives' potential in the construction industry group according to the Thailand 4.0 model. The objective was to study the components and create a development model of executives' potential in the construction industry group based on the Thailand 4.0 model. The research was a combination of qualitative and quantitative methods using stepwise multiple regression analysis. From the factors studied, data collection used a questionnaire tool to collect data from personnel involved in construction projects, including project executives, project managers, department managers, and project engineers, totaling 438 people in Bangkok and its vicinity. The research results found that the potential development model consisted of 3 potential areas, 15 components: 1) Knowledge, consisting of knowledge of construction engineering and quality control, knowledge of policies, visions, and strategies, knowledge of accounting and finance for executives, knowledge of risk management and safety, knowledge of procurement of construction materials and machinery, knowledge of construction contracting business, marketing, sales, bidding, and laws related to the construction contracting industry; 2) Skills, consisting of good negotiation in various situations, time management and project management, communication, coordination, networking, state relations, and the use of innovation and construction technology; and 3) Flexibility, adaptability, and learning new things, reliability, creating trust as a good example, organizational commitment, teamwork, and innovative thinking.

Therefore, to develop according to the principles of construction project management in the part of developing human resources of personnel in the residential building construction industry, especially the work of building foundation construction, foremen should have good competence and efficiency in their work. This research therefore aims to 1) Study the components of the development of a competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era; and 2) Development of a

competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era.

2. Materials and Methods

2.1 Sample group

2.1.1 The group of quality inspectors of the questionnaire instrument includes the group of inspectors of the consistency index. (Item Objective Congruence: IOC) From 5 experts in construction projects and human resource management academics, and the entire group of reliability auditors (Cronbach's Alpha) of questionnaire instruments by means of instrument testing (Try Out) from a sample group of 30 personnel involved in residential building construction projects in Bangkok and its vicinity. (Kasamjaru *et al.*, 2021)

2.1.2 Quantitative Research: The research involved collecting data using questionnaires targeting personnel involved in residential building construction projects in Bangkok and its vicinity, including construction foremen. Referring to data from the National Statistical Office, Ministry of Digital Economy and Society, Thailand (1st Quarter, 2024), there are a total of 6,113 people who have been granted permission to construct residential buildings in Bangkok and its vicinity. (National Statistical Office, 2024) Sample size was determined using the calculation formula of Taro Yamane (Yamane, 1973) and was based on Silpcharu (2024) A simple random sampling method was used to select the experimental sample group. A total of 376 people were received.

2.2 Research instruments

A quantitative research instrument was used to collect data from questionnaires. Estimation scale type (Rating Scale) 5 level according to Likert's concept (Likert) (Likert, 1932) and used the theoretical framework of McClelland (McClelland, 1973). The questionnaire consists of three sections: Section 1, General status information of the respondents; Section 2, Information on the level of importance of factors in the development of a competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital

era, consisting of three factors and 84 variables, as follows: 1) Knowledge competence, with 33 variables; 2) Skill competence, with 32 variables; and 3) Attribute competence, with 19 variables; and Section 3: Additional comments and suggestions on the factors for the development of a competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era.

2.3 Data collection

2.3.1 Data collection for quality control of questionnaire instruments includes: 1) Checking the consistency index value (Item Objective Congruence : IOC), the results of the data collection found that the questions had a consistency index between 0.80-1.00, which is in the appropriate range for use; and 2) Checking the entire reliability value (Cronbach's Alpha) The results of the data collection found that the questionnaire tool had a reliability value of 0.978, which is appropriate for use.

2.3.2 Quantitative research data were collected by sending questionnaires to a sample group involved in residential building construction projects in Bangkok and its vicinity, including construction foremen, with a total of 400 questionnaires distributed. The data collection resulted in 383 responses, representing a 95.75 percent response rate.

2.4 Data analysis and statistics used in the research

2.4.1 Quantitative research data analysis from the questionnaire on factors in the development of a competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era, including: 1) General status information of the respondents; and 2) Data on the level of importance of factors in the development of a competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era, analyzed using statistical methods such as calculating the mean ($\bar{X}$) and standard deviation (S.D.). (Kasamjaru *et al.*, 2021)

2.4.2 Exploratory Factor Analysis (EFA) of the factors for the development of a competency model for foundation foremen of residential construction projects

in the digital era. This analysis aimed to determine the weight or relationship between the studied variables and to group related elements within each aspect. The suitability of the data was assessed by calculating the Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO), with a value greater than 0.50, and by conducting Bartlett's Test of Sphericity, with a p-value less than 0.05. Factor Extraction is used in Principal Components Analysis (PCA) and the Varimax rotation method. The number of elements obtained will be considered from the Eigen values more than 1 and the weight of the components is more than 0.30. (Kasamjaru *et al.*, 2021)

3. Results and Discussion

3.1 Results of the analysis of the general status of the respondents

From Table 1, the results of the analysis of the respondents' general status show that most of the respondents were male (92.95 percent). The majority were aged between 36-45 years (43.86 percent), had average work experience of 5-10 years (41.51 percent), held an associate degree or vocational certificate (69.71 percent), and most worked on detached house project (38.12 percent).

Table 1 General status data of the respondents

General status information		Percentage
1. Sex	- Male	92.95
	- Female	7.05
2. Age	- Under 25 years old	2.61
	- 25-35 years old	14.62
	- 36-45 years old	43.86
	- 46-55 years old	24.54
	- Over 55 years old	14.36
3. Experiences	- Under 5 years	12.27
	- 5-10 years	41.51
	- 11-15 years	24.80
	- 16-20 years	17.49
	- Over 20 years old	3.92
4. Education level	- High school / Vocational Certificate	8.36
	- Associate degree / Vocational Certificate	69.71
	- Bachelor's degree	21.93
	- Higher than bachelor's degree	0.00
5. Construction project types	- Detached house project	38.12
	- Townhouse project	11.75
	- Shophouse project	36.03
	- Apartment project	14.10

3.2 Analysis of factors for developing the competency model of construction foremen of the residential building construction industry in the digital age

3.2.1 The results of the analysis of the importance level of the knowledge factor found that the overall average importance level was at a moderate level of ($\bar{X}=3.25$), with the top 5 factors with the highest importance levels, as follows: 1) Knowledge about foundations on piles ($\bar{X}=4.67$); 2) Knowledge about shallow foundations or spread foundations

($\bar{X}=4.65$); 3) Knowledge about installing reinforcing steel must be in accordance with the model and use cement balls to support the distance of the reinforced concrete cover, according to the requirements of the reinforced concrete standards ($\bar{X}=4.53$); 4) Knowledge about installing formwork must be in the correct size according to the model ($\bar{X}=4.48$); and 5) Knowledge about pouring concrete in layers and shaking it using a concrete vibrator to make it compact at every stage ($\bar{X}=4.45$); respectively as shown in table 2.

Table 2 Mean level of importance of the studied factors

Factors in developing competency models	$\bar{X}$	S.D.	Level of importance
1. Knowledge competence, with 33 variables.	3.25	.63	moderate
1.1 Knowledge about foundations on piles.	4.67	.44	maximum
1.2 Knowledge about shallow foundations or spread foundations.	4.65	.62	maximum
1.3 Knowledge about installing reinforcing steel must be in accordance with the model and use cement balls to support the distance of the reinforced concrete cover, according to the requirements of the reinforced concrete standards.	4.53	.50	maximum
1.4 Knowledge about installing formwork must be in the correct size according to the model.	4.48	.73	a lot
1.5 Knowledge about pouring concrete in layers and shaking it using a concrete vibrator to make it compact at every stage.	4.45	.56	a lot
2. Skill competence, with 32 variables.	3.87	.71	a lot
2.1 Skills for checking the center position of columns, foundations and piles.	4.75	.38	maximum
2.2 Skills for checking the correct size of reinforcing bars, placing them in the correct position, spacing, fastening, bending hooks, connecting bars, and placing special reinforcing bars.	4.73	.58	maximum
2.3 Skills for checking the level of concrete poured into each hole.	4.61	.45	maximum
2.4 Skills in inspecting pile integrity as specified by the engineer.	4.56	.66	maximum
2.5 Skills to check the strength of the formwork, supports, no warping, subsidence and leakage that may occur during concrete pouring.	4.48	.72	a lot
3. Attribute competence, with 19 variables.	4.71	.31	maximum
3.1 Have both practical and theoretical experience in construction work.	4.82	.34	maximum
3.2 Be meticulous in your work.	4.81	.51	maximum
3.3 Have dedication, devotion and time for work.	4.79	.56	maximum
3.4 Can prioritize tasks.	4.76	.47	maximum
3.5 Can make decisions in unclear and complex situations.	4.74	.68	maximum

3.2.2 The result of the analysis of the importance level of the skill factor found that the average value of the overall importance level was at a high level of ($\bar{X}=3.87$), with the top 5 factors with the highest importance level, as follows: 1) Skills for checking the center position of columns, foundations, and piles ($\bar{X}=4.75$); 2) Skills for checking the correct size of reinforcing bars, placing them in the correct position, spacing, fastening, bending hooks, connecting bars, and placing special reinforcing bars ($\bar{X}=4.73$); 3) Skills for checking the level of concrete poured into each hole ($\bar{X}=4.61$); 4) Skills in inspecting pile integrity as specified by the engineer ($\bar{X}=4.56$); and 5) Skills to check the strength of the formwork, supports, no warping, subsidence and leakage that may occur during concrete pouring ($\bar{X}=4.48$); respectively as shown in table 2.

3.2.3 The results of the analysis of the importance level of the attribute factors found that the overall average importance level was at a high level of ($\bar{X}=4.71$), with the top 5 factors with the highest importance levels, as follows: 1) Have both practical and theoretical experience in construction work

($\bar{X}=4.82$); 2) Be meticulous in your work ($\bar{X}=4.81$); 3) Have dedication, devotion and time for work ($\bar{X}=4.79$); 4) Can prioritize tasks ($\bar{X}=4.76$); and 5) Can make decisions in unclear and complex situations ($\bar{X}=4.74$); respectively as shown in table 2.

3.3 Analysis of the exploratory components of factors for developing a competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era

From Table 3, the results of the analysis on the appropriateness and relationship of the factors for the development of a competency model for foundation foremen in residential construction projects in the digital era show that: 1) The KMO index for the three factors falls within the appropriate range for component extraction, exceeding 0.50. Specifically, the values are as follows: Knowledge competence (0.938), Skill competence (0.940), and Attribute competence (0.916); and 2) The Bartlett's Test of Sphericity for the three factors shows statistical significance at the 0.05 level (p-values < 0.05) for Knowledge competence (0.000), Skill competence (0.000), and Attribute competence (0.000).

Table 3 Suitability index and relationship of studied factors.

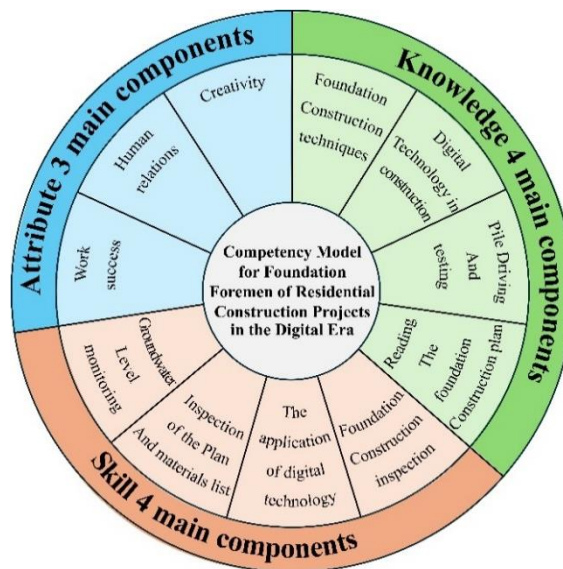
Factors in developing competency models	KMO	Bartlett's Test of Sphericity		
		Approx. Chi-Square	df.	Sig.
1. Knowledge competence, with 33 variables.	0.938	6736.313	528	0.000
2. Skill competence, with 32 variables.	0.940	5799.474	496	0.000
3. Attribute competence, with 19 variables.	0.916	3147.167	171	0.000

Table 4 Statistical values for the extraction and naming of the components of the studied factors.

Competency Development Factors	Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %
1. Knowledge competence, 4 components, 33 subcomponents.			
1.1 Foundation construction techniques, 10 subcomponents.	5.191	15.729	15.729
1.2 Digital technology in construction, 8 subcomponents.	4.668	14.145	29.874
1.3 Pile driving and testing, 8 subcomponents.	4.121	12.489	42.363
1.4 Reading the foundation construction plan, 7 subcomponents.	3.499	10.602	52.965

Table 4 (Continuous)

Competency Development Factors	Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %
2. Skill competence, 4 components, 32 subcomponents.			
2.1 Foundation construction inspection, 20 subcomponents.	4.675	14.609	14.609
2.2 The application of digital technology, 8 subcomponents.	4.487	14.023	28.632
2.3 Inspection of the plan and materials list, 2 subcomponents.	4.133	12.915	41.547
2.4 Groundwater level monitoring, 2 subcomponents.	2.994	9.355	50.902
3. Attribute competence, 3 components, 19 subcomponents.			
3.1 Work success, 12 subcomponents.	3.888	20.464	20.464
3.2 Human relations, 4 subcomponents.	3.409	17.943	38.407
3.3 Creativity, 3 subcomponents.	2.824	14.862	53.269

**Figure 1** Competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era

From table 4 and Figure 1, the results of extracting and naming elements, as well as creating a competency model for foundation foremen of residential construction projects in the digital era, show that, based on the number of elements with eigen values greater than 1, the components and names of the competencies studied in all three competencies were extracted. This resulted in a total of 11 components and 84 subcomponents, as follows:

Knowledge competency found that 4 components and 33 subcomponents, could be extracted and named:

- 1) Component 1: Foundation construction techniques, with 10 subcomponents;
- 2) Component 2: Digital technology in construction, with 8 subcomponents;
- 3) Component

- 3: Pile driving and testing, with 8 subcomponents; and
- 4) Component 4: Reading the foundation construction plan, with 7 subcomponents.

Skill competence found that 4 components and 32 subcomponents, could be extracted and named:

- 1) Component 1: Foundation construction inspection, with 20 subcomponents;
- 2) Component 2: The application of digital technology, with 8 subcomponents;
- 3) Component 3: Inspection of the plan and materials list, with 2 subcomponents; and
- 4) Component 4: Groundwater level monitoring, with 2 subcomponents.

Attribute competency found that 3 components and 19 subcomponents could be extracted and named:

- 1) Component 1: Work success, with 12 subcomponents;

2) Component 2: Human relations, with 4 subcomponents; and 3) Component 3: Creativity, with 3 subcomponents.

4. Conclusion

Guidelines for developing a competency model for foundation foremen in residential construction projects in the digital era consist of three competencies, 11 components and 84 subcomponents, as follows:

4.1 Knowledge competence

Consists of 4 components and 33 subcomponents, as follows: 1) Component 1: Foundation construction techniques, with 10 subcomponents, should focus on installing foundation reinforcement, installing and removing foundation concrete formwork, pouring foundation concrete. Foundation concrete curing, anchor bolt installation, water stop installation in the pit wall, and measurement of the bottom of the borehole and slope; 2) Component 2: Digital technology in construction, with 8 subcomponents, should focus on artificial intelligence technology, internet of things technology, big data technology, 3d printing technology, robots technology, drone technology, and solar photovoltaic (solar pv) technology; 3) Component 3: Pile driving and testing, with 8 subcomponents, should focus on pile driving with cranes, mobile cranes, and diesel hammers, checking details in pile shop drawings, and checking the specifications of the pile testing contract; and 4) Component 4: Reading the foundation construction plan, with 7 subcomponents, should focus on checking foundation plans, checking pile work plans, checking structural expansion and shop drawings, and checking the properties of materials specified in the related plans. Consistent with Phaphan (2017) who studied the problems affecting the control of construction work. A case study of the provincial waterworks authority, region 8, to study the factors of the performance of construction foremen found that the important factors related to the basic knowledge of engineering are as follows: the foreman must check the condition of the construction site with the blueprints every time before starting construction. The foreman must study the format of the blueprints, employment contracts, and contract documents every time before

starting construction. The foreman must have a good understanding of the construction work procedures. The foreman must send samples of materials used in the construction to test the quality according to the criteria specified in the blueprints. And the foreman must have a good understanding of the procedures and regulations of supplies, respectively.

4.2 Skill competency

Consists of 4 components and 32 subcomponents, as follows: 1) Component 1: Foundation construction inspection, with 20 subcomponents, should focus on inspecting the size and depth of the foundation pit, inspecting the materials used and the strength of the foundation formwork, inspecting the size and position of the foundation reinforcement, inspecting the level of pouring foundation concrete, inspecting the completeness and level of the pile head, and inspecting the size and center position of the column, foundation, and pile; 2) Component 2: The application of digital technology, with 8 subcomponents, should focus on the application of artificial intelligence technology, the application of smart device connection technology (internet of things), the application of big data technology, the application of 3d printing technology, the application of robots or smart machines (robots), the application of drone technology, and the application of solar photovoltaic (solar pv) technology; 3) Component 3: Inspection of the plan and materials list, with 2 subcomponents, should focus on inspecting the foundation construction plan to ensure that it can be completed with quality. Not conflicting with the main plan, in accordance with the correct construction sequence according to the principles of architecture, engineering and management, and checking the list of materials requested for approval that their properties are complete and correct, do not conflict with the construction plan according to the contract, or are consistent with the list approved for material used by the hiring inspection committee or any other orders; and 4) Component 4: Groundwater level monitoring, with 2 subcomponents, should focus on checking water and mud in the foundation pit, checking the groundwater level and finding ways to prevent water from seeping into the pit. Consistent with Thana-

amornkan *et al.* (2023) who studied the development guidelines for a competency-based curriculum for construction foremen in the high-rise building construction industry to study the competencies of foremen and present guidelines for developing a competency-based curriculum. It was found that important factors related to construction techniques of high-rise building construction include pile inspection skills, structural evaluation and inspection skills, construction engineering design skills, construction blueprint reading skills, construction material inspection skills, construction quality management skills according to the plan, materials, tools and machinery management skills in the project according to the plan.

4.3 Attribute competency

Consists of 3 components and 19 subcomponents, as follows: 1) Component 1: Work success, with 12 subcomponents, should focus on dedication, devotion and time in working, discipline and compliance with the organization's rules and regulations, love and pride in one's position and organization, meticulousness in working, punctuality, self-confidence, ability to prioritize work, social responsibility and safety awareness in working, ability to make decisions in unclear and complex situations, experience in both practical and theoretical construction work, professional honesty and strict ethics in controlling construction work; 2) Component 2: Human relations, with 4 subcomponents, should focus on human relations and being able to get along well with colleagues, being able to communicate and coordinate with other departments, being able to work well with others, and being flexible and adaptable to situations; and 3) Component 3: Creativity, with 3 subcomponents, should focus on creativity, being eager to learn and always wanting to develop oneself, and being brave to think. Dare to do new things that are beneficial to the organization. Consistent with Borisutnarudom and Khuncumchoo (2015) who studied the characteristics of construction foremen in terms of achievement motivation to study the factors affecting the success of construction foremen. It was found that the factors affecting the success of construction foremen at a high level of importance were having skills

in managing the work system, the need to know the results of their own decisions, foresight, diligence, and risk-taking. The factors affecting the success of construction foremen at a medium level of importance were being competitive and having self-responsibility.

5. Acknowledgments

I would like to express my gratitude to the experts who kindly provided valuable information through interviews, which were instrumental in conducting this research. I also wish to thank the construction foremen who generously dedicated their time to participating in the research survey. Additionally, I would like to extend my thanks to the Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, for providing the facilities and equipment necessary for data collection and statistical analysis.

6. References

- Borisutnarudom, S. and Khuncumchoo, N. 2015. Achievement motivation characteristics in construction supervisors. **Veridian E-Journal, Silpakom University** 8(2): 2893-2905. (in Thai)
- Kasamjaru, S., Boonyasopon, T., Chuphaka, M. and Inthapichai, S. 2021. The development of complete service construction business management model to enhance competitiveness capability. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 32(2): 486-495. (in Thai)
- Likert, R. 1932. A technique for the measurement of attitudes. **Archives of psychology** 140(1): 1-55.
- Lunkam, P. 2024. **Business/Industry Trends 2024-2026: Construction Contracting Business**. Available Source: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industryoutlook/construction-construction-materials/construction-contractors-io/construction-contractor-2024-2026>, October 14, 2024.
- McClelland, D. 1973. Testing for competence rather than intelligence. **American psychologist** 28(1): 1-14.

- National Statistical Office. 2024. **Compilation of Construction Area Data, 1st Quarter 2024**. National Statistical Office, Bangkok.
- Panitanwong, Y., Boonyasopon, T., Wisuttiapet, S. and Roopsing, T. 2019. The development model of the management's potential in construction service industry for thailand 4.0. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 30(2): 351-360. (in Thai)
- Phaphan, J. 2017. Problem affecting efficiency of construction control a case study of provincial waterworks authority regional office 8. Master thesis, Suranaree University of Technology.
- Silpcharu, T. 2024. **Statistical data analysis and research by SPSS and AMOS** (18thed). S.R. Printing Massproducts, Bangkok.
- Sridaranon, T. 2019. A study of situations and effect of construction technologies in thai construction industry. Master thesis, Silpakorn University.
- Thana-amomkan, A., Rakkusol, N. and Ramwarungkura, A. 2023. Guidelines on the development of construction foreman's competency-based curriculum in the high-rise building industries. **Journal of Arts Management** 7(3): 922-940. (in Thai)
- Wanitwat, W., Boonyasopon, T. and Wisuttiapet, S. 2023. Competency framework development for high-rise construction project managers in the digital economy. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 34(1): 241-236830. (in Thai)
- Yamane, T. 1973. **Statistics: An Introductory Analysis** (3rded). Harper and Row, New York.



Research Article

Implementing Total Dissolved Solids Automation in the 1st Leaching Station for Rubber Glove Manufacturing

Nattapong Chotipan and Ratta Chotipan *

Department of Industrial Engineering, Faculty Engineering, Princess of Naradhiwas University, Mueang, Narathiwat 96000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-09-04

Revised: 2025-02-01

Accepted: 2025-02-17

Keywords:

total dissolved solids (TDS);
SCADA systems;
leaching process;
real-time;
monitoring;
quality control and downtime;
return on investment (ROI)

This research implemented a Total Dissolved Solids (TDS) automation control system to regulate TDS levels and water flow rates in the first leaching tank. The integration of TDS sensors enables real-time monitoring of dissolved solids in the water an essential component of automation that can be incorporated into a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system. The implementation of this system has improved glove quality while optimizing water usage in the production process. Prior to its deployment, the company experienced unplanned downtime due to ineffective TDS control, leading to defects such as sludge accumulation (SD), dirt contamination (D), and discoloration (DC) in the gloves. High concentrations of dissolved solids, including minerals, salts, and heavy metals, were identified as key contributors to these defects. The objectives of this study were to install a TDS automation system, regulate water flow rates, and record TDS and flow rate data through SCADA integration. This approach aimed to minimize non-value-added processes, reduce water consumption, and prevent unplanned downtime caused by TDS-related glove defects. The findings demonstrate that the system effectively reduces water consumption by approximately 5 liters per minute (a 25% reduction) and eliminates unplanned downtime associated with water quality issues at the leaching tank by improving TDS automation control by nearly 100%. The implementation of this system has led to significant cost savings, including reductions in non-value-added costs, water expenses, and unplanned downtime, totaling approximately 308,457.78 baht per month. The return on investment (ROI) was achieved within 0.33 months, highlighting the system's effectiveness in enhancing operational efficiency and reducing production costs.

© 2025 Chotipan, N. and Chotipan, R. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

Allergies resulting from residual rubber chemicals in compounding ingredients are classified as Type IV allergies or chemical sensitivities, which affect the skin (Knudsen, *et al.*, 2000; Nettis *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2004). One of the most practical and cost-

effective ways to minimize allergenic proteins and skin-sensitive chemicals in rubber gloves is by implementing an appropriate washing process during manufacturing (Figure 1). This process, known as leaching, involves washing the gel formed on the glove former with flowing water at an elevated temperature to remove most chemicals before drying. The dried film then undergoes

* Corresponding author.

E-mail address: ratta.c@pnu.ac.th

Cite this article as:

Chotipan, N. and Chotipan, R. 2025. Implementing Total Dissolved Solids Automation in the 1st Leaching Station for Rubber Glove Manufacturing. **Recent Science and Technology** 17(2): 264599.

a similar washing process while still on the manufacturing line to remove any leachable proteins from the latex film surface before being dried again and stripped from the former (Aksoy *et al.*, 2023; Yatim, 2002). Leaching is a process in which rubber gloves are cleaned in hot water (55-65°C). Water direction and the fresh water ratio controlled by water overflow, using a manual flow rate meter to maintain the water level. Water is regulated for a few minutes to remove chemical, biological, and dissolved solids residues (Abdullah and Yatim, 2014). TDS is typically measured in milligrams per litre (mg/L) or parts per million (ppm). TDS is defined as the amount of minerals, salts, metals, organic compounds, and other substances that can be dissolved in water. The effects of leaching are observed in the glove's appearance and properties, including improved film clarity, reduced discoloration, significantly lower protein content, and enhanced physical properties (Abdullah and Yatim, 2014).

Effective leaching protocols are critical in glove manufacturing. Typically, there are two types of leaching processes: wet gel leaching at station number 6 (Figure 1) and dry film leaching at station number 10 (Figure 1). Wet gel leaching involves washing deposits while the gel is still wet before curing. During this process, water is absorbed into the rubber through capillary action, dissolving soluble materials and carrying them out of the wet films under continuous water flow. This stage benefits from the osmotic effect, which enhances the extraction of soluble materials (Abdullah and Yatim, 2014; Lovato *et al.*, 2023). This indicates a greater extraction of soluble materials in water compared to the dry gel leaching method, resulting in an increased production of total dissolved solids in water. This research exclusively examines and initially implements wet gel leaching.

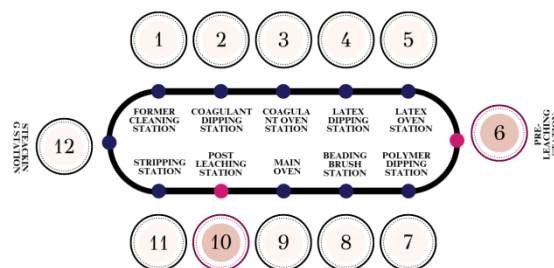


Figure 1 Typical manufacturing process in a glove production line.

1. Measurement of Total Dissolved Solids (TDS)

The quantification of Total Dissolved Solids (TDS) is essential for assessing water quality in environmental science and engineering disciplines. Conventional methods, such as gravimetric analysis and electrical conductivity correlation, have been widely utilized; however, they exhibit notable limitations, including time consumption, sample dependency, and detection constraints. This study introduces a novel approach to TDS measurement using charged aerosol detection without the need for chromatographic separation. The proposed method offers several advantages, including rapid analysis, minimal sample volume requirements, and enhanced sensitivity, achieving a detection limit as low as 0.054 mg/L (Gilmore *et al.*, 2016). This technique represents a significant advancement in water quality analysis, providing a more efficient and precise alternative to traditional methodologies.

2. Optimization of Leaching Tank Water Quality Control in Industrial Processing

The first leaching tank was designed using stainless steel and featured an I-shaped configuration, diverging from conventional fixed fresh water flow rate systems. Instead of a continuous 20 LPM fresh water top-up with an overflow mechanism, the system required manual intervention for water quality control. The tank's water temperature was maintained within a standardized range of 55 to 70°C through a heat exchanger utilizing hot oil as the primary heat source. Quality assurance personnel conducted daily manual sampling to assess TDS levels in the leaching tank. If the measured TDS met or exceeded the predefined standard limit or control specification, the quality



Figure 2 Original sampling point procedure at the leaching tank.

assurance team immediately alerted production personnel, who manually adjusted the fresh water inflow to restore TDS parameters within acceptable limits. The original sampling point procedure for the leaching tank is illustrated in Figure 2. This method underscores the necessity of continuous monitoring and manual regulation to ensure process stability and product quality.

3. Challenges in Manual TDS Monitoring and Control

Historically, production experienced high unplanned downtime due to TDS levels exceeding the specification limit, occurring more than six times per month. Process analysis revealed that quality control inspectors measured TDS once daily, leading to delayed issue resolution. When TDS levels exceeded the control specification limit (2300 ppm), approximately 203 minutes of unplanned downtime was required to address sludge-related defects. Alternatively, restoring TDS levels to the standard control specification through manual adjustment of the flow rate valve could take up to eight hours. This manual approach increased the likelihood of human error and compromised process control efficiency.

4. Implementation of Automated TDS Monitoring and Control

To enhance the leaching process, this study proposes the integration of a Total Dissolved Solids (TDS) sensor into the first leaching tank of the rubber gloves production line (Bhardwaj and Gurpreet, 2022; Biswa *et al.*, 2022; Senthil and Pemmasani, 2022). The TDS sensor provides continuous measurement of TDS

concentrations, ensuring that operations remain within specifications and maintain high-quality rubber gloves (Adjovu *et al.*, 2013; Meena, 2024). This automated approach improves upon the existing method, which relies on manually adjusting the flow rate to dilute solids.

Under the manual system, TDS levels were monitored by quality assurance inspectors only once daily. If TDS exceeded the specified limit (≥ 2500 ppm), restoring it to control specifications could take up to eight hours, increasing non-value-added activities and operational costs (Pasika and Gandla, 2020). The implementation of continuous TDS measurement mitigates these inefficiencies, enhances product quality, and reduces costs by providing real-time data and automated adjustments (Akram *et al.*, 2022).

5. System Integration with SCADA for Optimal Process Control

The proposed system ensures that the correct amount of water is consistently added to the leaching tank. Water flow rates are automatically adjusted in response to TDS fluctuations: the flow rate increases when TDS levels exceed a predefined threshold and decreases when levels fall below the set point. This system is integrated with a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system to facilitate real-time monitoring and control of the rubber glove manufacturing process (Alihussein and Abedalati, 2003; Saravanan *et al.*, 2018; Moleda *et al.*, 2020). The implementation of automated TDS regulation minimizes human intervention, enhances process efficiency, and ensures compliance with quality standards.

2. Materials and Methods

The design of the TDS sensor control system is illustrated in Figure 2. The working principle of the system begins with writing the control program on the computer with the program under the desired This program is then sent to the PLC set for use in controlling the operation of the TDS Sensor and transmit TDS value data via the Internet. The system also enables monitoring and control through monitoring equipment, which manages the TDS automation system via the crystal brand are changed to "server. This setup allows for system monitoring, control, and alert notifications.

To improve the leaching process, a TDS sensor will be installed in the first leaching tank of the rubber glove production line to measure the

concentration of the dipping tank solution. Additionally, an automated valve for fresh water topping-up will be installed, and a Programmable Logic Controller (PLC) will be designed to control the TDS parameter and integrate it with the SCADA system.

The approach of the automated TDS control system is illustrated in the flowchart (Figure 4). Based on our evaluation, with a leaching tank capacity of 2,400 liters, the automated valve will open to increase the flow rate to 30 liters per minute (LPM) if the TDS concentration surpasses the standard control specification ($\geq 2,300$ ppm), as shown in the TDS control diagram in Figure 2. Conversely, the automated valve will reduce the flow rate to 15 LPM if the TDS concentration drops below the threshold ($\leq 1,500$ ppm). (Figure 4)

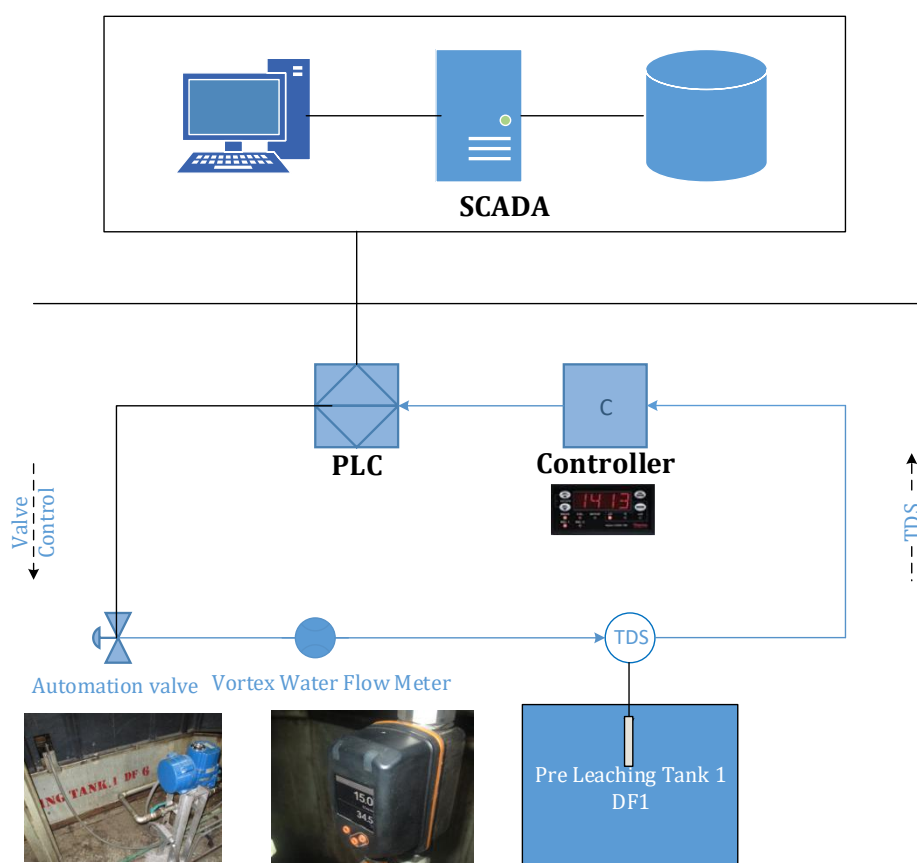


Figure 3 The SCADA Synchronize system.

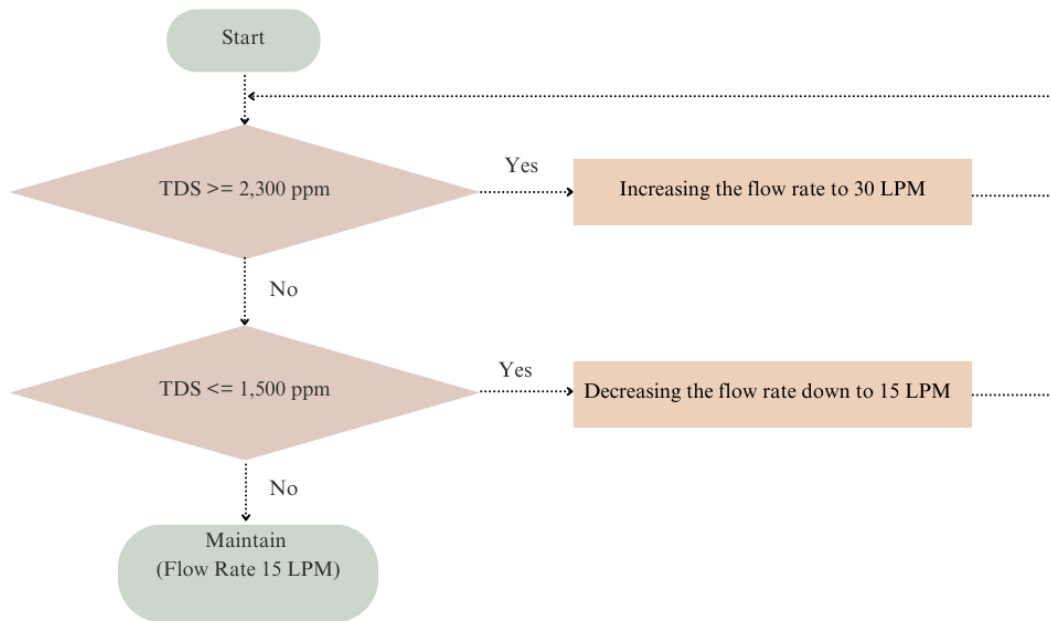


Figure 4 TDS control Diagram.

Table 1 Equipment List.

No	Description
1	TDS controller Model:ALOHA TDS 190 with sensor
2	Electric wire model: JZ-500 SQMM "PRYSMIAN"
3	Control Cabinet model:CB-03 "TAMCO"
4	Fan Model: PMV 12.00 size 50 cm."Omron"
5	ANALOG I/O UNIT MODEL : CJ1W-DA041 "OMRON"
6	BALL VALVE with motorized actuator

The leaching process needs to be improved by installing a TDS sensor in the first leaching tank of the rubber glove production line to measure the concentration of the dipping bath solution, installing an automated valve (Alihussein and Abedalati, 2003), and designing a PLC to control the TDS parameter and link it to SCADA (Dobriceanu *et al.*, 2008; Singh and Walingo, 2024).

Real-time TDS monitoring and automatic adaptive flow rate control will be implemented and integrated into the SCADA system.

3. Results and Discussion

The results include two components: the adoption of the TDS system and cost savings, both

referenced in relation to Return on Invested Capital (ROIC).

3.1 The TDS system implementation

As previously mentioned regarding the use of a SCADA screen within this chapter, the user interface and all of the details can be observed (Zainurin *et al.*, 2022), as shown in Figure 5. This application will be continuously updated, and readings can be checked at any time using the storage system. If the TDS level in the leaching tank station suddenly raise above the threshold value, an automated warning message will be sent to the concerned authorities' SCADA screen at the front of the production line as shown in Figure 5.

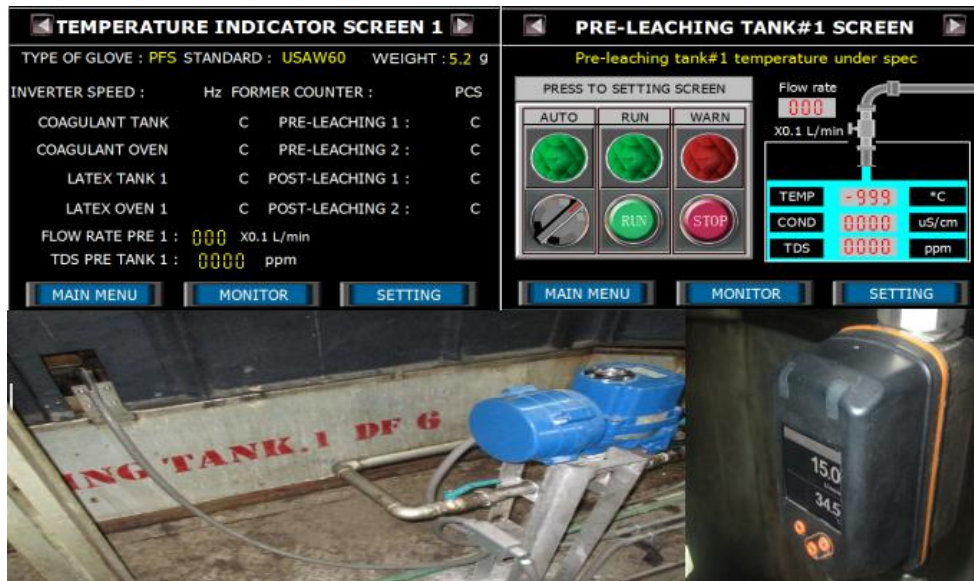


Figure 5 TDS and water flow rate which synchronized to SCADA

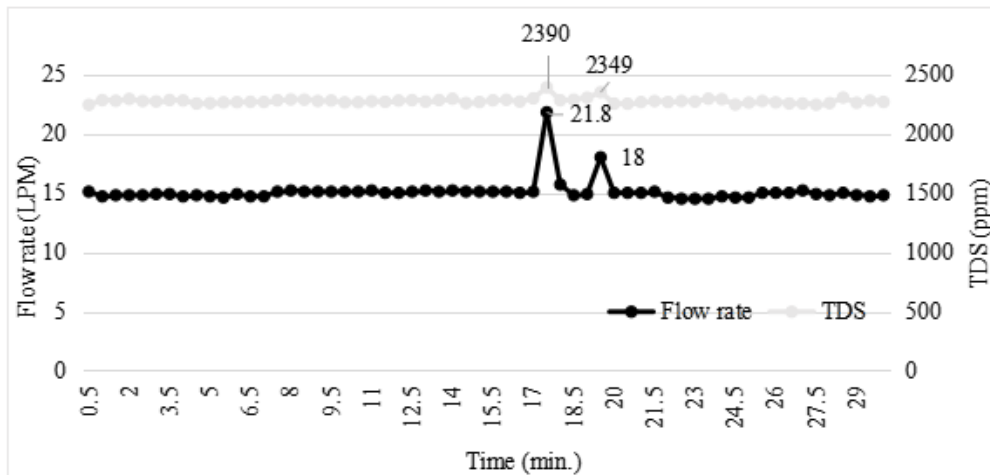


Figure 6 The consistent trend of TDS and water flow rate in real time.

The chart referenced in Figure 4 shows the TDS and water flow rate, which are linked to SCADA, the automated valve, and the TDS sensor, respectively. These figures illustrate the component installation.

The TDS system was observed, and the automated system adjusted the flow rate, successfully restoring TDS levels within the desired range. The effectiveness of the proposed TDS system is evaluated in terms of TDS, and flow rate levels. Sensor readings are used for this evaluation. These graphs are automatically generated to provide users with a clear understanding of all stored data. They are continuously updated as new data is sent to the storage system.

The results for this model are shown in the various figures available in this section. Figures 6-8

display the graphs obtained from measurements recorded at 30-second intervals under controlled conditions, ensuring that TDS levels remained at or below 2300 ppm while maintaining a consistent flow rate of 15 LPM.

Figure 6 displays the TDS data obtained from the sensors incorporated into the proposed model. Flow rate data is shown on the primary axis, and TDS data is shown on the secondary axis, and time is represented on the X-axis. The values are presented in the graph based on time.

Figure 6 presents real-time data collected at 30-second intervals, illustrating the relationship between Total Dissolved Solids (TDS) and water flow rate under controlled conditions. Initially, TDS levels were

maintained at or below 2,200 ppm, with a constant flow rate of 15 liters per minute (LPM). At approximately 17.5 seconds, a significant deviation occurred: TDS levels rapidly escalated to 2,390 ppm. In response, the system promptly increased the flow rate to 21.8 LPM, effectively reducing the TDS back to standard levels within 2 seconds.

Measurements were taken at hourly intervals under controlled settings, ensuring that TDS levels did not exceed 2300 ppm while maintaining a constant flow rate of 15 LPM.

Figure 7 displays the TDS data obtained from the sensors incorporated in the proposed model. Flow rate data is shown on the primary axis, TDS data on the secondary axis, and time on the X-axis. The values in the graph are presented based on the date. It illustrates that the system can automatically adjust according to the design specifications. The chart shows

that the water flow rate increases automatically when the TDS of the leaching tank exceeds the set point, and decreases once the TDS falls back within the set point.

Measurements were taken at 40-minute intervals under controlled settings, ensuring the TDS system's automatic adjustment capabilities according to control specifications

Figure 8 displays the TDS data obtained from the sensors incorporated in the proposed model. Flow rate data is shown on the primary axis, TDS data on the secondary axis, and time on the X-axis. The values in the graph are presented based on time. Figure 8 illustrates the deviation that occurred: at the beginning of the graph, TDS levels escalated to 2,395 ppm. In response, the system promptly increased the flow rate to 28.4 LPM, and after around 40 minutes, the TDS levels reduced to 2,053 ppm.

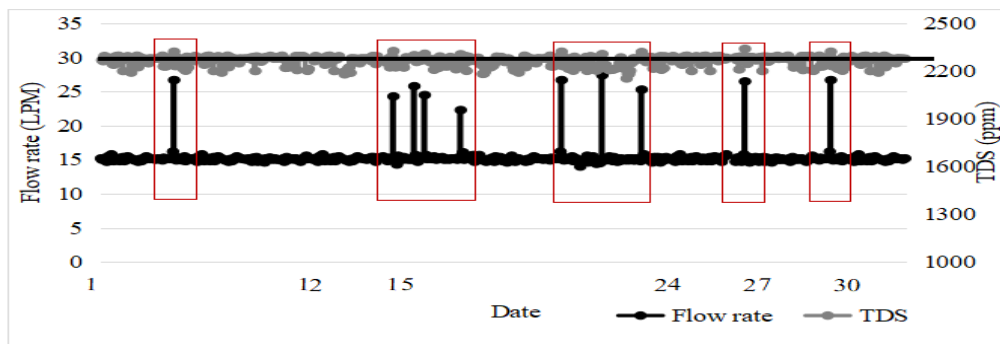


Figure 7 The system can be adjudicated automatically according to the design.

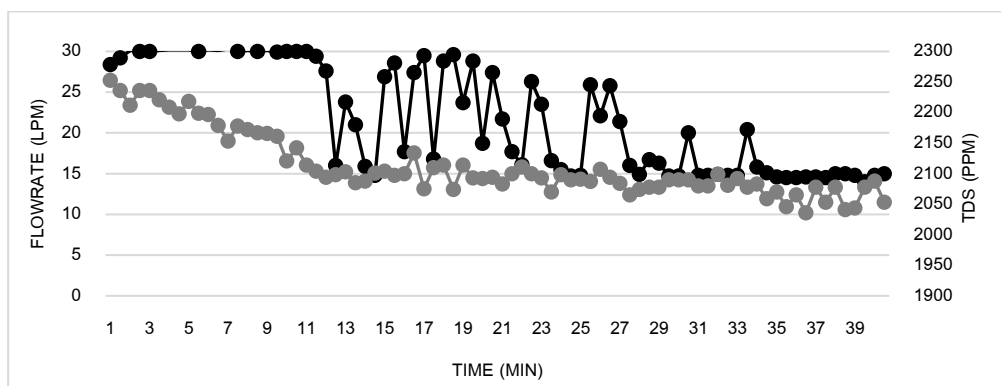


Figure 8 The system can be adjudicated automatically according to the design within 40 minutes.

It illustrates that the system can autonomously adjust in accordance with the design within 40 minutes. Following the implementation of the TDS control automation system, production is no longer dependent on manual adjustments. The TDS automation system efficiently regulates TDS to meet control standards in about 40 minutes for each case, resulting in a time reduction of around 7 hours and 20 minutes compared to 8 hours required with the old technique, while also realizing cost savings on water.

3.2 Economic Benefits and Return on Investment

This study illustrates that the operational expenses associated with rubber glove manufacturing can be markedly reduced through a cost-consequences analysis of unanticipated downtime resulting from TDS parameters exceeding control specification limits (Sobotka and Sagan, 2016; Guzman, 2025). A successful outreach facilitation was conducted, considering the projected cost savings from the implementation of the TDS system, which included

reductions in non-value-added activities costs, water expenses, and unplanned downtime as following:

3.3 Time spent on non-value-added activities.

As previously indicated, the TDS parameter exceeded the specification limit, resulting in substantial unplanned downtime for production, which occurred on average more than six times each month. After examining the procedure, we concluded that TDS is measured by process quality control inspectors once daily. Since it was too late to address the issue at that point, the production team immediately added personnel to tighten monitoring and sampling eight times daily while awaiting the installation of the new TDS automation system. The cost of these non-value-added activities, based on the time spent, is shown in Table 2, and the cost of non-value-added activities is detailed in Table 3.

Table 3 show the production department can reduce the cost for non-value-added activities, with a value of 307.98 THB/month.

Table 2 Time spent on non-value-added activities.

Item	Description	Time	Unit	Remark
1	Time to stay alerted TDS by worker.	10	Min/Time	
Total time spent on non-value-added activities		10	Min/Time	

Table 3 The cost for non-value-added activities.

Item	Description	Price	Unit	Remark
Cost for non-value-added activities				
1	1 person x 10 minutes per time x 8 times x (38.5 THB / 60 minutes)	51.33	THB/Cases	
2	Average 6 cases per month x 51.33 THB/cause	307.98	THB/Month	
The cost for non-value-added activities		307.98	THB/Month	

Table 4 Number of Water saving.

Item	Description	QTY	Unit	Remark
1	Water saving	5	Liter Per Minute	
	Water saving 5 LPM x 60 minutes	300	Liter Per Hour	
Total number of water savings for 8 hours		2,400	Liter Per 8 Hours	

Table 5 Water saving cost.

Item	Description	Price	Unit	Remark
Water saving: 2,400 liters per 8 hours.				
1	2,400 L x 0.2904 THB Per Liter	696.96	THB/Cause	
2	Average 6 Causes per month x 696.96 THB per cause	4,181.76	THB/Cause	
Total water saving cost		<u>4,181.76</u>	THB/Month	

Table 6 Duration time for the restoration process each unplanned downtime resulting from TDS-related glove defects.

Item	Description	Time	Unit	Remark
Duration time for the restoration process				
1	Stop production to clear the gloves.	30	Minute	
2	Drain contaminated water of 2,400 liters each tank.	18	Minute	
3	Clean tank.	20	Minute	
4	Add fresh water contaminated water of 2,400 liters.	90	Minute	
5	Heat temperature up to set point.	15	Minute	
6	Start running the production line until you get the first piece of glove.	30	Minute	
Total duration time for the restoration process.		<u>203</u>	Minute/Time	

3.4 Water expenses

As mentioned above, in order to keep the TDS parameter within specification at the leaching tank station, we use a set flow rate of 20 LPM to regulate the concentration of chemicals dissolved in water. Following the installation of the TDS automation system, we are able to sustain a flow rate of at least 15 LPM. Water expenses must be calculated based on the liters of water used each minute. Since the water savings amount to 5 liters per minute based on the previously practiced problem-solving that took around 8 hours, this is shown in Tables 4 and 5.

Table 5 shows the production department can reduce the cost of water savings, with a value of 4,181.76 THB per month.

3.5 Unplanned downtime cost.

Unplanned downtime in the production process necessitates halting the production line, draining contaminated water containing persistent microbes and chemical residues, cleaning the tank, replenishing it with fresh water, and reheating it to the required temperature. This restoration process takes approximately 203 minutes, during which production is suspended, resulting in an output loss of approximately 20 cartons per 60 minutes. Given a cost of 728.09 baht per carton, the financial impact of this downtime is substantial, as shown in Table 6 and 7.

On average, TDS-related glove defects lead to unplanned downtime occurring more than six times per month. The associated costs must be assessed based on the time required for rectification and the financial loss incurred due to reduced glove production.

Table 7 Unplanned downtime cost.

Item	Description	Price	Unit	Remark
Unplanned downtime cost				
1	Financial loss incurred due to output loss - Duration time for the restoration process: 203 minutes. (Production capacity is 20 cartons / 60 minutes) - Output loss of approximately 20 cartons per 60 minutes. $= \left(\frac{203 \times 20}{60} \right)$ $= 67.66 \text{ cartons / 143 minutes}$ - Glove cost of 728.09 baht per carton $= 67.66 \times 728.09$ $= 49,267.42 \text{ THB / Downtime}$	49,267.42	THB/Downtime	
2	- Water usage lost cost - Drain contaminated water of 2,400 liters each tank - Water cost 0.2904 THB Per Liter $= 2,400 \times 0.2904$ $= 696.96 \text{ THB}$	696.96	THB	
3	- Water usage lost cost - Fresh water water of 2,400 liters each tank - Water cost 0.2904 THB Per Liter $= 2,400 \times 0.2904$ $= 696.96 \text{ THB}$	696.96	THB	
4	Total lost cost = Item 1 + Item 2 + Item 3 $= 49,267.42 + 696.96 + 696.96$ $= 50,661.34 \text{ THB Per Causes}$	50,661.34	THB/Downtime	
2	Average unplanned downtime cost. (6 times / Month x 50,661.34 THB/Downtime)	303,968.04	THB/Month	
Total unplanned downtime cost		<u>303,968.04</u>	THB/Month	

Table 7 shows the production department can save on the cost of unplanned downtime, with a value of 303,968.04 THB per month.

Return of Investment Cost.

- The total cost for this project is around 100,837 Baht.
- Cost savings per month are around 308,457.78 Baht.

$$\text{ROI} = \frac{100,837 \text{ Baht}}{308,457.78 \text{ Baht/Month}}$$

$$\text{ROI} = 0.33 \text{ Month}$$

3.6 Economic Benefits and Return on Investment

The implementation of the automated TDS control system has led to significant cost savings. Specifically, non-value-added activities have been reduced, resulting in monthly savings of 307.98 THB, while water costs have been reduced by 4,181.76 THB per month. Additionally, unplanned downtime expenses have been lowered by 303,968.04 THB per month. The total cost savings amount to approximately 308,457.78 THB per month, achieving a return on investment (ROI) within 0.33 months. These economic benefits underscore

the financial viability and efficiency improvements associated with the automated TDS control system and SCADA integration.

4. Conclusion

The optimization of TDS measurement and leaching tank water quality control is critical for improving industrial processes, particularly in rubber glove manufacturing, as it is the most effective method to minimize undesirable materials in rubber gloves. The integration of automated TDS sensors and SCADA-based process control significantly reduces downtime expenses, minimizes non-value-added activities, resulting in monthly savings of 307.98 THB, and reduces water costs by 4,181.76 THB per month. The total cost savings amount to approximately 308,457.78 THB per month, achieving a return on investment (ROI) within 0.33 months. These economic benefits underscore the financial viability and efficiency improvements associated with automated TDS control and SCADA integration, while ensuring consistent product quality. Furthermore, this research highlights the role of TDS sensors in detecting microbial contaminants, chemical residues, and variations in dissolved solids, which have historically been overlooked as a critical control point (CCP) in the rubber glove industry.

For this research, only wet gel leaching has been studied and implemented. Further research will require a combination of leaching protocols, both wet gel and dry film leaching. Leaching also results in gloves possessing improved physical properties. By implementing a proactive, automated approach to TDS management, manufacturers can achieve substantial cost savings, enhance process efficiency, and ensure compliance with stringent quality standards. The integration of real-time monitoring systems and SCADA-based automation represents a significant advancement in industrial process optimization, contributing to more sustainable and reliable manufacturing operations.

5. References

Abdullah, N. and Yatim, A.H.Md. 2014. Leaching a critical factor in processing of rubber

examination gloves. **Journal of Malaysian Rubber Technology Developments** 14(1): 21-26.

Abdulwahid, D.M. and Basil, N. 2020. Design and Implementation of Water Level Tank Model by using SCADA System. **Journal of Applied Machines Electrical Electronics Computer Science and Communication Systems** 1(1): 63-66.

Adjovu, G.E., Stephen, H., James, D. and Ahmad, S. 2023. Measurement of Total Dissolved Solids and Total Suspended Solids in Water Systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques. **Remote Sensing** 15(14): 3534.

Akram, M.M., Ramezannezhad, M., Nikfarjam, A., Kabiri, S. and Ehyaei, S. 2022. A strip-based total dissolved solids sensor for water quality analysis. **IET Science, Measurement & Technology** 16(3): 208-218.

Aksoy, H., Akdeniz, N. and Karakurt, F. 2023. Prevalence of Type I Allergy to Latex and Type IV Allergy to Rubber Additives in Turkish Healthcare Workers. **Dermatology Practical & Conceptual** 13(3): e2023187.

Alihussein, A. and Abedalati, M. 2003. A Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) for Water Pumping Station of GAZA. **Journal of Sensors** 19(1): 303-321.

Bhardwaj, S. and Gurpreet, S.S. 2022. NEECH: A Novel Energy-Efficient Cluster Head Selecting Protocol in a Wireless Sensor Network, pp.133-144. In Soumya, R.N., Biswa, M.S., Muthukumaran, M. and Jibitesh, M., eds. **Smart Sensor Networks Using AI for Industry 4.0**. CRC Press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton.

Biswa, M.S., Ramesh, C.S., Nabanita, P., Abhinav, T., and Ranjeet, K.R. 2022. Modified Artificial Fish Swarm Optimization Based Clustering in Wireless Sensor Network, pp 77-88. In Soumya R.N., Biswa M.S., Muthukumaran, M. and Jibitesh, M., eds. **Smart Sensor Networks Using AI for Industry 4.0**. CRC

- Press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton.
- Chen, H.H., Sun, C.C. and Tseng, M.P. 2004. Type IV hypersensitivity from rubber chemicals: a 15-year experience in Taiwan. **Dermatology**. 208(4): 319-325.
- Dobriceanu, M., Bitoleanu, A., Popescu, M., Enache, S. and Subtirelu, E. 2008. SCADA System for Monitoring Water Supply Network. **WSEAS Transactions on Systems** 7(10): 1070-1079.
- Gilmore, K.R. and Luong, H.V. 2016. Improved Method for Measuring Total Dissolved Solids. **Analytical Letters** 49(11): 1772-1782.
- Guzman, M.J., Gitelis, M.E., Linn, J.G., Ujiki, M.B., Waskerwitz, M., Umanskiy, K. and Muldoon, J.P. 2025. A Model of Cost Reduction and Standardization: Improved Cost Savings While Maintaining the Quality of Care. **Diseases of the Colon & Rectum** 58(11): 1104-1107.
- Hasma, H. 1992. Proteins of natural Rubber Latex Concentrate. **Journal of Natural Rubber Research** 7(2): 102-112.
- Knudsen, B., Hametner, C., Seycek, O., Heese, A., Koch, H. and Peters, K. 2000. Allergically relevant rubber accelerators in single-use medical gloves. **Contact Dermatitis** 43(1): 9-15.
- Lovato, M.J., Del Valle, L.J., Puiggalí, J. and Franco L. 2023. Performance-Enhancing Material in Medical Gloves. **Journal of Functional Biomaterials** 14(7): 349.
- Moleda, M., Momot, A. and Mrozek, D. 2020. Predictive Maintenance of Boiler Feed Water Pumps Using SCADA Data. **Sensors** 20(2): 571.
- Nettis, E., Assennato, G., Ferrannini, A. and Tursi, A. 2002. Type I allergy to natural rubber latex and type IV allergy to rubber chemicals in health care workers with glove-related skin symptoms. **Clinical Experiment Allergy** 32(3): 441-447.
- Pasika, S and Gandla, S.T. 2020. Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT. **Heliyon** 6(7): e04096.
- Sankaran, M. 2024. **Managing Industrial Wastewater with Effective TDS Meter Monitoring**. KETOS. Available Source: <https://ketos.co/managing-industrial-wastewater-with-effective-tds-meter-monitoring>, August 11, 2024.
- Sarang, B. and Tripathy, B. 2022. A Study on Outlier Detection Techniques for Wireless Sensor Network with CNN Approach, pp. 115-132. *In* Soumya R.N., Biswa M.S., Muthukumar M. and Jibitesh, M., eds. **Smart Sensor Networks Using AI for Industry 4.0**. CRC Press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton.
- Saravanan, K., Anusuya, E., Kumar, R. and Son, L.H. 2018. Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA. **Environmental Monitoring Assessment** 190(9): 556.
- Senthil Kumar, A.M. and Pemmasani, Y. 2022. An Efficient Model for Toxic Gas Detection and Monitoring Using Cloud and Sensor Network, pp.145-156. *In* Soumya, R.N., Biswa, M.S., Muthukumar, M. and Jibitesh, M., eds. **Smart Sensor Networks Using AI for Industry 4.0**. CRC Press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton.
- Singh, Y. and Walingo, T. 2024. Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks. **Sensors (Basel)** 24(9): 2871.
- Sobotka, A. and Sagan J. 2016. Cost-saving Environmental Activities on Construction Site –Cost Efficiency of Waste Management: Case Study. **Procedia Engineering** 161: 388-393.
- Yatim, A.H.Md. 2002. Effect of Leaching on the Physical Characteristics of Cast NR Latex Films. **Journal of Rubber Research** 5(2): 84-93.
- Zainurin, S.N., Wan Ismail, W.Z., Mahamud, S.N.I., Ismail, I., Jamaludin, J., Ariffin, K.N.Z. and Wan Ahmad Kamil, W.M. 2022. Advancements in Monitoring Water Quality Based on Various Sensing Methods: A Systematic Review. **International Journal of Environmental Research Public Health**. 19(21): 14080.



Research Article

Comparative Analysis of Digital Agriculturist Support Tools: Evaluating Efficiency in Reducing Costs

Kasidid Promproh ^a, Wachirathorn Janchomphu ^a and Vicharinee Sawadee ^{b*}

^a Department of Digital Agricultural Businesses, Faculty of Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok Chanthaburi Campus, Khao Khitchakut, Chanthaburi 22210, Thailand.

^b Department of Digital Technology and Media Convergence, Faculty of Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok Chanthaburi Campus, Khao Khitchakut, Chanthaburi 22210, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-08-15

Revised: 2025-03-03

Accepted: 2025-03-07

Keywords:

pH meter;
temperature;
moisture;
agronomy

Digital agriculture leverages advanced technologies to optimize farming, enhance crop yields, and promote sustainability. Precision farming improves resource management, with soil pH, electrical conductivity (EC), temperature, and moisture being key factors influencing soil chemistry, nutrient availability, and plant health. However, inconsistencies in measurement tools can lead to suboptimal decisions, affecting productivity and sustainability. This study compares the accuracy, efficiency, and cost-effectiveness of two portable soil analysis tools: the YY-1033 Soil pH Meter and the A-2. The YY-1033 offers a pH range of 0.0-14.0 (± 0.1 accuracy) and an EC range of 0.00-20.00 mS/cm (± 0.1 accuracy), using a puncture electrode and bluetooth connectivity for real-time data logging. The A-2, with a pH range of 3.5-9.0 (± 0.5 accuracy) and an EC range of 1.5-15.0 mS/cm (± 0.5 accuracy), employs an aluminum electrode and lacks digital connectivity. A randomized complete block design (RCBD) was used and data were analyzed through Analysis of Variance (ANOVA) and Least Significant Difference (LSD) tests at a 95% confidence level. Results showed significant differences in pH and EC measurements, with the YY-1033 demonstrating higher precision, particularly in extreme soil conditions. However, both devices provided reliable temperature and moisture readings. The coefficient of determination (R^2) values for pH (0.930) and EC (0.911) confirmed accuracy differences. Despite the benefits, research in this area remains limited, especially in Thailand. Adopting efficient and cost-effective soil measurement tools can enhance precision farming, improve yields, and support sustainability. Expanding research in this field will ensure that farmers have access to reliable technologies. Integrating GIS and AI-based soil monitoring can further optimize agricultural decision-making, while future studies should assess the long-term cost-effectiveness and reliability of these tools.

© 2025 Promproh, K., Janchomphu, W and Sawadee, V. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

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

Cite this article as:

Promproh, K., Janchomphu, W and Sawadee, V. 2025. Comparative Analysis of Digital Agriculturist Support Tools: Evaluating Efficiency in Reducing Cost. *Recent Science and Technology* 17(2): 264406.

1. Introduction

Precision agriculture technologies enhance farm management and optimize resource use through the integration of drones, automated irrigation systems, and sensor networks for soil nutrient measurement. Additionally, artificial intelligence (AI) plays a crucial role in farm management, particularly in soil management. Agronomy, the scientific study of soil structure, chemical composition, and biological properties, is fundamental to agricultural success. By analyzing key soil properties such as pH, temperature, moisture, and nutrient content, farmers can improve soil management practices to match specific crop requirements, ultimately enhancing both yield quality and quantity (Slessarev *et al.*, 2016).

Soil pH significantly influences chemical and biological reactions, including the dissolution and precipitation of minerals. It serves as a key determinant of nutrient availability for plants (Tecon and Or, 2017). The digital transformation of agriculture is becoming increasingly important worldwide due to the rising demand for food driven by population growth. Traditional breeding methods alone cannot keep pace with this demand. However, precision agriculture technologies help increase yields while minimizing environmental impact. In addition to climate-adaptive systems, effective land-use management is essential. By leveraging digital data, farmers can monitor, analyze, and assess soil quality before planting seasons, enabling proactive soil health improvements tailored to specific crops. Standard soil pH determination involves dissolving soil samples in distilled water or a 0.01 molar calcium chloride solution. Although different soil-to-liquid ratios exist, suspension-based pH measurement is widely accepted due to its simplicity and effectiveness. This method provides an accurate representation of the soil's acid-base balance and its influence on nutrient solubility. For most crops, an optimal pH range of 6.0-7.5 is recommended (Everhart, 1994). Managing soil pH is crucial for maximizing nutrient availability, supporting high-yield production, and maintaining soil health. Proper pH adjustments not only promote plant growth but also enhance soil fertility, reducing unnecessary costs associated with soil amendments. Recent advancements in agricultural technology have improved

field-based pH measurement accuracy, making it comparable to laboratory instruments. Traditionally, soil samples were collected and analyzed in laboratories or tested with litmus paper. However, modern portable meters can now measure pH directly in the field under appropriate moisture conditions. These meters operate using potentiometry, which measures the electrical potential difference between a reference electrode and a solution containing H⁺ ions. Portable pH meters, calibrated with standard buffer solutions (pH 4.0, 7.0, and 10.0), offer high precision (± 0.001 pH units) and mobility, making them ideal for on-site agricultural applications. However, they are relatively expensive, and inaccurate buffer solutions can lead to erroneous readings (Butraphon, 2019). Soil pH variability significantly influences nutrient uptake in plants, requiring site-specific pH adjustments tailored to different crops and growth stages. Maintaining an optimal pH range not only enhances plant health and productivity but also fosters beneficial microbial activity while mitigating pest and disease outbreaks.

Currently, portable soil meters are widely used to measure physical and chemical soil properties, including pH, nitrogen, phosphorus, and potassium, offering rapid and convenient alternatives to laboratory testing. These devices vary significantly in price depending on features, accuracy, and certification. The advancement of sensor technology has led to the development of pH measurement devices that provide real-time, continuous data, thereby enhancing soil management efficiency. However, permanently installed sensors are prone to interference from environmental factors (Yuzhakov *et al.*, 2021). Soil acidity and alkalinity serve as indicators of overall soil health. pH levels regulate numerous chemical and biological reactions, impacting nutrient availability and biogeochemical cycles (Tecon and Or, 2017). Studies have shown that microbial diversity and activity increase with higher pH levels and decrease with lower pH levels (Fierer and Jackson, 2006; Rousk *et al.*, 2010; Cao *et al.*, 2016). Various environmental factors, including erosion, mineral composition, water balance, and shifts in mineral concentrations, also influence soil pH (Slessarev *et al.*, 2016).

However, innovative electrochemical sensor has continuous development for instance This research introduced an innovative electrochemical sensor designed for direct, real-time, continuous monitoring of soil pH without the need for soil pre-treatment. The sensor features a composite matrix coating of alizarin and Nafion applied to the working electrode. The study evaluated the sensor's performance using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and square wave voltammetry (SWV) across various soil textures, including clay, sandy loam, and loamy clay. Results indicated that SWV provided pH-dependent responses consistent across different soil types, with a sensitivity range from -50 mV/pH to -66 mV/pH and a high correlation coefficient ($R^2 > 0.97$) within a pH range of 3 to 9. Validation tests demonstrated an error rate of less than 10% between the sensor's measurements and reference pH values across multiple soil textures. A seven-day in situ study further confirmed the sensor's capability to monitor soil pH dynamically, maintaining an error rate below 10%. This advancement offers a practical solution for continuous soil pH monitoring, which is crucial for sustainable agriculture and soil health management (Eldeeb *et al.*, 2023). In addition, Maleki *et al.* (2010) study to design and develop a portable soil electrical conductivity (EC) detector to address agricultural challenges in Iran, such as soil salinity and arid climate conditions. The researchers developed a four-electrode EC detector comprising disk electrodes, a power source, a function generator, and a data acquisition unit. The device injects a constant electrical current into the soil through two electrodes, while the voltage drop is detected between the other two electrodes. This setup allows for rapid and reliable field-scale measurements of soil EC, which are essential for assessing soil salinity, cation exchange capacity, soil water content, and temperature. The portable nature of the detector facilitates on-the-go soil EC measurements, providing valuable data to improve agricultural yield and sustainability in regions with challenging soil conditions.

Soil properties vary primarily based on structure and composition rather than weather conditions. Additionally, the market for agricultural measurement

devices is highly competitive, resulting in more affordable and accessible solutions for farmers. However, excessively low-cost equipment may be ineffective in practice, leading to inaccurate measurements that negatively impact agricultural management. In the worst-case scenario, such inaccuracies could reduce crop yields or even cause plant mortality. Conversely, high-quality modern soil measurement equipment is often prohibitively expensive, making it difficult for farmers to justify the investment. Assessing the effectiveness of low-cost yet high-quality equipment as a viable alternative to expensive devices is crucial for informed decision-making. The transition from traditional to precision agriculture necessitates reliable soil monitoring tools. Furthermore, digital agriculture education plays a vital role in equipping farmers with knowledge about advanced tools and technologies. Comparing the efficiency and accuracy of various soil measurement devices is essential for selecting the most suitable solutions for farm management. Cost-effective and accessible technologies help farmers minimize reliance on expensive laboratory testing while ensuring precise soil monitoring. This study explores recent advancements in real-time soil monitoring and their implications for precision agriculture. By introducing innovative sensor-based measurement techniques, this research contributes to the evolution of smart farming, providing practical insights into cost-effective and efficient soil management strategies.

The purpose of this research is to develop and evaluate the effectiveness of advanced soil measurement technologies, particularly portable and sensor-based devices, in improving precision agriculture. This study aims to investigate the latest advancements in soil measurement technologies, including real-time monitoring using sensor-based systems; compare the accuracy and efficiency of portable meters with traditional laboratory-based testing methods; assess the impact of precise soil management on crop yield and overall soil health; and identify the cost-effectiveness and feasibility of implementing modern measurement tools for small- and large-scale farming operations. By addressing these objectives, this research contributes to the advancement of precision agriculture,

ensuring that farmers can adopt efficient, cost-effective, and scientifically validated soil management techniques.

2. Materials and Methods

The experimental planning process for comparative studies was conducted using digital agriculturist support tools by selecting the area and creating a map of the points where soil chemical values were measured, then statistically analyzing the data and creating a distribution map of soil chemical values. (Figure 1), including the YY-1033 soil pH meter (Figure 2a) and the A-2 measurement device (Figure 2b). In agricultural applications, puncture electrodes are specialized sensors designed to penetrate soil or plant tissues to facilitate direct measurement of various parameters. These electrodes ensure intimate contact with the sample, enhancing measurement accuracy. The YY-1033 soil pH meter is equipped with a puncture electrode, specifically a conical-tip pH electrode. This electrode design allows for seamless penetration into the soil, enabling direct pH measurement without the need for sample extraction. The device measures acid-

alkaline values in the range of 0.0–14.0, with a resolution of 0.1 and an accuracy of ± 0.1 . Additionally, it measures electrical conductivity (EC) values ranging from 0.00–20.00 mS/cm, with an accuracy of ± 0.1 . A notable feature of this device is its capability to connect via Bluetooth to mobile applications, enabling the recording of measurement data as electronic records. An example of a similar soil pH electrode is the HI12943, designed for direct soil measurement. It features a triple ceramic junction and a conical pH sensing tip made with low-temperature glass, making it suitable for various soil types (Seifi and Alimardani, 2010). In contrast, the A-2 measurement device employs an aluminum electrode, which is widely used in various electrochemical agricultural applications due to its high conductivity and effectiveness in processes such as electrocoagulation. Aluminum electrodes play a crucial role in wastewater treatment, soil nutrient sensing, and other agricultural practices. The A-2 device measures acid-alkaline values within a range of 3.5–9.0, with a resolution of 0.5 and an accuracy of ± 0.5 . Its EC measurement capability spans 0.00–20.00 mS/cm, with an accuracy of ± 0.1 .

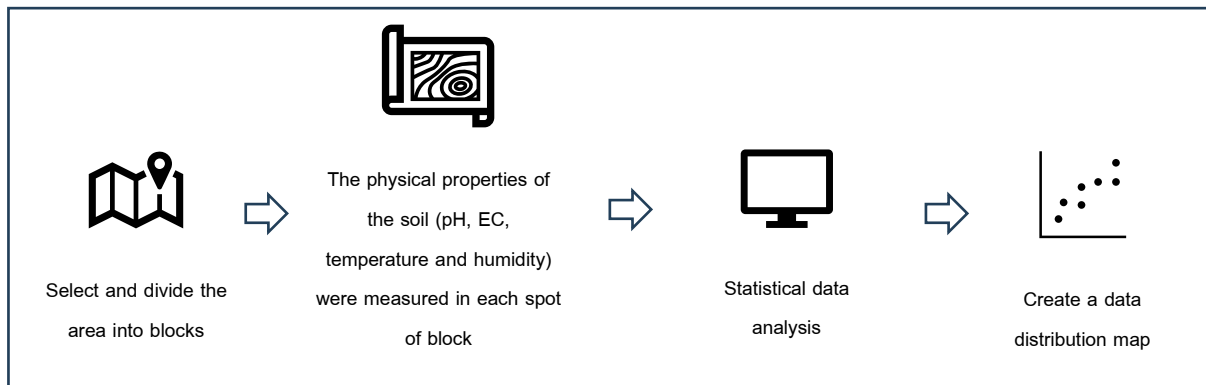


Figure 1 Experimental process diagram



(a)



(b)

Figure 2 Measuring tool type 1 YY-1033 Soil pH Meter (a) Measuring tool type 2 A-2 (b)

To conduct the study, experimental area was systematically surveyed using Geographic Information System (GIS) technology to ensure accurate spatial analysis. Measurement points were precisely defined, and the collected data were utilized to generate spatial distribution maps representing soil pH, electrical conductivity (EC), temperature, and moisture levels. The study was conducted in three designated areas within the premises of Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi Campus (Figure 3). The spatial distribution of soil quality parameters was analyzed to compare variations in measurement outputs between different soil quality assessment instruments.



Figure 3 The area for experiment area

A randomized complete block design (RCBD) was implemented to enhance the reliability and accuracy of the experiment. The experimental area was divided into three distinct blocks: Block 1 (blue), Block 2 (green), and Block 3 (red). Each block comprises a systematically randomized selection of measurement points, ensuring comprehensive coverage of 100 points per block. To distinguish between different soil chemical test points, specific symbols were assigned: crosses (X) for Block 1, triangles (▲) for Block 2, and circles (●) for Block 3. This classification facilitated clear identification and comparative analysis of soil chemical properties across the designated experimental blocks. The collected data were analyzed using descriptive statistics and one-way analysis of variance (ANOVA), followed by the Least Significant Difference (LSD) test at a 95% confidence level. The ANOVA was used to identify statistically significant differences in measurement accuracy and reliability between the two measurement devices. Furthermore, the analysis assessed the impact of these measurement devices on

agricultural decision-making and their perceived benefits among users. Additionally, ANOVA was utilized to evaluate the physical properties of soil (pH, EC, temperature, and moisture) concerning the use of different measurement technologies and their influence on farmers' decision-making processes. The data distribution was observed to be symmetrical, indicating the absence of skewness and reducing the potential for bias. The study considered two primary factors: Factor 1 (YY-1033 measurement device) and Factor 2 (A-2 measurement device). Data collection involved measuring pH, EC, temperature, and moisture levels using both devices, recording values, and subsequently analyzing them using ANOVA within the RCBD framework. The LSD test was applied for mean comparisons to determine significant differences. Finally, the measurement data were utilized to generate spatial distribution maps to facilitate comparative analysis. These maps will be used to assess soil suitability for cultivation and identify areas requiring soil quality improvement for future agricultural development.

3. Results and Discussion

The application of digital technology in soil measurement plays a crucial role in modern agricultural decision-making. The selection of appropriate measurement tools, which range from high-cost to more affordable options, has a significant impact on agricultural efficiency. This study evaluates the effectiveness of different soil measurement devices and their influence on key soil parameters, including pH, electrical conductivity (EC), temperature, and humidity. Additionally, the study examines the relationship between soil physical properties and spatial distribution using Geographic Information Systems (GIS).

The results of the Analysis of Variance (ANOVA) reveal significant differences in the measurements obtained from two distinct soil testing devices. Type 1 measuring tool, YY-1033 Soil pH Meter, recorded an average pH of 4.4, with a minimum of 3.9 and a maximum of 6.5. In contrast, the Type 2 measuring tool, A-2, recorded an average pH of 6.7, with a range from 6.5 to 7.0. These differences suggest that the tools measure pH differently, possibly due to

differences in calibration or sensitivity. (Figure 7) For EC, the Type 1 device recorded an average of 10.70 mS/cm, with a range of 10.44 to 11.01 mS/cm, whereas the Type 2 device measured an average EC of 7.54 mS/cm, ranging from 7.0 to 7.5 mS/cm. These results indicate a significant variation in EC readings between the two devices. (Figure 8) Regarding temperature and humidity measurements, both devices provided comparable readings. The average temperature

recorded by both devices was 27.9°C, with values ranging from 27.0 to 29.0°C. (Figure 9) Similarly, the humidity measurements showed minimal variation, with the Type 1 device recording an average humidity of 32.4%, ranging from 30.0% to 34.9%, while the Type 2 device measured a similar average of 32.4%, ranging from 30.0% to 35.0%. (Figure 10) Statistical analysis revealed no significant differences in temperature and humidity readings between the two tools. (Table 1)

Table 1 The average of measuring tools of physical properties of soil per block under different treatments

Parameter	Measuring Tool	ANOVA F-statistic	Block 1	Block 2	Block 3
pH	Type 1 measuring tool	7460.64	4.48±0.34*	4.43±0.29*	4.44±0.37*
	Type 2 measuring tool		6.71±0.24*	6.77±0.25*	6.78±0.25*
EC (mS/cm)	Type 1 measuring tool	178.51	10.43±0.44*	10.99±0.46*	10.70±0.45*
	Type 2 measuring tool		7.21±0.45*	7.79±0.51*	7.63±0.45*
Temperature (°C)	Type 1 measuring tool	0.229	27.95±0.57	28.02±0.60	27.99±0.63
	Type 2 measuring tool		28.08±0.87	27.96±0.80	27.80±0.80
Humidity (%)	Type 1 measuring tool	0.021	32.42±1.47	32.50±1.42	32.45±1.57
	Type 2 measuring tool		32.34±1.70	32.50±1.76	32.56±1.63

Mean value of measurements ± standard deviation

* different in a column are significantly different level ($p < 0.05$) according to randomized complete block design each block

Table 2 Least Significant Difference (LSD)

Parameter	LSD Value
pH	2.611*
EC (mS/cm)	3.626*
Temperature (°C)	0.195*
Humidity (%)	0.158*

* different in a column are significantly different level ($p < 0.05$)

Using a randomized complete block design (RCBD), it was found that the pH and EC measurements exhibited statistically significant differences between devices, whereas temperature and humidity did not show significant variation. The coefficient of determination (R^2) values for pH and EC were 0.930 and 0.911, respectively, indicating a strong correlation between device type and measurement accuracy. The Least Significant Difference (LSD) test further confirmed that pH and EC measurements differed significantly between devices, whereas temperature and humidity readings remained statistically similar. (Table 2)

Soil pH measurement tools vary in form and cost, with metal rod-based testers being popular due to their affordability. However, when compared to glass electrode pH meters, the latter exhibit greater accuracy due to their calibration with standard solutions in laboratory settings (Merl *et al.*, 2022). The Type 1 device, which utilizes glass electrode technology, demonstrated superior accuracy in pH measurement compared to Type 2. However, it requires careful handling, as impacts with soil particles can damage the fragile glass electrode (Steinegger *et al.*, 2020). The ability of the Type 1 device to record data via a mobile application enhances its suitability for precision agriculture as illustrated in Figure 4. The influence of soil pH on nutrient availability and plant health is well-documented (Staudinger *et al.*, 2019). The findings highlight the importance of selecting accurate measurement tools, as incorrect pH readings could lead to improper soil amendments, affecting crop yields. Meanwhile, temperature and humidity monitoring are essential for soil moisture management, but given the statistical similarity between devices, farmers may opt for more affordable tools for these parameters without compromising accuracy. Incorporating GIS and remote sensing enhances soil analysis, allowing farmers to visualize spatial variability and make data-driven decisions for soil management. The integration of Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) technologies has the potential to further refine precision agriculture, optimizing input use and improving sustainability. The adoption of automated irrigation systems based on real-time soil moisture data can enhance water use efficiency, minimizing resource

waste and increasing productivity. When comparing the pH and electrical conductivity (EC) values measured at various points within the block containing the tested plants using the Type 1 device (Figure 5), it was found that areas with pH and EC values suitable for the tested plant species exhibited superior growth. This was evident through characteristics such as dark green leaves, larger leaf size, overall plant vigor, and higher yields (Figure 6). However, for the Type 2 device, the measured values did not show significant differences, yet variations in plant growth were still observed. Therefore, selecting measuring equipment that is both cost-effective and efficient is crucial to prevent potential losses. Additionally, developing portable soil chemical measurement tools that provide accurate geolocation data at an affordable price will facilitate precise plot management and targeted interventions for problematic plants. This will ultimately help save time, reduce costs, and increase farmers' profits, contributing to the long-term sustainability of the agricultural sector.

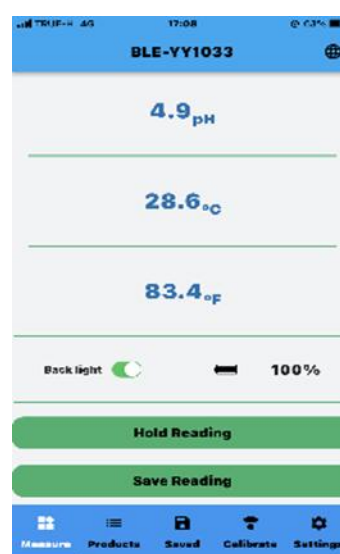


Figure 4 Measuring instrument application type 1
YY-1033 Soil pH Meter

While high-end soil measurement tools offer superior accuracy, their cost can be prohibitive for small-scale farmers. This study underscores the importance of cost-effective alternatives that balance affordability and accuracy. Devices priced low-cost devices (<200 baht) may lack the precision required for

effective soil management, while those costing between 500 and 1,000 baht may offer better reliability.

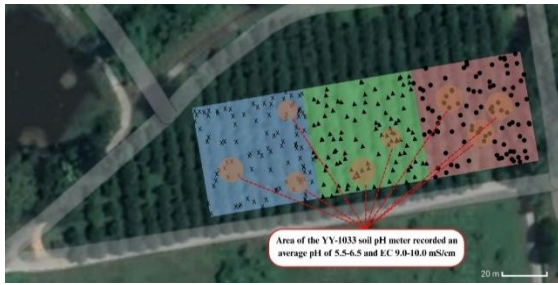


Figure 5 Area of Type 1 YY-1033 Soil pH Meter with pH and EC values suitable for plant growth



Figure 6 Differences in plant growth in areas tested for soil chemical properties

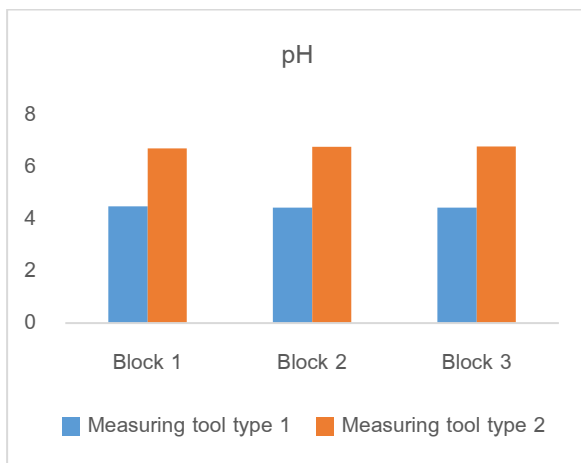


Figure 7 The average of pH under different treatments and area

Considering cost-effectiveness, this study emphasizes the need for further research on soil measurement tools across different price ranges. Farmers require affordable yet reliable devices to make informed decisions. The use of low-cost, uncertified foreign devices poses a risk of inaccurate data collection, leading to potential mismanagement of soil

conditions. In light of climate change and the need for rapid soil assessment, investment in cost-effective, high-accuracy tools is crucial for modern agricultural sustainability. The findings align with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly in climate resilience, food security, and resource-efficient farming practices. Ultimately, the balance between cost and accuracy should guide the selection of soil measurement tools. While high-end devices provide superior accuracy, economical alternatives that maintain reasonable precision can offer significant benefits for small-scale farmers. Future studies should explore the long-term cost-effectiveness of these tools and assess the feasibility of integrating digital soil mapping technologies to support sustainable agriculture.

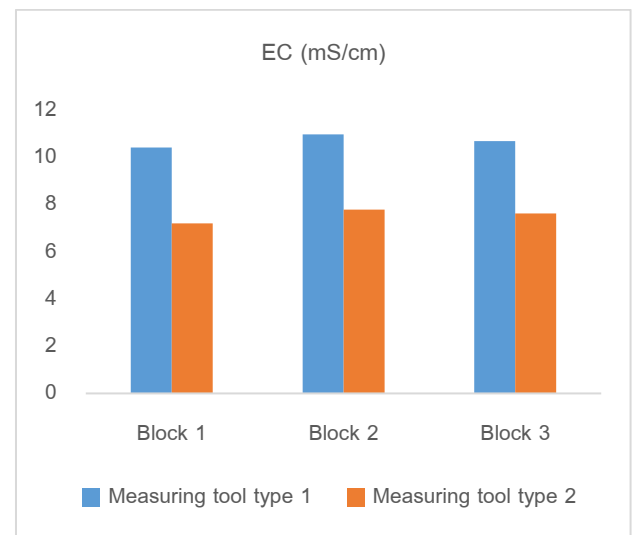


Figure 8 The average of EC under different treatments and area

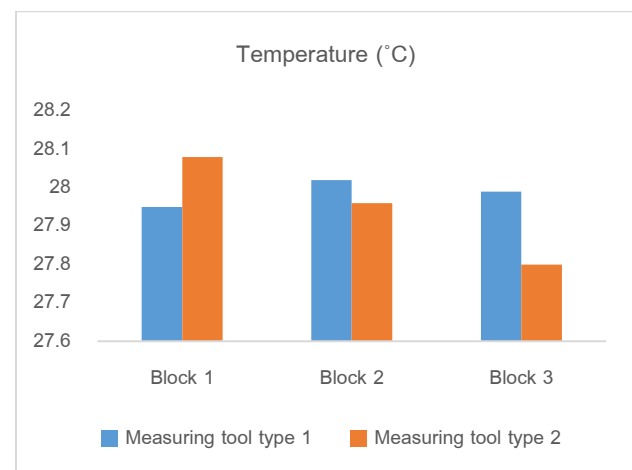


Figure 9 The average of temperature under different treatments and area

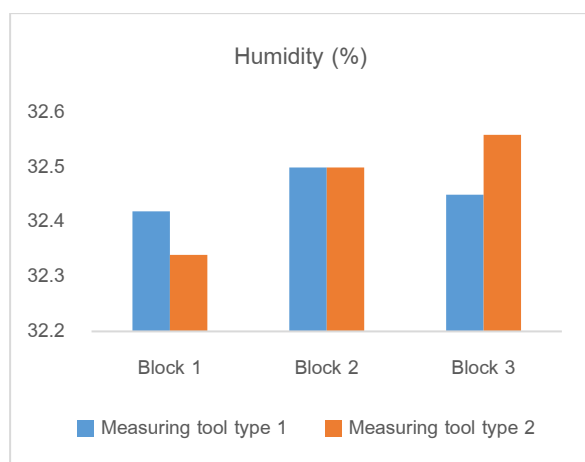


Figure 10 The average of humidity under different treatments and area

4. Conclusion

Selecting appropriate soil measurement tools is a critical factor in achieving sustainable agricultural development. The study findings indicate that while both tested devices provide reliable temperature and humidity readings, there are notable differences in pH and electrical conductivity (EC) measurements. The Type 1 YY-1033 Soil pH Meter demonstrates superior accuracy and additional functionalities, making it a more suitable choice for precision soil analysis. However, the decision to adopt specific measurement tools must balance economic feasibility with accuracy to ensure optimal agricultural applications. The integration of digital technologies, including Geographic Information Systems (GIS) and AI-driven soil monitoring, holds great potential for transforming agricultural management. Investing in efficient and precise measurement tools can enhance soil management practices, reduce input costs, and contribute to sustainable farming in alignment with global climate resilience and food security objectives. To further support informed decision-making in the agricultural sector, future studies should explore the long-term cost-effectiveness and reliability of soil measurement tools. Additionally, developing portable soil chemical analysis devices with accurate geolocation capabilities at an affordable price would enable more precise plot management and targeted interventions for problematic plants. This advancement will ultimately help farmers optimize resources, save

time, reduce costs, and increase profitability, thereby fostering long-term sustainability in agriculture.

5. References

- Butraphon, S. 2019. Importance and measurement of soil pH. **Kasetsart Agriculture Journal** 5(25): 33-36. (in Thai)
- Cao, H., Chen, R., Wang, L., Jiang, L., Yang, F., Zheng, S., Wang, G. and Lin, X. 2016. Soil pH, total phosphorus, climate and distance are the major factors influencing microbial activity at a regional spatial scale. **Scientific Reports** 6: 1-10.
- Eldeeb, M., Espinoza, C. and Atashbar, M.Z. 2023. Espial: Electrochemical soil pH sensor for in situ real-time monitoring. **Micromachines** 14(12): 2188.
- Everhart, E. 1994. **Department of Horticulture**. IOWA State University.
- Fierer, N. and Jackson, R.B. 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 103: 626-631.
- Maleki, M.R., Abbaspour-Gilandeh, Y. and Hemmat, A. 2010. Design and development of a portable soil electrical conductivity detector. **Sensors & Actuators A: Physical** 162(2): 261-267.
- Merl, T., Rasmussen, M.R., Koch, L.R., Søndergaard, J.V., Bust, F.F. and Koren, K. 2022. Measuring soil pH at in situ like conditions using optical pH sensors (pH-optodes). **Soil Biology and Biochemistry** 175: 108862.
- Rousk, J., Bååth, E., Brookes, P.C., Lauber, C.L., Lozupone, C., Caporaso, J.G., Knight, R. and Fierer, N. 2010. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. **The ISME Journal** 4: 1340-1351.
- Seifi, M.R. and Alimardani, R. 2010. Design and development of a portable soil electrical conductivity detector. **International Journal of Agriculture and Biology** 12(6): 964-968.

- Slessarev, E.W., Lin, Y., Bingham, N.L., Johnson, J.E., Dai, Y., Schimel, J.P. and Chadwick, O.A. 2016. Water balance creates a threshold in soil pH at the global scale. **Nature** 540(7634): 567-569.
- Staudinger, C., Strobl, M., Breininger, J., Klimant, I. and Borisov, S.M. 2019. Fast and stable optical pH sensor materials for oceanographic applications. **Sensors and Actuators, B: Chemical** 282: 204-217.
- Steinegger, A., Wolfbeis, O.S. and Borisov, S.M. 2020. Optical sensing and imaging of pH values: spectroscopies, materials, and applications. **Chemical Reviews** 120: 12357-12489.
- Tecon, R. and Or, D. 2017. Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. **FEMS Microbiology Reviews** 41: 599-623.
- Yuzhakov, M.S., Filchenko, D.I., Bad'in A.V. and Berzin A.K. 2021. Galvanic pH sensor for continuous monitoring of soil parameters in agriculture. **Journal of Physics Conference Series** 2140: 012023.



Research Article

Developing a Fish Tank Management System via an Online Application

Wanpracha Nuansoi, Pichet Suwannoo and Supachai Maduea *

Department of Industrial, Rattaphum College, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Rattaphum, Songkhla 90180, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2025-01-12

Revised: 2025-04-08

Accepted: 2025-04-11

Keywords:

fish tank;

application;

flutter

Fish tank owners often face challenges in maintaining optimal environmental conditions due to time constraints and a lack of real-time monitoring tools. To address this, our research team developed an online fish tank management application with two key objectives: 1) to design an efficient management system and 2) to evaluate its performance. Developed using Flutter for compatibility with both Android and iOS, the system supports automatic and manual control modes. In automatic mode, users can configure pH and turbidity levels based on specific fish requirements, while manual mode allows direct control over feeding, lighting, and water filtration. The system integrates micro-controllers to gather real-time data from turbidity, pH, and temperature sensors, transmitting this information to ThingSpeak cloud for storage and analysis. The application provides graphical data visualization and facilitates remote control by sending commands through Firebase cloud to the micro-controller, which then operates connected devices via relay modules. Performance evaluations confirmed the system's reliability, with command response tests conducted over 100 trials yielding the following average latency times: 1) LED Activation: 2.86 seconds | Deactivation: 2.72 seconds; 2) Feeding System Activation: 2.61 seconds | Deactivation: 2.78 seconds; and 3) Timer-Based Feeding Operations: 2.42 seconds. This innovative system enables fish tank owners to remotely monitor and manage environmental conditions, significantly reducing maintenance time while ensuring continuous monitoring for improved aquatic life management.

© 2025 Nuansoi, W., Suwannoo, P. and Maduea, S. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

Keeping aquarium fish or ornamental fish is a popular hobby in Thailand. This is because ornamental fish have a variety of colors and shapes, can be kept in a limited space, and help create a refreshing atmosphere in the house. The ornamental fish business in Thailand is important both economically and culturally. Thailand is one of the world's leading ornamental fish exporters, with a global market share of approximately 7.38% and an export value of more than 700 million baht per year (Prachachat Business,

2023). The main problems that aquarium fish farmers encounter are: lack of time to take care of the fish, inconsistent feeding of the fish, deteriorating water quality, and short-lived fish due to improper care (Chen *et al.*, 2023; Obma *et al.*, 2023). Some water properties affect fish farming, such as acidity, alkalinity, ammonia accumulation, etc. (Ikhlaq *et al.*, 2025). If aquarium fish are not managed well, the fish will easily get sick, grow slowly, and may die (Santoso and Panuntun, 2024).

Currently, there is IoT technology that can control various devices via the Internet using a single

* Corresponding author.

E-mail address: supachai.m@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Nuansoi, W., Suwannoo, P. and Maduea, S. 2025. Developing a Fish Tank Management System via an Online Application. *Recent Science and Technology* 17(2): 265957.

mobile phone, making life more convenient. IoT technology (Phumcharoen and Ploywattanawong, 2022) defines it as an environment consisting of all things that can communicate and connect with each other through both wired and wireless communication protocols. All things have a way to identify themselves, recognize the context of their environment, and interact and work together. If IoT technology is applied to control the aquarium, it will solve the problem. There is research (Mulyana *et al.*, 2023; Pangerd and Duangsai, 2023) that has developed an automatic aquarium controller using IoT. The system could feed fish, measure pH, measure temperature, control and command via the Blynk application. The highlight of these two research projects is the use of the easy-to-use Blynk application. Research (Obma *et al.*, 2023) has presented the improvement of water quality and monitoring of water conditions for ornamental aquariums using IoT technology. The system has the following capabilities: measuring water temperature, measuring water pH, having a web application for using the system, and having MySQL as a database. If the temperature is high, the system will command the fan to work. If the temperature is lower than the specified value, it will send the heater to work. The highlight of this research is that it controls the water temperature. Research (Santoso and Panuntun, 2024) has presented an automatic control and monitoring system for water quality in goldfish tanks using Fuzzy Logic Controller (FLC) to control the turbidity and pH of the water in the aquarium. There is a website for viewing water quality values in real time. The highlight of this research is the use of FLC to control water quality. Research (Suranata *et al.*, 2024) has presented the design of an ornamental aquarium management system using IoT technology to monitor water conditions. It is possible to track pH and water temperature through ThingsBoard. The highlight of this research is the real-time tracking of water conditions. Research (Widyati *et al.*, 2025) has proposed an automatic fish feeding and temperature control system in aquariums based on IoT technology. Data is sent via MQTT protocol. It is controlled and displayed via Node-RED. The highlight is the control and command via Node-RED.

From the above problems and the review of related research, the research team has an idea to develop an online aquarium management system application. The system can track the status of the environment in real time, namely water temperature, water pH, and water turbidity. It can control fish feeding, water filtration, and turn on and off LED lights automatically, making the lives of fish farmers easier, especially the elderly or those with limited time. The highlight of this research is the design and development of an application that stores data on the NoSQL cloud system in real time and has a water filtration system to extend the water change time. The appropriate water environment for raising each type of fish is not the same. But in this research, it is the environment for raising goldfish. The factors are as follows: pH 7.0-8.6, water turbidity less than 5 (Ikhlaiq *et al.*, 2025), temperature 24-30 degrees, and red light (Noureldin *et al.*, 2021). If raising other types of fish, the conditions can be adjusted as needed. The application will be developed using Flutter, which is a framework used to create a user interface for creating mobile applications that can work across platforms, both iOS and Android, at the same time. The language used in Flutter is dart, which was developed by Google. Importantly, it is open source and can be used for free (Mamoun *et al.*, 2020; Kohprasert and Adsavakulchai, 2024). Data storage in the system uses the cloud system as a medium for sending and receiving data over the Internet that does not store structured data.

2. Materials and Methods

2.1 Research Scope

The system operates in two modes of operation: manual control mode and automatic mode. Users can control the feeding system, turn LED lights on and off, and view the water pH sensor, water turbidity and water temperature graphs. As for the automatic mode, the user can set the pH and turbidity of the water according to the fish raised. Once the setup is complete, the system will automatically run, and you can view the pH value, water turbidity value, and water temperature graph.

2.2 Developing a Fish Tank Management System via an Online Application using System Development Life Cycle (SDLC) in Waterfall Model.

SDLC is a process for developing and managing information systems that have clear steps, are of high quality, meet user needs, and can be maintained in the long term (Pinchunsri *et al.*, 2019). The Waterfall Model is a sequential system development process where each step must be completed before proceeding to the next step (Maulana *et al.*, 2021).

2.2.1 Requirement Analysis

From the survey on aquarium fish farming problems, it was found that the problems are caused by the need for human labor to feed, turn on and off the lights, change the water, take care of the fish, forget to feed them, and have no free time to change the water. When there is no time to change the water, the substances excreted from the fish will have ammonia and nitrite that accumulate in the water too much,

causing the water to have an unsuitable value for fish farming. Another problem is the temperature in the water that is not suitable for fish farming. The temperature must be monitored and always controlled. If the temperature is not suitable, it may affect the fish, causing them to grow slowly and have pale colors.

2.2.2 System design

2.2.2.1 System Operation Flowchart

From figure 1, start the system with use the login system to sign in and the login password is incorrect, user will need to log in to the system again. If correct, it will enter the selection of the operating mode. There are 2 modes: manual control mode and automatic mode. If user select the control mode, user can control the feeding system, filter the water, and turn the light on and off. If auto mode is selected, the pH and turbidity of the water can be set. After that, user can view the water turbidity graph, pH graph, and water temperature graph.

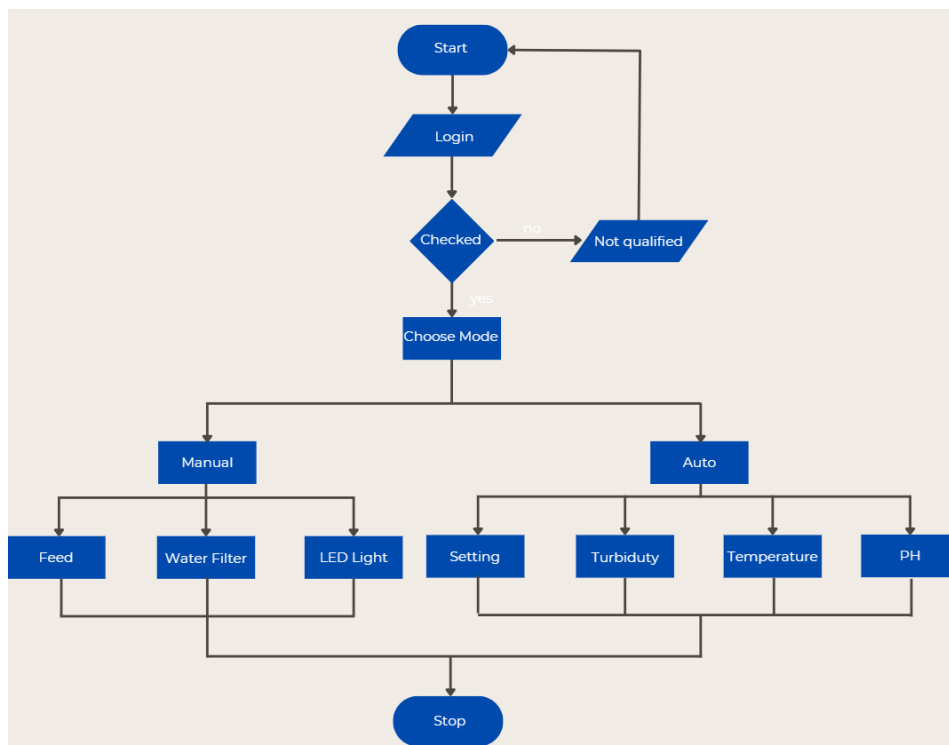


Figure 1 System Operation Flowchart

2.2.2.2 System Overview Design

From figure 2, it consists of 3 parts: application, cloud system and control part. The application receives data from the pH sensor, turbidity sensor and water temperature from ThingSpeak cloud system via the Internet to display the data on the application. The application sends data to control the on/off the water pump and LED lights to the Firebase cloud system via the Internet. The control part consists of 2 microcontrollers, Arduino Wemos and Arduino

UNO. Because Arduino Wemos has only 1 analog input port, which is not enough for the turbidity sensor and pH sensor that both require analog input, and to share the load of Arduino Wemos, both boards transmit data to each other in serial. Arduino Wemos receives the pH sensor, turbidity sensor and temperature sensor values and then sends data to the ThingSpeak cloud system via the Internet and retrieves data from the Firebase cloud system (Huanthanom *et al.*, 2020) to control the water pump and LED lights via relay. The working status will be notified via the Line application.

Table 1 shows the details of the devices.

Sections	Devices	Details
Input	pH Sensor	-pH measurement range: 0 to 14 -Accuracy: ± 0.1 pH at 25 °C
	Turbidity sensor	- Measuring Range: 0 – 1000 NTU -Accuracy: $\pm 5\%$ FS
	Temperature sensor	-Temperature measurement range: -55°C to +125°C -Accuracy: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ in the range of -10°C to +85°C
Output	LCD	- Display 20 characters per line, 4 lines - Communication interface: I2C
	Relay	-4-channel relay -Maximum voltage and current 250V AC at 10A, 30V DC at 10A
	Pump	-Voltage: 12V DC -Flow rate 10L/min
	LED	-Voltage: 12V DC
	Micro servo	-Torque 1.2-1.4 kg/cm (4.8V) -Rotation 0-180 degrees

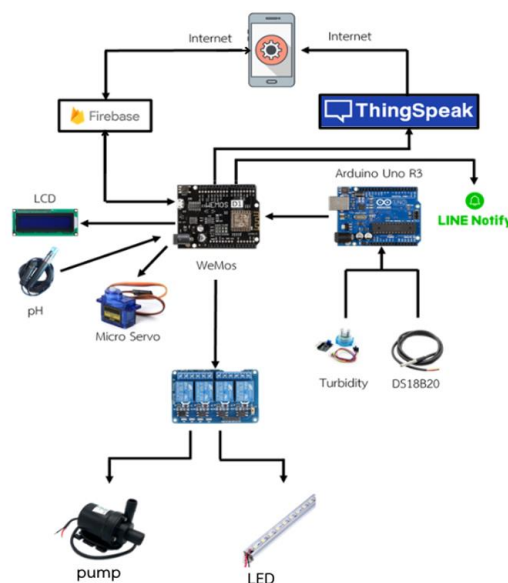


Figure 2 System Overview Design

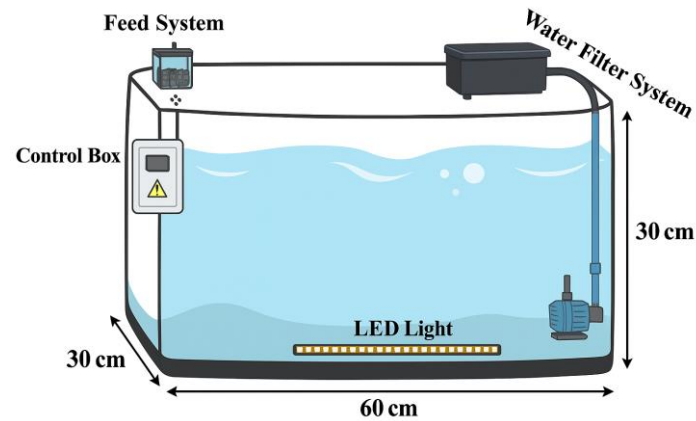


Figure 3 Fish tank structural design

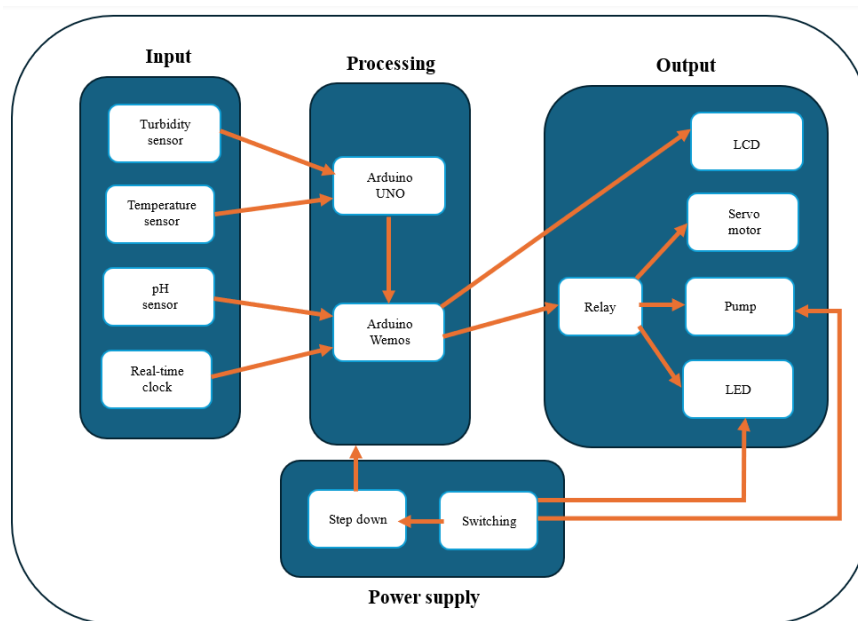


Figure 4 Hardware Design

The design of the aquarium structure consists of 4 parts: the control box is installed on the side of the aquarium, the fish feeding system is on the top left side of the aquarium, then the water filter system consists of a water pump that sucks water up to the water filter and releases water back into the aquarium, and finally the LED light is on the bottom of the aquarium, as shown in Figure 3.

2.2.2.3 Hardware Design

From figure 4, the input part consists of turbidity sensor, temperature, pH and real time clock.

Next is the processing part, consisting of Arduino UNO and Arduino Wemos. The output part consists of LCD, relay, servo motor, pump and LED. The last part is the power supply part, consisting of switching power supply and step down. The power supply part is 12 Volt, connected to the step down to reduce the voltage to 5 volts to supply power to the entire circuit, except for the LED and pump, which receive 12 Volt electricity directly from switching.

2.2.2.4 Design of working conditions in automatic mode

Table 2 Working conditions in automatic mode

Conditions	Filter pump	LED lights	Feeding fish	Line notification
PH < 7				
PH > 8.6				
Turbidity > 5				
9:00 a.m.				
5:00 p.m.				
Temperature > 30				
temperature < 24				

The experimental conditions were the same as those used in goldfish farming. When the pH value was less than 7.0, the system would turn on the filter pump. If the pH value was greater than 8.60 (Ikhlaq *et al.*, 2025), the system would also turn on the filter pump. Both conditions worked to keep the pH in the appropriate range. The next condition, if the water turbidity was greater than 5 (Santoso and Panuntun, 2024), the system would turn on the filter pump to make the water clearer. Fish feeding was given at a rate of 1.8 grams, or 2% of the fish's weight (Ali *et al.*, 2025), at 9:00 a.m. and 5:00 p.m. The system would feed the fish and turn on the LED lights, which stimulated the growth of goldfish and helped to darken the color of the fish. Finally, the notification section via the LINE application would notify all operating conditions.

2.2.3 System development

In the development of the application, it was developed using Flutter to develop, making it usable for both Android and iOS. The database uses Firebase Realtime Database as a medium to communicate with the hardware. It uses Arduino Wemos and Arduino Uno as microcontrollers to control and command various hardware. Wemos reads values from Firebase to command various parts and also acts to send sensor values to the Thingspeak cloud to store sensor values in the system. The application will then retrieve data from Thingspeak to display on the mobile application.

2.2.4 System Testing

After the system development is complete, the system usage is tested in the hardware section first.

Then, the application is tested with the Firebase cloud system and Thingspeak cloud system. Finally, the overall system is tested. When the system is complete, the operation of various systems is tested.

2.2.5 Maintenance

When the system is in use, various problems are brought to further develop and improve the system.

2.3 System Efficiency Testing

A plan was put in place to test the operation of various systems in automatic mode, namely the water filtration system, feeding system, LED lighting system, and notifications, according to the set conditions for 7 days to find the average value of pH, turbidity, and temperature. Then, the delay in ordering the operation of various systems in manual mode was tested. The test was performed by timing the time from ordering until the operation occurred 100 times to find the average value and standard deviation. The tests were as follows: average time for ordering food, average time for setting the feeding time, and average time for ordering the LED lights to turn on and off.

3. Results and Discussion

The development of the fish tank management system via the online application at the fish tank consists of a fish feeding system, an LED light on/off system, a water filter system, and a notification system via the Line application. The LCD screen shows the operation of the fish tank, showing the status of the operating mode, internet connection, temperature,

water turbidity and the set turbidity, water pH, and the set pH.

From figure 5a is the application to log in to the system. The user enters email and password to log in, which the system will check with the email registered in Firebase Authentication. If correct, it will go to the application page for selecting the working mode. It can select either Auto or Manual mode. On this application page, it will display the pH value, turbidity value, and water temperature as shown in figure 5b. When the working mode is selected, a graph showing the pH

value, turbidity value, and water temperature can be viewed as shown in figure 5c

From figure 6, it is working in Manual mode. The user can control the operation as follows: control the LED lights to turn on and off, control the water filter, and control the fish feeding. Before controlling the operation, the system will display the status of each system. There is also a notification of the operation via the Line application, another channel for checking the operation of the fish tank.

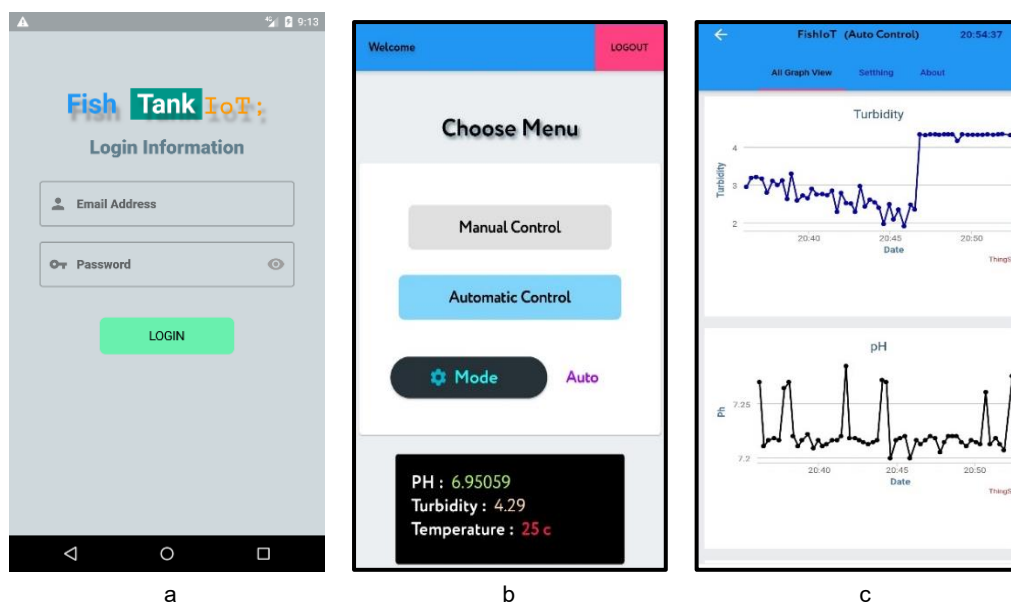


Figure 5 Application login page, select operating mode, and display sensor value graph

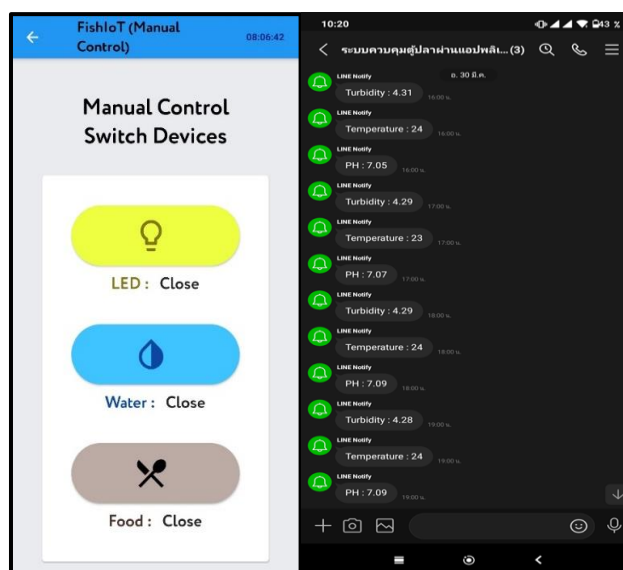


Figure 6 Working in Manual mode and notification of work via LINE application

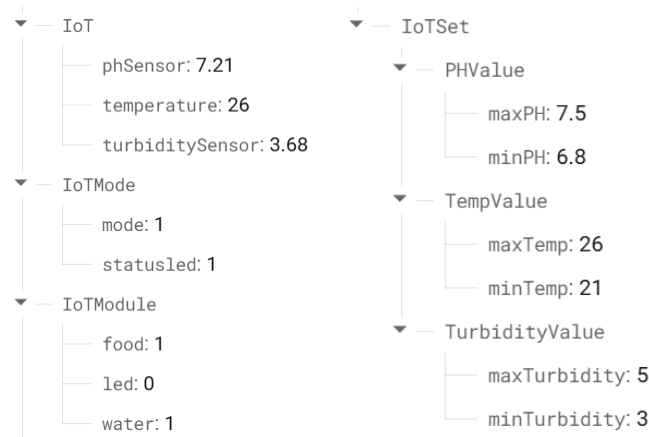


Figure 7 Storing Work Data in Firebase Cloud

Table 3 Test operation in automatic mode

Day	PH	Turbidity (NTU)	Temperature (°c)	Feeding	Water filter	LED light	Notification
1	7.45(0.08)	3.65(0.21)	25.80(0.50)				
2	7.40(0.06)	3.90(0.25)	25.35(0.20)				
3	7.32(0.09)	4.10(0.16)	25.12(0.27)				
4	7.25(0.09)	4.40(0.24)	24.78(0.38)				
5	7.08(0.17)	4.78(0.31)	25.35(0.33)				
6	6.86(0.15)	4.90(0.19)	24.23(0.43)				
7	7.10(0.14)	4.50(0.38)	25.55(0.37)				

From figure 7, it is collecting working data in the Firebase cloud, with the following values stored: in IoT, the sensor values are stored: PH, temperature, and water turbidity. In the IoTMode section, the operation mode and status of the LED are stored. In the IoTModule section, the status of commands, feeding, turning on/off the LED lights, and filtering water are stored. Finally, in the IoTSet section, it is set in automatic mode, with settings for pH, temperature, and water turbidity in the appropriate range.

3.1 Evaluation results of the system

3.1.1 Test operation in automatic mode

The automatic mode operation was tested for 1 week, which is consistent with the research (Chen *et al.*, 2023; Pangerd and Duangsai, 2023) that tested the system for 1 week. In our research, the specified conditions for automatic mode were used, namely, if the pH is less than 7.0 or the pH is more than 8.6, the water filtration system will work. As for the turbidity of

the water, if it is more than 5.00, the water filtration system will work. The feeding system and the LED light system will work according to the time. From the experimental results, all systems worked as set. On the 6th day, the pH value was less than 7.0, which is 6.86, causing the water filtration system to work. As a result, on the 7th day, the pH value increased to 7.10 and the turbidity was also good. Causing the water filtration system to stop working, this is consistent with the research of (Santoso and Panuntun, 2024). When the water filtration system is used, the pH value will improve, and the turbidity will also improve.

3.1.2 LED on/off delay test

Tested the on/off command via the application 100 times for the average latency of the command. This is consistent with the research (Pangerd and Duangsai, 2023) on automated aquarium controller with IoT, which tested the efficiency of the fish feeding system 100 times. In our research, the experimental results were recorded as a graph chart to compare the latency of

the on/off. From the chart in figure 8, the blue graph is the on/off command, with an average latency of 2.86 seconds, a standard deviation of 0.26, the highest latency of 3.10 seconds, and the lowest latency of 2.10 seconds. The red graph is the off command, with an average latency of 2.72 seconds, a standard deviation of 0.31, the highest latency of 3.30 seconds, and the lowest latency of 2.31 seconds. This is consistent with the research (Romin *et al.*, 2024) on the mobile application for borrowing and returning medical equipment. The medical equipment borrowing application uses the firebase cloud to store data and can link all data in real-time.

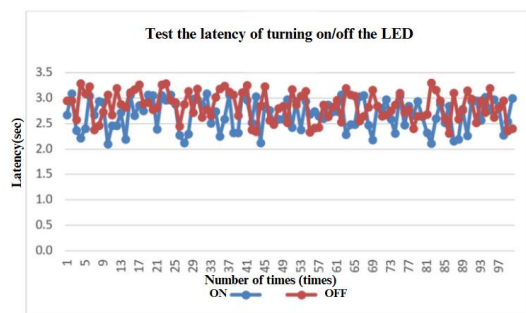


Figure 8 Graph showing the LED on/off delay test

3.1.3 Testing the delay of the opening/closing of the feeding system

Test the on/off command via the application 100 times. Record the experimental results as a graph chart to compare the delay of the on/off. From figure 9, the blue graph is the on/off command. The average delay is 2.61 seconds, with a standard deviation of 0.30. The maximum delay is 3.20 seconds, and the minimum delay is 2.11 seconds. The red graph is the off/on command. The average delay is 2.78 seconds, with a standard deviation of 0.32. The maximum delay is 3.28 seconds, and the minimum delay is 2.30 seconds. The factor affecting the delay in the system command depends on the speed of the internet. If the internet has high speed, it will result in a high speed of commands, resulting in reduced latency.

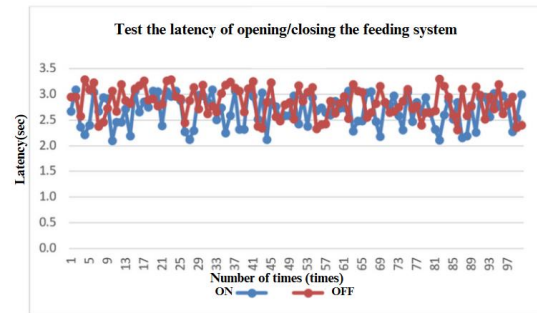


Figure 9 Graph showing the feeding system on/off delay test

3.1.4 Testing the delay of the feeding system on/off timer

From figure 10, test the timing to turn on/off the feeding system by sending values from the application to Firebase. Then Wemos retrieves the values and compares them. When it matches the set time, turn it on/off as ordered. Test 100 times and record the experimental results. The average delay is 2.42 seconds with a standard deviation of 0.25. The maximum delay is 2.90 seconds, and the minimum delay is 1.90 seconds.

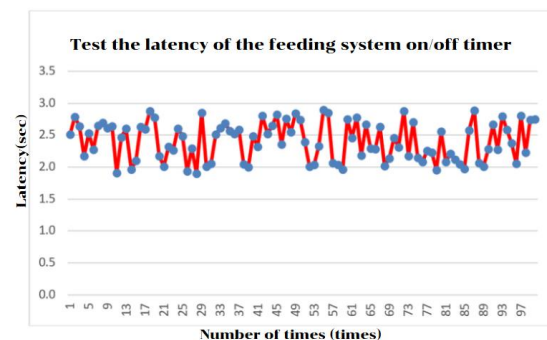


Figure 10 The graph shows the test time of the feeding system on/off timer

4. Conclusion

The development of the online fish tank management system application could work in 2 modes: manual mode and automatic mode. In the manual mode, it can control the on/off LED lights, change water, and feed. In the automatic mode, it can set the temperature, turbidity, and pH value. The application development uses Flutter, which can be used on both Android and iOS operating systems. It stores data in 2 cloud systems: Firebase cloud, which

stores command data and immediate data, which are temperature sensor values, water turbidity, and water pH values. The Thingspeak cloud system stores sensor values similar to the Firebase cloud, but it is non-immediate data. This data is displayed as a graph in the application. In terms of hardware, Arduino Wemos and Arduino UNO are used as microcontrollers working together. Wemos read values and sends them to the Firebase cloud and sends sensor values to the Thingspeak cloud, which then processes and commands the various parts. In terms of performance testing the test of 100 times of command delay, the test result of the delay of LED on/off command has an average of 2.86 and 2.72 seconds, respectively. The test result of the delay of the feeding system on/off command has an average of 2.61 and 2.78 seconds, respectively. And the test result of the delay of setting the time to turn on/off the feeding system has an average of 2.42 seconds. The development of this system is beneficial to aquarium fish farmers in reducing the time spent on care, control, and monitoring via online systems, resulting in farmers' income, reducing costs, and increasing profits, moving towards precision agriculture.

5. Acknowledgments

This research was successfully completed. We would like to thank the Research Review Committee, Rattaphum College, Rajamangala University of Technology Srivijaya, and research assistants Mr. Somnuek Hantawanno and Mr. Narongsak Yeemareb. Finally, the research team would like to thank Rajamangala University of Technology Srivijaya for providing the budget and income to support this research.

6. References

- Ali, Z., Sher, N., Muhammad, I., Nayab, G.E., Alouffi, A., Almutairi, M.M., Khan, I. and Ali, A. 2025. The combined effect of cadmium and copper induces bioaccumulation, and toxicity and disrupts the antioxidant enzymatic activities of goldfish (*Carassius auratus*). **Toxicology Reports** 14: 101972.
- Chen, P., Song, Q., Hong, K., Liu, W., Xiao, W. and Chen, S. 2023. Design of integrated smart aquarium, pp. 3122-3125. *In* **2023 China Automation Congress (CAC)**. IEEE, Penghu, Taiwan.
- Huanthanom, C., Saladkaew, N. and Chunwiphat, S. 2020. A Development of New E-commerce Platform for Product Preordering. **The Journal of Industrial Technology** 16(1): 1-14. (in Thai)
- Ikhlaq, A., Kanwal, M., Rizvi, O.S., Ramzan, N., Akram, A., Qazi, U.Y., Qi, F., UI Hassan, S. and Javaid, R. 2025. Decontamination of fish aquarium wastewater by ozonation catalyzed by multi-metal loaded activated carbons for sustainable aquaculture. **Process Safety and Environmental Protection** 193: 374-384.
- Kohprasert, W. and Adsavakulchai, S. 2024. Mobile Application Platform for Tour Guide Recommendation. **Rom Yoong Thong Journal** 2(3): 16-36. (in Thai)
- Mamoun, R., Nasor, M. and Abulikailik, S.H. 2020. Design and development of mobile healthcare application prototype using Flutter, pp. 1-6. *In* **2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)**. IEEE, Khartoum, Sudan.
- Maulana, F.I., Susanto, V., Shilo, P., Gunawan, J., Pangestu, G. and Budi Raharja, D.R. 2021. Design and Development of Website Dr. Changkitchen Diet Catering Using SDLC Waterfall Model, pp. 75-79. *In* **Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET '21)**. ACM, Malang Indonesia.
- Mulyana, E., Dzikirrahman, M., Ridwan, A.M., Halim, I. A., Yulianti, A.Y. and Hilmi, F. 2023. Goldfish aquarium automation and monitoring based on Internet of Things, pp. 1-6. *In* **2023 9th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)**. IEEE, Solo, Indonesia.
- Noureldin, S.M., Diab, A.M., Salah, A.S. and Mohamed, R.A. 2021. Effect of different monochromatic

- LED light colors on growth performance, behavior, immune-physiological responses of goldfish, *Carassius auratus*. **Aquaculture** 538: 736532.
- Obma, J. , Promsangming, P. , Angkawisittpan. , N. , Nuan-on, A. and Sonasang, S. 2023. Water quality improvement for ornamental fish tank using IoT technology. **Journal of Engineering and Innovation** 16(1): 26-33. (in Thai)
- Pangerd, S. and Duangsai, S. 2023. Automated aquarium controller with IoT. **UTK Research Journal** 17(1): 60-68. (in Thai)
- Phumcharoen, J. and Ploywattanawong, L. 2022. The IoT Technology for Control the Earthworm Culture Environment. **KKU Research Journal (Graduate Studies)** 22(1): 145-155. (in Thai)
- Pinchunsri, P. , Chantaradara, T. , Choisang, Y. , Khosinprasurt, T. and Buasan, D. 2019. Development of information program for assets management at a private university in Nakhon Pathom Province. **Christian University Journal** 25(2): 79-91. (in Thai)
- Prachachat Business. 2023. **Revealing the list of 5 beautiful fish species that bring in good income, are exported and are famous all over the world.** Available Source: <https://www.prachachat.net/economy/news-1441890>, December 27, 2024.
- Romin, P. , Jinda, Y. , Kamolwet. , P. Channawon, S. and Sammaphan, U. 2024. Medical Equipment Loan Mobile Application. **Journal of Applied Research and Development by ECTI Association** 4(3): 1-10. (in Thai)
- Santoso, B. and Panuntun, W.D. 2024. Goldfish aquarium water quality control and monitoring system using fuzzy logic controller (FLC). **Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah** 18(2): 96-104.
- Suranata, I.W.A., Paramartha, I.G.N.D., Wiguna, I.K.A., Gama, A.W.O., Indrawan, G. and Divayana, D.G.H. 2024. IoT design of ornamental fish aquarium management could monitor water conditions, pp. 189-194. *In* **2024 4th International Conference of Science and Information Technology in Smart Administration (ICSINTESA)**. IEEE, Balikpapan, Indonesia.
- Widyati, M.A.S., Anshori, Y., Lamasitudju, C.A.R., Laila, R. and Joeffie, Y.Y. 2025. Automatic fish feeding and temperature control system for aquariums based on Internet of Things (IoT). **Journal of Applied Informatics and Computing** 9(1): 146-152.



Research Article

Establishment of an Application for Student Activity Attendance at a Community College Using a Digital Identity Methodology

Werachart Muttitanon, Chumpol Mokarat^{*} and Saowakhon Nookhao

Department of Information Technology, Faculty of Business Administration and Information Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok: Chakrabongse Bhuvanath, Din Daeng, Bangkok 10400, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-10-30

Revised: 2025-02-21

Accepted: 2025-03-03

Keywords:

activity attendance application;

digital Identity;

OAuth 2.0

This article presents the design and development of an application for student activity attendance at a community college using a digital identity methodology. The objective of this research is to facilitate the development of an application that leverages digital identity methodologies to streamline activity attendance tracking and enhance participant monitoring and reporting processes. That can assist community college instructors by allowing students to participate in attendance at activities and control their training and education through various types of flexible courses. The proposed application is a web application that incorporates responsive web design to ensure web pages render seamlessly on mobile devices. It utilizes server-side services powered by NodeJS programming, a Firebase database for data storage, and an interface driven by the React framework. We implemented OAuth 2.0 as a standard for user authentication and access to Google services to simplify working with system security. During the OAuth 2.0 user authentication evaluation it was discovered that testing 50 experiments users to test student activity registration, with five activities per person and each user contributing the response time, produced the desired results. The distance verification process had the longest testing duration, with completion times varying significantly depending on the user devices. On the other hand, the logout process consistently showed the shortest completion times. In addition, the findings from the users' evaluations of the system's use showed that the average score, as indicated by the evaluation, was very high ($\bar{X}=4.72$, $SD=0.39$). In general, the majority agreed that the newly implemented approach was more practical and efficient than the previous recording approach.

© 2025 Muttitanon, W., Mokarat, C. and Nookhao, S. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

Information technology management plays a crucial role in the information operations of both public and private organizations. Various systems have integrated digital authentication models, such as the Digital Signature (The Bureau of Registration Administration, 2024). Examples include a prototype of seminar

registration system using facial authentication (Sainui *et al.*, 2021), two-factor authentication for web applications (Puntumnunt and Sompong, 2024), and the digital verification and authentication system in the ThaiD application (ThaiD) (The Bureau of Registration Administration, 2024). The operation of these models requires the integration of various technical aspects to

^{*} Corresponding author.

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

Cite this article as:

Muttitanon, W., Mokarat, C. and Nookhao, S. 2025. Establishment of an Application for Student Activity Attendance at a Community College Using a Digital Identity Methodology. *Recent Science and Technology* 17(2): 265181.

ensure that the digital systems are utilized efficiently, effectively support operations, and maintain safety and reliability. Additionally, two-factor authentication (2FA) (Microsoft (Thailand) Co., Ltd., 2024) and multi-factor authentication (MFA) (Amazon Web Services, 2024) are implemented to enhance authentication accuracy and the security of identity management systems as well as to control access to essential resources, such as networks and databases. These measures also contribute to the implementation of information technology security protocols, including enhancements to the architectural design of OAuth 2.0 to address and mitigate common security vulnerabilities (Singh and Chaudhary, 2022). Furthermore, these authentication methods can be applied in various approaches to identity verification and authentication, including: the empirical measurement of systemic 2FA usability (Reynolds *et al.*, 2020); a systematic literature review on online banking user authentication methods (Karim *et al.*, 2023); and a comprehensive analysis of a multifactor authentication system for three-level security (Kantipudi *et al.*, 2024). This also includes enhancements to password storage through the integration of cryptarithmic techniques and hash functions (Polpong *et al.*, 2024). Additionally, authentication, validation, and authorization within Forestry 4.0 using OAuth 2.0 are employed to manage the security of communication between devices in the IoT industry (Chen *et al.*, 2022). Furthermore, a study examines the implementation of OAuth 2.0 and OpenID Connect by popular service providers and top-ranked Android clients, analyzing their adherence to best practices for developing secure native applications to assist developers in ensuring the security of their applications (Sharif *et al.*, 2022). Moreover, a time attendance web application was developed using authentication with images and location within a private university to study staff acceptance of the system. The application was developed with PHP, JavaScript, and jQuery to enable authentication through photographs and geographic location, record work activities, and generate summary reports (Sittijuk and Sanchana, 2024). The application of these approaches has led to improvements in identity verification methods, including facial recognition, fingerprint verification, and the

integration of new algorithms. Additionally, the adoption of multi-level authentication methods, management of communication security for IoT devices, the analysis of adherence to best practices in native app development, and the development of time attendance web applications contribute to enhancing the security and efficiency of systems at a higher level. Importantly, users experience reduced costs and operational burdens. Furthermore, adopting this approach to identity verification can also be seamlessly integrated into the information technology practices within organizations.

The Community College Institution is a government agency that provides sub-bachelor-level higher education and is managed by community colleges. Its objective is to offer academic and vocational education and training through curricula aligned with community needs. It plays a key role in promoting career development and enhancing the quality of life for individuals within the community (Office of the Higher Education Commission, Ministry of Education, 2003). In this project, implementation efforts aim to encourage student participation in activities and facilitate diverse and flexible educational and training programs. Currently, community colleges still record student's activity participation by requiring them to sign in with the staff responsible for monitoring the activity. This process involves verifying student ID cards and subsequently entering the information into a computer system. However, this method is prone to errors and the potential loss of documents, leading to issues in accurately recording students' activity participation. Therefore, implementing a digital authentication approach to manage student participation in activities offers a more efficient solution. This method incorporates identity verification data, including authentication details, date/time, and user location coordinates (calculated distance). Additionally, it facilitates tracking and enables the distribution of activity participation evaluations for further assessment. The previous system relied solely on paper-based operations, which imposed limitations on verification, tracking, and reporting of participant data for purposes such as identity verification and attendance records. This

process requires a digital identity verification and authentication system to validate user credentials and authorize access to various system services. It involves identifying the user's location, proximity, and device access. Additionally, digital identity verification is employed when participants engage in activities that require identity confirmation. Multi-factor authentication (MFA) is essential, involving a multi-step login process that requires users to provide additional information beyond just a password. This approach helps reduce security risks and protect both organizational and user personal data. (Microsoft (Thailand) Co., Ltd., 2024). The development process will utilize OAuth 2.0 as the protocol for authentication and authorization, enabling users to access Google APIs (Google, 2024b). This supports the system's security in data storage and enhances the organization's operational processes, ensuring efficiency in both areas.

Consequently, the researcher proposes a concept for designing and developing an application for community college student activity participation. The objective is to develop an application for activity attendance using digital identify methodology for user authentication, activity recording, and participant tracking and reporting. This approach benefits users by focusing on testing the reliability of system access performance for practical implementation. The study emphasizes the potential of leveraging information technology for management by incorporating smartphones and mobile network services, particularly in areas outside the coverage of the community college's Wi-Fi. It also considers factors that promote the use of a digital authentication model, such as OAuth 2.0, to address security issues related to users' personal data. Additionally, it aims to enhance organizational operational processes through the use of digital applications, thus improving efficiency and increasing convenience for stakeholders.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

This research examines the resources, tools, and operational approaches used in system development. The specific aspects covered in the study are outlined

as follows: OAuth 2.0, the React framework, the Node.js programming language, the Firebase database, the evaluation of user authentication methods, the usability evaluation method, and user requirements analysis, as detailed below.

2.1.1 OAuth 2.0

The OAuth 2.0 authorization framework allows a third-party application to gain restricted access to an HTTP service. This can be done either by facilitating an approval interaction between the resource owner and the HTTP service or by allowing the third-party application to access the service on its own behalf (Hardt, 2012). Furthermore, OAuth 2.0 is an authentication and authorization protocol that enables users to access Google APIs. It is designed to support interactions with web servers, client-side apps, installed applications, and devices, particularly in scenarios where inputting application data is restricted (Google, 2024b).

2.1.2 React framework

The React framework is a library for developing web applications and native user interfaces, with the following key programming features: Hooks are utilized for unique React functionalities, distinguishing them from class-based components; Components are modular elements provided within the documentation that can be used within JSX; APIs are useful tools for defining and managing components effectively; Directives are predefined instructions that enable grouping and integration, allowing smooth interoperability with server-side React components. Additionally, ReactDOM includes features that support the functionality of web applications, processing within the browser environment under the DOM. (Meta Platforms, Inc., 2024), as shown in the example statements in Figure 1.

```

1  export default function Profile() {
2    return (
3      
7    )
8  }

```

Figure 1 Creating a simple component with React for working with markup languages.

2.1.3 Node.js language

Node.js is an open-source runtime environment available at no cost, operating within a cross-platform JavaScript environment. It enables developers to create servers, web applications, command-line tools, and scripts, all powered by asynchronous processing within the JavaScript runtime. Node.js is designed specifically for building scalable network applications. (OpenJS Foundation, 2024), as shown in the example statements in Figure 2.

```

1  const { createServer } = require('node:http');
2  const hostname = '127.0.0.1';
3  const port = 3999;
4  const server = createServer((req, res) => {
5    res.statusCode = 200;
6    res.setHeader('Content-Type', 'text/plain');
7    res.end('Hello My Research.');
```

Figure 2 Creating a simple web server using Node.js.

2.1.4 Firebase database

Firebase is a platform and backend service for app and web developers, offering tools and infrastructure to simplify the app development process. It combines various backend management tools into a single platform, making it easier to develop applications across different platforms. Firebase provides services that help developers save time and money on server-side development. It offers both free and paid tools, including APIs and cloud storage, for building real-time applications (Google, 2024a), as illustrated in Figure 3.

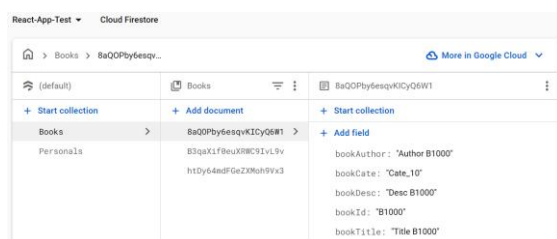


Figure 3 The JSON data structure stored in Firebase Firestore.

2.1.5 Evaluation of User Authentication Method

For systems designed and built using Google APIs, it is not sufficient to merely provide value to users

and businesses. These systems and services must also ensure security and appropriate levels of privacy in accordance with user expectations. This policy is part of the Google APIs Terms of Service and applies to developers utilizing OAuth 2.0, including OpenID Connect for authentication purposes. While these are the minimum requirements, it is strongly recommended that developers take additional measures to ensure the system's security and maintain an adequate level of protection (Google, 2025).

2.1.6 Usability Evaluation Method

The criteria for system usability evaluation involve user testing, which is a critical step in the testing process. This approach relies on users to provide feedback and recommendations about the system. It may take the form of an informal process where users interact with new software products to assess whether the software meets their needs and expectations. Despite comprehensive system testing and deployment, the influence of users' working environments can significantly impact the system's reliability, performance, usability, and resilience (Sommerville, 2016). The evaluation approach incorporates the use of questionnaires and surveys to gather feedback and suggestions from users regarding the developed system.

2.1.7 User Requirements Analysis

Requirement Elicitation, where system requirements were identified by engaging with stakeholders and examining documents related to current operational procedures and practices; Requirement Analysis, during which the gathered requirements were categorized, prioritized, and analyzed for consistency, with models created to ensure a structured approach; Requirement Specification, where the requirements were documented in a formal specification supported by UML diagrams, followed by a thorough review, evaluation, and approval process to ensure accuracy and clarity; and Requirement Validation, where the specified requirements were assessed for correctness, completeness, and consistency through informal feedback from stakeholders to confirm alignment and accuracy. These steps collectively

established a comprehensive list of requirements to guide the subsequent phases of the development process.

2.2 Methods

The community college activity attendance application is being designed and developed as a web application utilizing a digital authentication methodology. The system's data is stored in Firebase (Google, 2024a). This platform, developed by Google, is designed to support application development with authentication via email and secure data storage. It enhances flexibility in configuring rules for protecting cloud-based database information from unauthorized access. The user interface and server-side services are built using the React framework (Meta Platforms, Inc., 2024) to facilitate the creation of interfaces and the efficient rendering of components when data changes and Node.js (OpenJS Foundation, 2024) this platform is used for developing server-side services and also aids in the development of both client-side and server-side applications using JavaScript. It reduces development time and, importantly, the program structure is simple to maintain. OAuth 2.0 is used to handle user data storage and authentication. The implementation consists of the following steps: Web application design and development, user authentication using OAuth 2.0, database design, and system users (clients), as illustrated in Figure 4.

From Figure 4, the figure presents a comprehensive overview of the application development methodology. The application is designed to allow community college students to test the event attendance system, while staff can verify and track student attendance. The application is tested on user devices, including the community college's Wi-Fi network and users' cellular networks. The study evaluates the response time of each task within the system workflow. The research methodology involves the following steps: web application design and development, user authentication using OAuth 2.0, database design, system user identification, and population selection.

2.2.1 Web Application design and development

Both frontend and backend development are used in the design and development of the web application for community college activity attendance that uses a digital authentication methodology. The user interface (frontend) is developed using the React framework, while Node.js is used for backend services. Firebase is employed for the system's data storage. The system supports two user roles: Student and Officer, with the following operational scope: activity registration, activity creation, verification and authentication of participant information, and reporting of participant data, as illustrated in Figure 5.

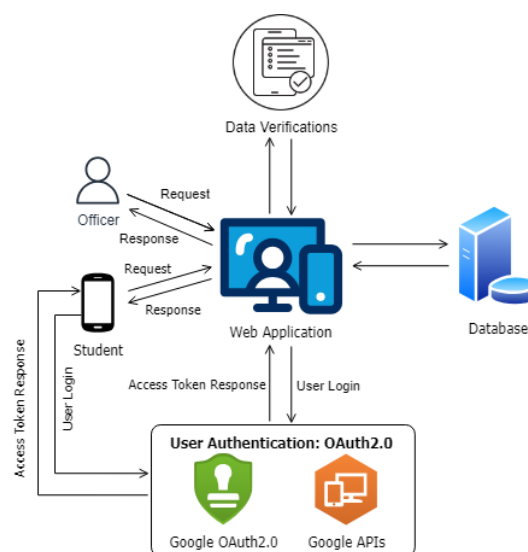


Figure 4 An overview of application approaches.

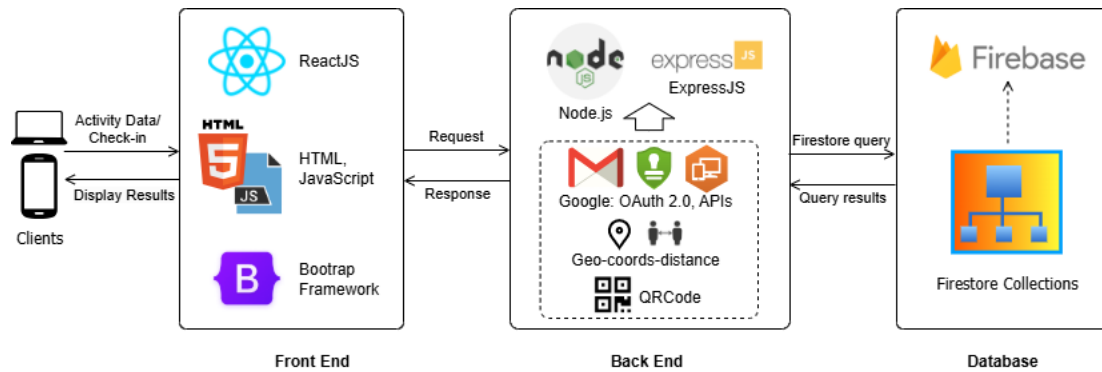


Figure 5 An overview of components of the application.

Figure 5 illustrates the system architecture, which comprises three main components: 1) a frontend layer developed with React, HTML, and Bootstrap, providing a user interface designed for seamless interaction across various devices, such as computers and smartphones; 2) a backend layer is built using the Express.js framework on Node.js, managing server-side operations such as user authentication (via email, OAuth 2.0, and geolocation-based distance verification for attendance tracking), activity data management, and interactions with the database; and 3) a Firebase database functions as the backend data repository, containing collections designed to store user attendance records. It provides real-time accessibility while ensuring the security of stored data.

2.2.2 User authentication using OAuth 2.0

User authentication with OAuth 2.0 is used as a protocol for verifying access rights and granting users access to Google APIs, which perform conditional checks in conjunction with student registration data for activities via the application. This includes email, registered location, and distance verification (with students eligible to register if they are within a specified range as determined by the institution for each activity)

as illustrated in Figure 2. The aim is to reduce the burden on users in various aspects, such as filling in user information during initial registration, registering for activities via QR code scanning or with a single button click, and verifying student eligibility through email as a means of identifying the account owner. By linking with the institution's email service, which is supplied by Google, as illustrated in Figures 6-7, this allows for the verification of both the application users' registration data and student information at the educational facility.

The developed system integrates advanced security measures, utilizing OAuth 2.0 and Firebase to ensure user privacy through identity verification, access control, and real-time protection via Firebase security rules. The authentication process begins when users interact with the interface by selecting the "Sign in with Google" option, initiating GoogleAuthProvider to authenticate with Firebase. Once authentication is successful, Firebase generates user credentials and an ID token, which are transmitted to the backend for verification and securely stored in the database. As illustrated in Figures 6 - 7, this allows for the verification of both the application user registration data and student information at the educational facility.

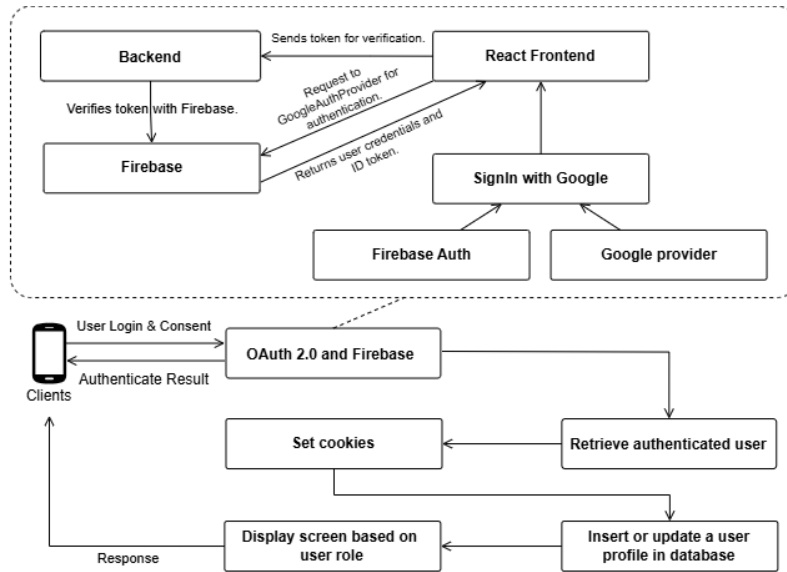


Figure 6 OAuth2.0 for user authentication in applications.

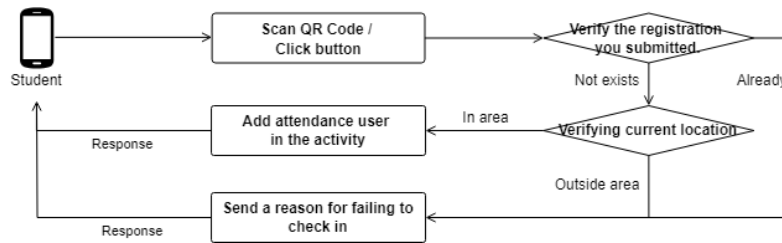


Figure 7 Attendance of students in an activity.

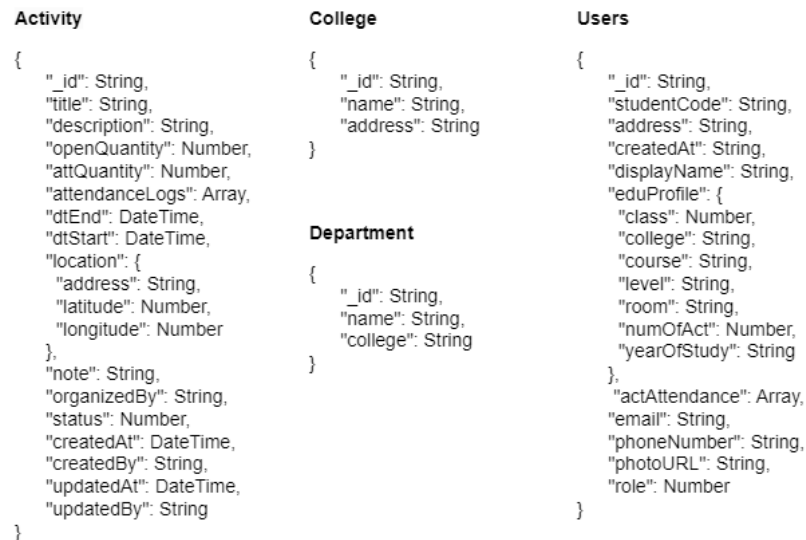


Figure 8 Database design in JSON format.

2.2.3 Database design

The database structure is presented in JSON format and designed for storage within the Firebase database. It consists of four collections: Activity,

College, Department, and Users. These collections store information on activities, affiliated community colleges, departments within the community colleges, and system users, respectively. The database structure is shown in Figure 8.

2.2.4 System users (Clients)

System users are classified into two roles as follows: Students, who are required to use the platform to register for activities and check the list of activities they have participated in as specified by the institution; and Officers, who are staff members of the institution responsible for creating activities, verifying, and confirming participant information as outlined in the institution's curriculum, as illustrated in Figure 9.

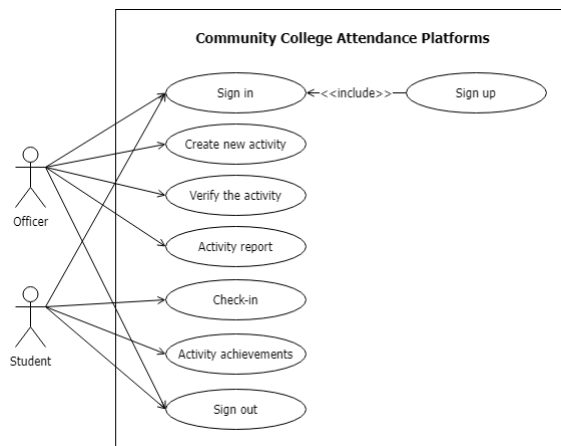


Figure 9 Use case diagram for displaying user roles.

2.2.5 Population

In this research, the test population was defined by selecting a sample group of first-year community college students, aged 17-18 years. These students are familiar with technology at a proficient level, primarily using smartphones as their main device to access the internet and communicate via social media platforms. Additionally, they possess a college email account for communication with both internal and external organizations that use services under the Google for Education platform.

3. Results and Discussion

The outcomes of the application design and development include the following: the user interface of the application, the evaluation of user authentication

using OAuth 2.0, and the system usability evaluation, respectively.

3.1 User interface of the application

Participants will receive a QR code from the person in charge of each student activity. As illustrated in Figure 10, participants can scan or click the button to join the activity of their preference.



Figure 10 QR code to use for attendance into the activity.

In cases where the user has previously signed in, the system will proceed to verify the user's account and their current location for the purpose of registering for an activity. This information will then be recorded accordingly. In cases where the user has not yet signed in with their Google account, the application will redirect them to the main screen, prompting them to sign in with the designated institutional Google account. The user can initiate this process by clicking the 'Sign in with Google Account' button, as shown in Figure 11.

For signed-in users, the system will authenticate their account and check their current location to ensure eligibility for the desired activity. Upon successful verification, the system will record their participation and provide a confirmation on-screen. For users who haven't signed in, they will be directed to the main screen to log in with their institution-specific Google account. Once logged in, they can register for activities and access their personalized dashboard, which includes a list of available activities, their participation history, profile settings, and other relevant information, as illustrated in Figure 12.

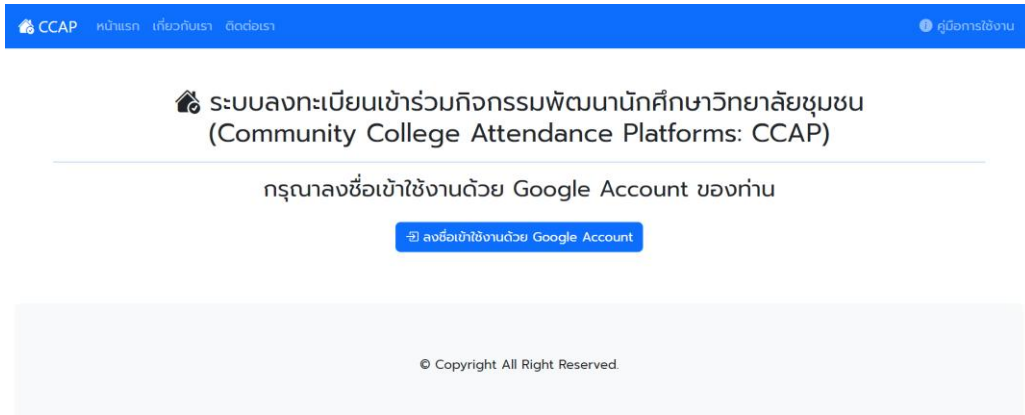


Figure 11 The main page of the application.

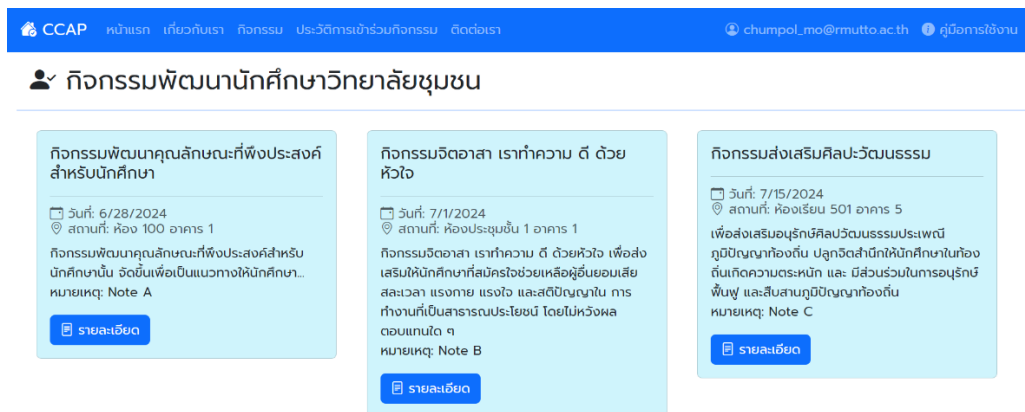


Figure 12 Display the page of an activity list.

รายละเอียดกิจกรรม

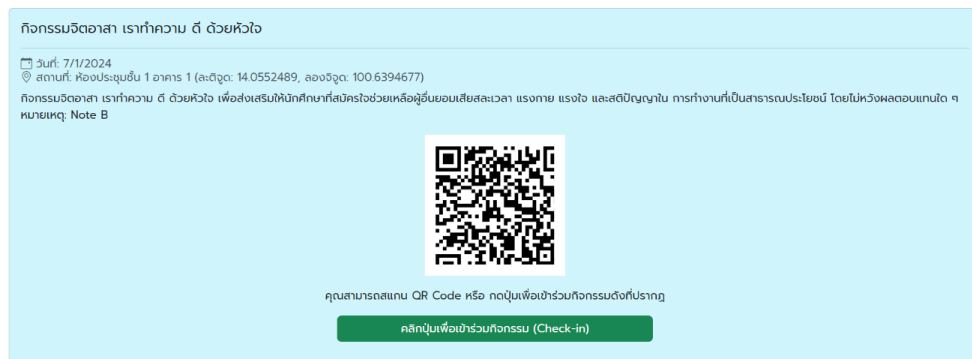


Figure 13 Display the page of an activity description.

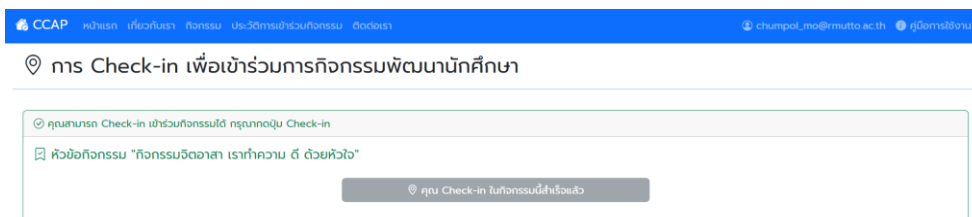


Figure 14 Display the page of the activity check-in.

ประวัติการเข้าร่วมกิจกรรม

รหัสนักศึกษา : 67011002 ชื่อ-สกุล : ชูพลา โยมรัตน์

ผลการเข้าร่วมกิจกรรม :

PASSED

รายการกิจกรรมที่เข้าร่วม จำนวน 5 กิจกรรม

#	ชื่อกิจกรรม	สถานที่	วันที่
pm110717062024	กิจกรรมส่งเสริมศิลปะวัฒนธรรม	ห้องเรียน 501 อาคาร 5	3/9/2024
am113624062024	กิจกรรมพัฒนากฎนลักษณะที่พึงประสงค์	ห้องเรียน 501 อาคาร 5	6/21/2024
am114224062024	กิจกรรมการส่งเสริมสุขภาพ	ห้องเรียน 501 อาคาร 5	6/28/2024
am114424062024	กิจกรรมบำเพ็ญประโยชน์	บริเวณรอบรั้วสถาบัน และ ชุมชนใกล้เคียง	6/7/2024
am114524062024	กิจกรรมรักษาสิ่งแวดล้อม	บริเวณรอบรั้วสถาบัน และ ชุมชนใกล้เคียง	5/24/2024

ประวัติการเข้าร่วมกิจกรรม

รหัสนักศึกษา : 67011002 ชื่อ-สกุล : ชูพลา โยมรัตน์

ผลการเข้าร่วมกิจกรรม :

FAILED

รายการกิจกรรมที่เข้าร่วม จำนวน 1 กิจกรรม

#	ชื่อกิจกรรม	สถานที่	วันที่
pm110717062024	กิจกรรมส่งเสริมศิลปะวัฒนธรรม	ห้องเรียน 501 อาคาร 5	3/9/2024

Figure 15 Page displaying the individual's activity history.

When users wish to view activity details, they can click the “Details” button to access the information. They can also participate in activities until the application disables this button, as illustrated in Figure 13.

As shown in Figure 13, when users scan the QR code or press the button to join the activity, the system verifies the event location and checks the distance of the user from the activity venue, ensuring it is within the range specified by the institution. Once the check-in process for participating in the activity is successfully completed, the system displays the registration confirmation for the activity, as illustrated in Figure 14.

Additionally, users can review their activity participation history. If they have met the institution's participation requirements, the application will display a “PASSED” status, along with a list of completed activities. If participation requirements are not yet fulfilled, the application will display a “FAILED” status, as illustrated in Figure 15 (A) - (B).

3.1.2 Evaluation of user authentication using OAuth 2.0

The evaluation of the system's performance was conducted using a questionnaire, which employed

a 5-point Likert scale to assess user satisfaction with each function of the system. This included authentication, activity information retrieval, location verification, and participation recording. The reliability of the data was evaluated using the mean ($\bar{X}$) and standard deviation (SD) values.

The evaluation of user authentication using OAuth 2.0 focuses on three key aspects: Security, User Experience, and Compliance. This assessment is carried out using a prototype application built with OAuth 2.0 on the Google platform, executed over the HTTPS protocol. The process includes testing functionalities such as sign-in/sign-up, check-in, distance verification (The process of verifying the distance between the user's check-in coordinates for activity participation and the coordinates of the activity venue), sign-out, and token expiration. Additionally, secure storage mechanisms, such as local storage and cookies, are utilized to ensure a safe and reliable environment for managing tokens.

In order to evaluate the efficacy of the OAuth 2.0 user authentication process, the development team conducted a performance assessment involving 250 transactions (5 transactions per test user). The response times for each user were recorded and are presented in Table 1.

Table 1 Evaluation of OAuth2.0-based user application authentication.

No.	Test Case	Response time (Seconds)	$\bar{X}$	SD	Remark
1	Sign In / Sign Up	5-10	6.06	2.96	Total time being typing passwords to every user.
2	Check-in	1-5	2.90	1.36	Depending on the device and cycle (the slowest with the first).
3	Distance Verification	5-20	8.66	2.62	
4	Sign Out	1	2.70	0.98	
Total			4.06	1.58	

Table 2 Evaluation of the registration for student activities.

Test Case	The average registration time (Minutes)	$\bar{X}$	SD	Remark
Activity 1	3	2.70	0.79	First time registration using WIFI
Activity 2	1	1.10	0.30	Second registration using WIFI
Activity 3	1	1.00	0.00	Third registration using WIFI
Activity 4	2	1.60	0.49	Fourth registration using Cellular
Activity 5	2	1.32	0.47	Fifth registration using Cellular
Total		1.54	0.41	

A test involving 50 students was conducted to assess the registration process with 5 different test cases per student. Participants were asked to record the time taken for each step. The results showed that the "Verify Distance" step took the longest, followed by "Sign in/Sign up." The "Check-in" process required a moderate amount of time, while "Sign out" was almost instantaneous. Edited the performance was deemed acceptable by the users, as detailed in Table 2.

From Table 2, the testing was divided into two scenarios: Activities 1-3 were conducted within the college premises using the college's internet network, while Activities 4-5 were tested by students using mobile network provider. It was found that Activity 1, which required users to register for the first time via the venue's WIFI network, took the longest registration time. However, when the users were asked to register two more times in the same environment, the time taken was significantly less than the first time. For the

fourth and fifth registration attempts, users were asked to change locations to outer areas and use the internet network from a service provider, resulting in a slight increase in registration time.

3.1.3 Evaluation of system usability

The system usability evaluation by users was conducted on various aspects, including the graphic user interface, usability, security, reliability, and utilization, respectively. The assessment employs a Likert scale as a measurement tool, consisting of five levels. The questionnaire covers five key areas: graphic user interface, usability, security, availability, and utilization. The response options are as follows: Level 5 indicates "very high satisfied", Level 4 represents "highly satisfied", Level 3 corresponds to "satisfied", Level 2 signifies "dissatisfied", and Level 1 denotes "strongly dissatisfied". These levels allow for a structured evaluation of user satisfaction across the specified areas, with the evaluation being carried out

Table 3 Evaluation of users' uses of the system.

No.	Title	$\bar{X}$	SD	Results
1	Graphic User Interface	4.20	0.70	High
2	Usability	4.80	0.49	Very High
3	Security	4.92	0.27	Very High
4	Reliability	4.70	0.51	Very High
5	Utilization	5.00	0.00	Very High
Total		4.72	0.39	Very High

by 50 users, all of whom were students, as detailed in Table 3.

From Table 3, the overall system usability evaluation by users yielded an average score of 4.72 ($\bar{X}=4.72$, $SD=0.39$), which falls into the "very high" category. Specifically, the aspects of usability, application security, application reliability, and application utility received average scores of 4.80 ($SD=0.49$), 4.92 ($SD=0.27$), 4.70 ($SD=0.51$), and 5.00 ($SD=0.0$), respectively, all of which are rated "very high". On the other hand, the graphic user interface received an average score of 4.20, which is rated as "high". The evaluation results indicated that users were highly satisfied with the system, and they were able to access it without any issues to their operations.

From the evaluation of system performance in various aspects, an extensive authentication and authorization framework leveraging OAuth 2.0 was proposed (Chen *et al.*, 2022). In this approach, the researcher categorized it into the assessment of user authentication using OAuth 2.0 and found that the relatively short time for "Sign in/Sign up" could be attributed to users having saved their passwords on their smartphones. Additional time was sometimes spent on device-specific authentication methods like fingerprints, PINs, or patterns. Smartphone specifications were found to influence the "Distance Verification" step, especially for first-time users in a new location. However, most aspects were within the acceptable level for users. Regarding the evaluation of student activity registration, the test results revealed that during the initial use, students were unfamiliar with the system, including the activation of the location verification program during the first attempt. This required them to study and carefully consider each step involved in the

system's operations. However, in subsequent tests, students demonstrated increased familiarity with the system, leading to a noticeable reduction in the time required to complete the tasks. Furthermore, in cases where the system was accessed via mobile network providers, the performance was influenced by the characteristics of the smartphone and the signal strength of the network provider in the specific area. This is consistent with the fact that testing to determine the system's response time depends on several factors, such as internet speed, network traffic conditions, or the hardware and software of the API system and database. As a result, the test results demonstrated a trend in response speed during simultaneous user logins (Puntumnunt and Sompong, 2024). However, the results generally fell within an acceptable range for user satisfaction. Since the operation of the previous system relied solely on manual signatures on documents, it facilitated the recording of activity participation. However, in cases where access to an unstable internet network occurs, it may affect system functionality, as the system retrieves real-time data for recording. The current version of the system does not support storing data in backup memory (cache). Therefore, if the event location cannot access the internet or has poor signal quality, it will impact the system's performance. The final aspect, focused on evaluating system usability, showed that based on the test results, users were satisfied with the usability and security, but there may still be some dissatisfaction with the user interface (UI) compared to other aspects. The evaluation of the system's usability assessed students' understanding of how to use the system and their awareness of the importance of email, which serves as the primary account for student authentication. It also created a

new experience for students in using the application to record, verify, and track their participation in activities, as well as to receive various updates and notifications.

When comparing the operations between the existing system and the developed system, it was found that the previous process was conducted using a document-based approach, managed by personnel involved in each activity. The outcomes of this process affected operations related to data collection, data verification, and retrieving information about activity participation. The developed time attendance web application took the form of a responsive web, accessible on both computer and portable devices (Sittijuk and Sanchana, 2024). This approach proved inconvenient for both practitioners and users. Therefore, the researcher designed and developed an information system to support usage across multiple devices, integrating data verification for identity authentication through existing user account systems. By utilizing OAuth services, the system streamlines user authentication, removing the need for physical identification cards or manual input of personal information for officer verification. This highlights the system's readiness for development and its potential to integrate seamlessly with other organizational systems. The ultimate goal is to enhance operational efficiency for officers, students, and other stakeholders in these activities in the future.

4. Conclusion

The design and development of the information system are aimed at supporting usage across devices and telecommunications networks that are accessible to users. Currently, these networks cover most areas of the country, and the majority of students at community colleges are located outside urban areas. Although the characteristics of communication devices and internet-connected networks may vary, they do not impede the system's operation. In addition, referencing identity verification through existing user accounts (e.g., Google accounts) can utilize OAuth services to authenticate individuals. This eliminates the need for physical identification cards and the manual entry of personal credentials by users.

It allows for the shared use of user accounts and reduces the necessity of creating and maintaining separate user accounts for each system. However, this approach also ensures the security of password data, protecting personal information and reducing the risk of password leaks or guessing within the system.

The test results indicate that both the mobile network infrastructure and the characteristics of smartphones most commonly used by students, particularly the integration of authentication systems through OAuth services, demonstrate readiness for the development of an information system. This allows users to access and utilize the system via applications across various platforms, ensuring that access is seamless and without issues in usage. This study assumes that user accounts and passwords are unique to each individual (without any processes for delegation of login credentials). The overall evaluation results show that users are highly satisfied and expect the developed system to be compatible and interoperable with other systems within the organization. For example, the integration of the application with the student registration system can assist students in effectively planning their participation in activities that align with the prescribed curriculum. This integration also serves as a direct communication channel to inform students about upcoming events and participation requirements through various devices. Additionally, the system can incorporate functionality for attaching photos or videos as tangible evidence of student involvement in activities. This feature can enhance accountability and provide comprehensive data management support for users.

5. Acknowledgments

The study and research in this article were successfully completed thanks to the support from the Department of Information Technology, Faculty of Business Administration and Information Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chakrabongse Bhuvanarth Campus. The researcher is sincerely grateful for this support.

6. References

- Amazon Web Services. 2024. **What is Multi-Factor Authentication (MFA)?**. What is Multi-Factor Authentication (MFA) - An explanation of MFA -AWS. Available Source: <https://aws.amazon.com/th/what-is/mfa/>, May 24, 2024. (in Thai)
- Chen, J., Hoppen, M., Böken, D., Reitz, J., Schluse, M., and Roßmann, J. 2022. Identity, Authentication and Authorization in Forestry 4.0 Using OAuth 2.0, pp. 1-6. *In 2022 3rd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*. Ankara, Turkey.
- Google. 2024a. **Developer documentation for Firebase**. Firebase Documentation. Available Source: <https://firebase.google.com/docs>, June 7, 2024.
- Google. 2025. **OAuth 2.0 Policies**. OAuth 2.0 Policies | Authorization. Available Source: <https://developers.google.com/identity/protocols/oauth2/policies>, January 21, 2025.
- Google. 2024b. **Using OAuth 2.0 to Access Google APIs**. Using OAuth 2.0 to Access Google APIs | Authorization. Available Source: <https://developers.google.com/identity/protocols/oauth2>, May 24, 2024.
- Hardt, D. 2012. **RF 6749 - The OAuth 2.0 Authorization Framework**. Available Source: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6749>, November 20, 2024.
- Kantipudi, R., Mallavarapu, A.S.K., Rajagopal, S.M., and Kagolanu, M. 2024. A Comprehensive Analysis on using Multifactor Authentication System for Three Level Security, pp. 498-503. *In 2024 2nd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*. Bengaluru, India.
- Karim, N.A., Khashan, O.A., Kanaker, H., Abdulraheem, W.K., Alshinwan, M. and Al-Banna, A.K. 2023. Online Banking User Authentication Methods: A Systematic Literature Review. *IEEE Access* 12: 741-757.
- Sommerville, L. 2016. **Software Engineering Tenth Edition**. Pearson Education Limited, England.
- Meta Platforms, Inc. 2024. **React**. Available Source: <https://react.dev/>, June 7, 2024.
- Microsoft (Thailand) Co., Ltd. 2024. **What is Two-Factor Authentication?**. What is Two-Factor Authentication? | Microsoft Security. Available Source: <https://www.microsoft.com/th-th/security/business/security-101/what-is-two-factor-authentication-2fa>, June 5, 2024. (in Thai)
- Office of the Higher Education Commission, Ministry of Education. 2003. **Regulations of the Management of Lower-Degree Higher Education in the Community College Act B.E. 2546 (2003)**. Thai Government Gazette vol. 120, Part 103 A. (dated October 15, 2003). (in Thai)
- OpenJS Foundation. 2024. **Introduction to Node.js**. Node.js – Introduction to Node.js. Available Source: <https://nodejs.org/en/learn/getting-started/introduction-to-nodejs>, June 7, 2024.
- Polpong, J., Puengson, S., Tantisattayanon, N. and Pornpongtechavanich, P. 2024. Enhancing Password Storage Through the Integration of Cryptarithmic Techniques and Hash Functions. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT)* 18(2): 147-157.
- Puntumnunt, V. and Sompong, C. 2024. Two-factor Authentication for Web Application. *Journal of Science, Engineering and Technology Loei Rajabhat University* 4(1): 1-13. (in Thai)
- Reynolds, J., Samarin, N., Barnes, J., Judd, T., Mason, J., Bailey, M. and Egelman, S. 2020. Empirical Measurement of Systemic 2FA Usability, pp. 127-143. *In 29th USENIX Security Symposium (USENIX Security 20)*. USENIX Association.
- Sainui, J., Jankaew, N. and U-seng, H. 2021. A prototype of seminar registration system using face authentication. *Journal of Applied Information Technology* 7(2): 40-50. (in Thai)

- Sharif, A., Carbone, R., Sciarretta, G. and Ranise, S. 2022. Best current practices for OAuth/OIDC Native Apps: A study of their adoption in popular providers and top-ranked Android clients. **Journal of Information Security and Applications** 65: 103097.
- Singh, J. and Chaudhary, N.K. 2022. OAuth 2.0: Architectural design augmentation for mitigation of common security vulnerabilities. **Journal of Information Security and Applications** 65: 103091.
- Sittijuk, P. and Sanchana, W. 2024. Development and Acceptance of Time Attendance Web Application Using Identity Verification with Picture and Location of Personnel in Private Universities. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 16(3): 689-702. (in Thai)
- The Bureau of Registration Administration. 2024. **The digital identity verification and authentication system of the ThalD application.** The Department of Provincial Administration's Digital ID System in the ThalD Application - The Bureau of Registration Administration. Available Source: <https://www.bora.dopa.go.th/app-thaid/>, May 24, 2024. (in Thai)



Research Article

Business Intelligence System for Lecturer Qualification Analysis: Optimizing ETL Workflows for KPI Extraction based on QOX

Sureena Matayong ^{a*}, Suttida Saebao ^b and Numtip Trakulmaykee ^c

^a Department of Interdisciplinary Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

^b Agricultural Innovation and Management Division, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

^c Division of Computational Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-10-11

Revised: 2025-04-11

Accepted: 2025-04-18

Keywords:

business intelligence;

ETL;

qualification analysis;

QOX;

TAM

Evaluating lecturer qualifications is critical for ensuring program compliance with higher education standards in Thailand. This process involves data from multiple sources, leading to redundancy and inaccuracies that complicate data integration and quality, ultimately resulting in delays analysis and decision-making. Business Intelligence (BI) systems are essential for improving data integration and analysis, enabling institutions to make informed decisions through visualizations. However, the effectiveness of these systems relies on a robust Extract, Transform, and Load (ETL) workflow. This study introduces a Quality Objective Matrix (QOX) to evaluate the *accuracy, completeness, scalability, and efficiency* of the workflow. The methodology included analyzing the QOX criteria for workflow development and measurement. Then, the BI system was developed and evaluated using the Technology Acceptance Model (TAM). Results indicated that the ETL workflow achieved 99.99% accuracy, and completeness was measured at 85%. The processing demonstrate significant scalability and efficiency, saving approximately 3 hours and 19 minutes compared to manual methods. User satisfaction scores averaged 4.58 out of 5 with a standard deviation of 0.5 for information quality, perceived ease of use, and perceived usefulness. This study demonstrates that implementing a robust ETL process within a BI system can significantly improve compliance and operational efficiency in higher education institutions.

© 2025 Matayong, S., Saebao, S. and Trakulmaykee, N. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Intr oduction

This study extends the work originally presented in (Saebao *et al.*, 2020) by designing and developing an Extract, Transform, and Load (ETL) workflow for retrieving and transforming data. The workflow supports the lecturers' qualifications analysis

according to Standard Criteria for Graduate Studies Programs (SCGSP), which facilitates the efficient integration of diverse data sources and formats. Building on the previous work, this paper provides additional implementation and evaluation details.

* Corresponding author.

E-mail address: sureena.m@psu.ac.th

Cite this article as:

Matayong, S., Saebao, S. and Trakulmaykee, N. 2025. Business Intelligence System for Lecturer Qualification Analysis: Optimizing ETL Workflows for KPI Extraction based on QOX. *Recent Science and Technology* 17(2): 264981.

In recent years, higher education institutions in Thailand have faced significant challenges in assessing compliance with the Higher Education Program Standards B.E. 2565 (Ministry of Higher Education, 2022), particularly in evaluating lecturer qualifications. This complex analysis, which includes criteria such as educational backgrounds, academic positions, advisor workloads, and publication counts (Jansawang *et al.*, 2025; Ubachs and Henderikx, 2022), is hindered by the difficulty of extracting and integrating datasets dispersed across multiple repositories with varying structures and formats. Issues of redundancy, inconsistency, and inaccuracy, coupled with the dynamic nature of lecturer information requiring frequent updates, complicate data preparation and maintenance. These challenges consume substantial time and effort, leading to delays in evaluations and undermining accuracy. Consequently, institutions struggle to meet compliance requirements, which can negatively impact their accreditation status and overall academic quality (Chakraborty *et al.*, 2021). Addressing these issues is essential to streamline the evaluation process, improve data accuracy, and ensure timely adherence to higher education standards.

Digital technology, particularly Business Intelligence (BI) systems, has emerged as a pivotal tool in addressing challenges related to data integration and analytical capabilities. BI encompasses the utilization of digital computing technologies such as data warehouses, analytics, and visualization tools to identify and analyze essential business data, ultimately generating actionable insights for corporate decision-making (Geetha *et al.*, 2020; Chen and Lin, 2021). In the context of higher education, BI contributes significantly to decision-making by enabling academic leaders to monitor and analyze key indicators and trends through various report formats efficiently (Khatir, and Madani, 2024; Mukul and Büyüközkan, 2023; Khatibi *et al.*, 2020; Pikhart, 2020; Guan *et al.*, 2020; Wang, 2021). However, the success of BI systems is fundamentally tied to the quality of the ETL workflow, which serves as the backbone of data integration and processing (Liu, 2024; Souibgui *et al.*, 2019; Theodorou *et al.*, 2017; Astriani and Trisminingsih, 2016). The ETL process is

responsible for extracting data from heterogeneous sources, transforming it into a consistent and usable format, and loading it into a centralized repository for analysis. While the ETL process streamlines data management, it is often fraught with challenges, including complexity, time consumption, and high costs (Saebao *et al.*, 2020; Simitsis *et al.*, 2010; Simitsis *et al.*, 2009; Awad *et al.*, 2011). These challenges are particularly pronounced in higher education, where the integration of diverse data sources is critical for evaluating compliance with standards. A literature review reveals that studies on BI systems can be classified into two main approaches: technical and managerial. The technical approach, highlighted by Niño *et al.* (2020), Awiti *et al.* (2020) and Wang and Liu (2020), emphasizes the development of tools and techniques that facilitate data-driven decision support, including data integration processes and the design of advanced systems. Conversely, the managerial approach focuses on the integration and analysis processes that yield useful information for decision-makers, ensuring the successful implementation of BI systems. Implementations of BI systems have been investigated across various domains, including business (Kleesuwana *et al.*, 2010; Niño *et al.*, 2020; Girsang *et al.*, 2020; Nethravathi *et al.*, 2020), healthcare (Gaardboe *et al.*, 2017), education (Khatibi *et al.*, 2020; Pikhart, 2020; Wang, 2021; Guan *et al.*, 2020), and marketing. Notably, the development of BI systems in higher education primarily supports decision-making by integrating relevant information from heterogeneous data sources (Moreno, 2020; Haenlein and Kaplan, 2021). To address the challenges in ETL workflows and BI system adoption, this study introduces a dual approach combining the Quality Objective Matrix (QOX) and the Technology Acceptance Model (TAM). This dual approach addresses both operational and human factors, which not only improves data integration and analysis but also empowers organizations to make timely, informed decisions. Ultimately, it contributes to overcoming the challenges associated with ETL workflows and ensures that BI systems deliver their full potential in higher education.

The QOX framework in this study evaluates ETL workflows across four critical dimensions: accuracy, ensuring correct data transformation in terms of formats, types, and lengths (Azeroual *et al.*, 2019; Samir Abdel-Moneim *et al.*, 2015; Lucas, 2010; Khan *et al.*, 2015; Wand and Wang, 1996; Marshall and De La Harpe, 2009); completeness, verifying that all source data is successfully loaded into the target storage (Azeroual *et al.*, 2019; Samir Abdel-Moneim *et al.*, 2015; Lucas, 2010; Khan *et al.*, 2015; Arputhamary and Arockiam, 2015; Wand and Wang, 1996); scalability, assessing the system's ability to handle increasing data volumes (Simitsis *et al.*, 2010; Dayal *et al.*, 2009; Arputhamary and Arockiam, 2015); and efficiency, measuring workflow performance in reducing bottlenecks (Simitsis *et al.*, 2009; Simitsis *et al.*, 2010; Khan *et al.*, 2015). While previous studies have acknowledged some dimensions, they often lack depth in exploring scalability and efficiency or fail to integrate them into a comprehensive framework. For instance, research by Dayal *et al.* (2009) and Khan *et al.* (2015) insufficiently examines the relationship between scalability and efficiency, which can lead to delays and resource wastage. Additionally, earlier studies lack practical insights from real-world implementations, limiting their applicability. Complementing this technical optimization, the study employs TAM to evaluate user satisfaction and adoption. TAM, developed by Davis (1989), consists of two key factors: perceived usefulness, reflecting the belief that a system enhances job performance, and perceived ease of use, relating to the minimal effort required to use the system (Wang and Song, 2017; Cho *et al.*, 2020; Xu and Du, 2019). These factors positively influence user satisfaction and technology acceptance (Wang and Song, 2017; Cho *et al.*, 2020; Xu and Du, 2019). However, this study expands TAM by integrating information quality, which is assessed through accuracy, timeliness, reliability,

relevance, integrity, and simplicity as a third factor, offering a more comprehensive understanding of user satisfaction drivers (Ashfaq *et al.*, 2020; Koivumaki *et al.*, 2008; Wang and Teo, 2020). By synergizing perceived usefulness, perceived ease of use, and information quality, this framework aims to improve the design and implementation of technology solutions, ensuring they meet user needs and enhance overall satisfaction. The research objectives are as follows:

- To optimize the ETL workflow using QOX to enhance system performance.
- To assess user satisfaction and technology acceptance through the TAM to ensure usability and adoption.

The methods employed in this study focus on:

- Developing and evaluating ETL workflows to address redundancy, inconsistency, and inefficiency.
- Implementing the QOX framework to measure and improve key performance indicators.
- Applying TAM to gather user feedback and refine the system for better alignment with user needs and satisfaction.

2. Materials and Methods

The study followed a research and development approach to ensure a holistic evaluation of both technical and user-focused elements, enhancing the system's performance and usability. The methodology was organized into five sequential steps, as depicted in Figure 1: (1) analyze SCGSP qualification criteria and data sources, (2) design and develop the ETL workflow, (3) evaluate the ETL workflow based on QOX, (4) design and develop the BI system, and (5) evaluate the user's satisfaction based on TAM.

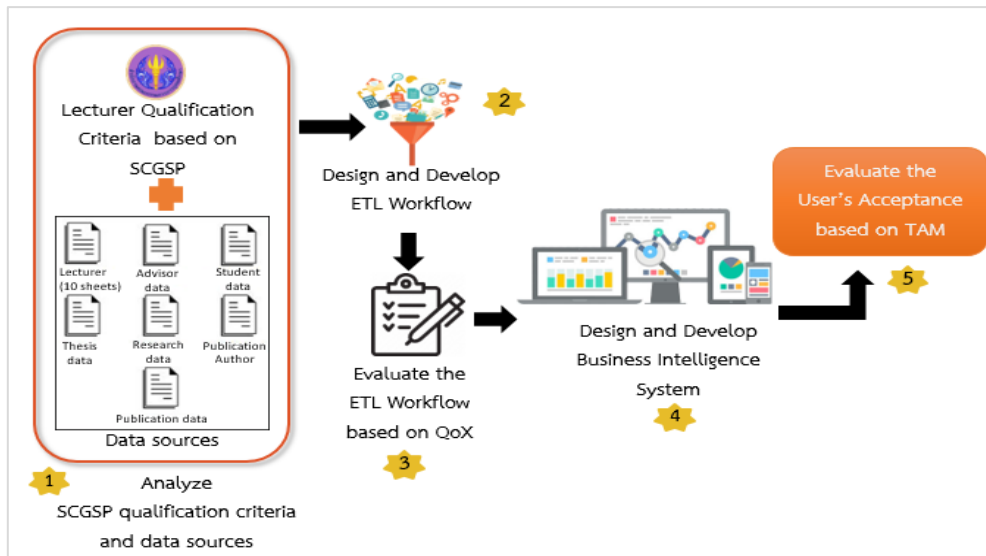


Figure 1 The Methodology

Table 1 Role of lecturers and data sources

Data	Role		
	Lecturer	Curriculum Instructor	Advisor
Educational qualifications			
- Field of study	✓	✓	✓
- Year of graduation			
Academic position	✓	✓	✓
Academic achievements	✓	✓	✓
Information on the type of current teaching staff			
- Courses in which the faculty is a regular faculty member	✓	✓	✓
- Courses in which the faculty is responsible for the course			
Information on the appointment of the main thesis advisor/students under supervision	-	-	✓

2.1 Analyze SCGSP Qualification Criteria and Data Sources

According to the Higher Education Program Standards B.E. 2565 (Ministry of Higher Education, 2022), the lecturer qualifications benchmark for Component 1 focuses on the number and qualifications of lecturers. For the benchmark analysis, three roles must be evaluated based on different criteria, as outlined in Table 1. The roles of lecturer and curriculum instructor do not require an assessment of dissertation

advisor workload, whereas the dissertation advisor's role does. However, all roles must consider criteria related to educational background, academic position level (e.g., Assistant Professor, Associate Professor, Professor), publication record, and advisor workload.

To analyze the data sources effectively, the selection process involved a rigorous review of the literature and collaboration with domain experts to identify the most relevant and critical datasets that comply with the criteria of Higher Education Program

Standards B.E. 2565 (Ministry of Higher Education, 2022). The specific criteria used for selection included data relevance, completeness, accuracy, and accessibility. This approach ensured that the selected data sources not only met the fundamental requirements of quality and relevance but also aligned with the specific educational standards set forth for higher education programs. By systematically considering compliance with these standards, the analysis aimed to reinforce the integrity and effectiveness of the data used in the research, thereby contributing to enhanced educational outcomes and adherence to established regulations. At this stage, the data is scattered across various unstructured formats, such as documents, Excel files, and other file types, collected from three primary sources: the Curriculum of Faculty (CF), the Registration System (RS), and the Graduate School (GS). To prepare the data for the ETL workflow, a systematic process was implemented. Raw data from diverse sources was collected, structured into defined datasets and schemas, and organized into Excel files to establish a preliminary structure. A unified data schema was then created in Excel to ensure consistency, compatibility, and seamless integration across varying formats. This step was essential for

transforming unstructured data into a structured format, enabling efficient analysis and integration within the ETL process. This study developed seven" important datasets that related to lecturer's qualification criteria: (1) lecturer profile, (2) advisor data, (3) student data, (4) thesis data, (5) research data, (6) publication author, and (7) publication data. The schemas for these datasets were derived through a combination of extraction and definition processes. The element names (schemas) in each table, as shown in Tables 2-8, were carefully analyzed and extracted from the available data. Where necessary, they were redefined to enhance clarity and consistency across all datasets.

2.2 Design and Develop ETL Workflows

Three ETL workflows were designed and developed in this study using SQL Server Integration Services (SSIS) via Visual Studio 2019. SSIS provides the necessary tools to efficiently extract data from various sources namely CF, RS, and GS databases, transforming this data into a standardized format suitable for analysis. Its robust capabilities ensure that large volumes of data are processed accurately and efficiently, which is essential for timely decision-making.

Table 2 Schema lecturer profile data (CF)

No.	Schema	Descriptions
1	NAME_THAI	Name and Surname in Thai
2	NAME_ENG	Name and Surname in English
3	STAFF_ID	Staff Number
4	POSITION	Academic Position
5	POSITION_LEVEL	Position Level
6	START_DATE	Date of Employment
7	EDU_LEVEL_ENG	Highest Education History
8	BIRTH_DATE	Day/Month/Year of Birth

Table 3 Schema advisor data (GS)

No.	Schema	Descriptions
1	ID_CARD	Teacher's national ID card number
2	ADVISOR_POSITION	Advisor's position code
3	POSITION_NAME	Advisor's position name in Thai
4	POSITION_NAME_ENG	Advisor's position name in English
5	ADVISOR_ORDER-DATE	Date of appointment of advisor

Table 3 (Continuous)

No.	Schema	Descriptions
6	STUDENT_ID	Student ID
7	ENT_TERM	Semester of study
8	ENT_YEAR	Academic year of study
9	STUDENT_NAME	Thai student name
10	STUDENT_NAME_ENG	English student name
11	FAC_ID	Faculty code of student's affiliation
12	FAC_NAME_THAI	Faculty name of student's affiliation
13	CMAM_ID	Campus code
14	CAMP_NAME_THAI	Campus name of student
15	STUDY_STATUS	Education status code
16	STUDY_STATUS_DETAIL	Education status code name
17	STILL_STUDENT	Student status

Table 4 Schema student data (RS)

No.	Schema	Descriptions
1	STUDENT_ID	Student ID
2	STUDENT_NAME	Student name in Thai
3	STUDENT_NAME_ENG	Student name in English
4	CARD_ID	Student ID number
5	MAJOR_ID	Major code
6	MAJOR_NAME_THAI	Major name in Thai
7	MAJOR_NAME_ENG	Major name in English
8	DEGREE_NAME_THAI	Degree name
9	COURSE_TYPE_ID	Program type code
10	COURSE_TYPE_NAME	Major type name
11	STUDY_TYPE_ID	Study type code
12	STUDY_TYPE_NAME	Study type name
13	PLAN_ID	Study plan code
14	PLAN_NAME_TH	Study plan name in Thai
15	PLAN_NAME_ENG	Study plan name in English
16	FIELD_ID	Sub-major code
17	FIELD_NAME_TH	Sub-major name in Thai
18	FIELD_NAME_ENG	Sub-major name in English
19	DEPT_ID	Department code
20	DEPT_NAME_THAI	Department name in Thai
21	DEPT_NAME_ENG	Department name in English
22	EDU_LEVEL	Faculty code of student's home faculty
23	EDU_LEVEL_TH	Thai level name
24	EDU_LEVEL_ENG	English level name
25	CAMP_ID	Campus code
26	CAMP_NAME_THAI	Campus name of student
27	STUDY_STATUS	Education status code

Table 4 (Continuous)

No.	Schema	Descriptions
28	STUDY_STATUS_NAME	Education status code name
29	ENT_DATE	Entry date
30	ENT_TERM	Section of entry
31	ENT_YEAR	Academic year of entry
32	GRAD_DATE	Graduation date or termination of student status
33	GRAD_TERM	Section of graduation
34	GRAD_YEAR	Academic year of graduation
35	FOREIGN	Student type T Thai F International
36	STILL_STUDENT	Student status

Table 5 Schema thesis data (GS)

No.	Schema	Descriptions
1	STUDENT_ID	Student ID
2	STUDENT_NAME	Student Name
3	ADVISOR_NAME	Thesis Advisor Name
4	ID_CARD	Teacher's National ID Card Number
5	STAFF_ID	Thesis Advisor Personnel ID
6	THESIS_TITLE_TH	Thai Thesis Name
7	THESIS_TITLE_ENG	English Thesis Name
8	THESIS_TITLE_EXAM	Thesis Outline Exam Date
9	THESIS_EXAM_DATE	Thesis Defense Exam Date
10	EXAM_ID	Thesis Defense Exam Times
11	EXAM_TIME	Thesis Defense Exam Time
12	EXAM_PLACE	Thesis Defense Exam Location
13	RESULT_EXAM	Thesis Exam Result Code
14	RESULT_DETAIL	Thesis Exam Result
15	THESIS_ACCEPT_DATE	Thesis Booklet Receipt Date
16	GS_GRAD_DATE	B.W. Graduation Date

Table 6 Schema research data (CF)

No.	Schema	Descriptions
1	AW_NO_ID	Author Work ID
2	NAME_THAI	Thai Author Name
3	NAME_ENG	English Author Name
4	ID_CARD	Author Identification Number
5	RESEARCH_ID	Research ID
6	RESEARCH_NAME	Research Name

Table 7 Schema publication author (CF)

No.	Schema	Descriptions
1	AT_ID	Author ID
2	AW_NO_ID	Author Work ID
3	NAME_THAI	Thai Author Name
4	NAME_ENG	English Author Name
5	ID_CARD	Author Identification Number
6	MTYPE_ID	Academic Work Type
7	TYPE_ID	Author Type Code 1: Main Author 2: Co-Author
8	AT_PERCENT	Percentage of Work

Table 8 Schema publication data (CF)

No.	Schema	Descriptions
1	AW_NO_ID	Academic work code
2	LANGUAGE	Language used
3	AUTHOR_AMOUNT	Number of authors
4	END_YEAR	Year of work
5	NAME_THAI	Thai title of work
6	NAME_ENG	English title of work
7	JOURNAL_THAI	Thai journal name
8	JOURNAL_ENG	English journal name
9	VOLUM	Journal issue
10	NO	Volume of journal
11	START_PAGE	Starting page
12	END_PAGE	Ending page
13	PRESENT-YEAR	Year of academic conference
14	CONFERENCE_THAI	Thai conference name
15	CONFERENCE_ENG	English conference name
16	CITY_THAI	Thai conference city name
17	CITY_ENG	English conference city name
18	PLACE_THAI	Thai presentation venue name
19	PLACE_ENG	English presentation venue name
20	RECORD_DATETIME	Date and time of data recording

The first workflow, LecProfile, prepared data about lecturer's profile from 10 departments. The second workflow, LecAdvisor, processed data related to dissertation advisors by extracting files from the 'Advisor', 'Student', 'Thesis' and 'Lecturer' datasets. Finally, the LecPublication workflow compiled data on lecturers' publications using three data files: 'Research', 'Publication Author', and 'Publication'.

Figure 2 shows an example of the ETL workflow for LecProfile. The data is imported from two sources: (1) personnel data from the CF (2) current roles. The current roles files cannot be directly analyzed due to its data storage format. Therefore, the data must be augmented by adding attributes that identify the types of each role. Additionally, the personnel database in the CF requires extra attributes to enable data linking with other databases. Following these steps, the data

will be managed using the ETL workflow process below.

The example processes of LecProfile workflow were shown in the following steps:

- Combining the 10 sheets of 10 lecturer departments into a single dataset using the 'Union All' command as presented in Figure 2.
- Deleting the empty data row that contains a blank data value in the ID_CARD attribute.

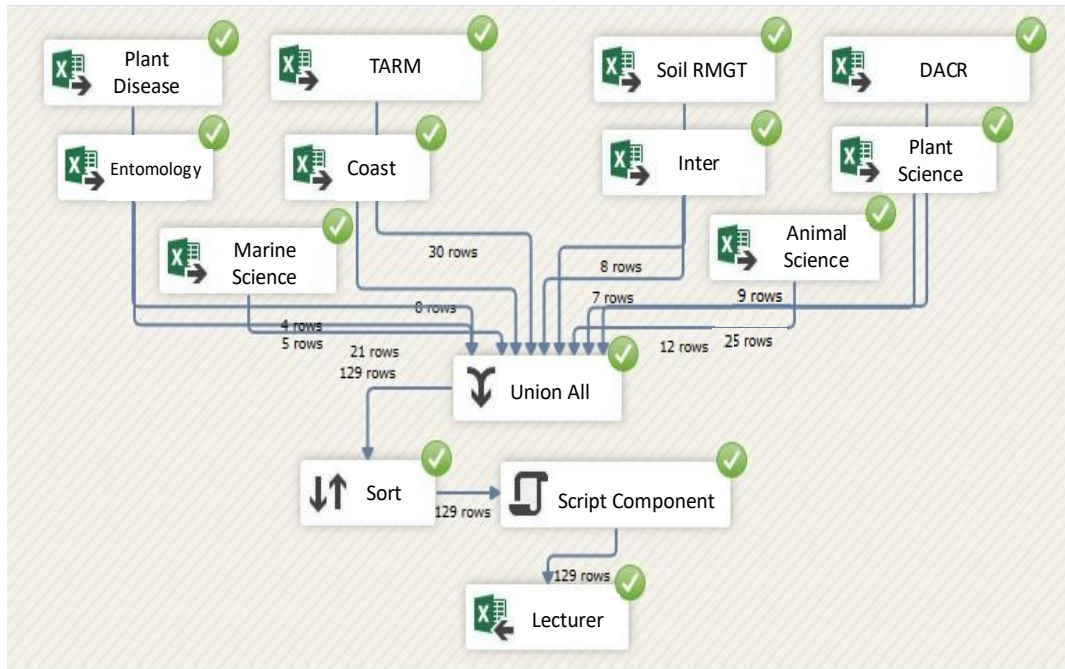


Figure 2 The example ETL workflow of LecProfile

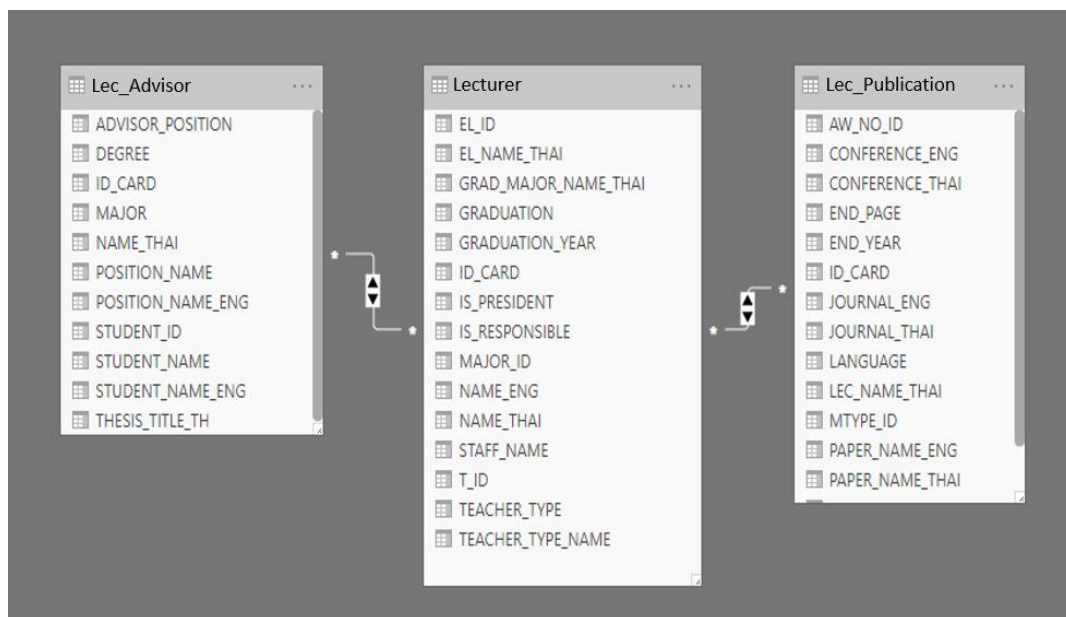


Figure 3 The result files from ETL workflow

- Replacing values of some mismatched data, such as the graduated year, where year values were not in A.D. and were replaced from B.E. to A.D., and the teacher type (L and C) which were replaced with '1' and '2', respectively.

After all the ETL workflows were run, three result files were generated: Lec_Advisor, Lecturer, and Lec_Publication as shown in Figure 3.

2.3 Evaluate the ETL Workflow based on QOX

In this study, the QOX evaluation focused on four key aspects: accuracy, completeness, scalability, and efficiency.

2.3.1 Accuracy

Accuracy served as a critical performance indicator to assess the ETL workflow. It ensured that data was accurately loaded into the target system as expected. Using value mapping comparisons, SQL set operators were employed to verify data type, length, range, and unique values of critical fields between the source and target systems. For precise evaluation, 80% of the source data was sampled five times and tested across each ETL workflow. If the mapping results matched in both data and type between sources and targets, the workflow was deemed accurate.

2.3.2 Completeness

Completeness aimed to confirm that all expected data was transferred from the source to the target. Two primary tests were conducted: (1) comparing the number of rows between the source and target, and (2) validating necessary attributes for missing or incorrect values. Three algorithms were designed for testing completeness across the workflows: Algorithm 1 for LecProfile, Algorithm 2 for LecAdvisor, and Algorithm 3 for LecPublication. Each workflow included a 'Script Component' node to execute the completeness evaluation, producing results such as row counts in the source and target files, missing data counts, and completeness values.

2.3.3 Scalability

Scalability measures the ETL workflow's ability to handle increased data volumes efficiently. To test scalability, this study expanded the source data to 5 and 10 times the original row count (where x represents the initial number of rows) and re-ran the ETL workflows. If the workflows executed within acceptable timeframes, they were deemed scalable.

Algorithm 1: Completeness evaluation of LecProfile workflow

Result: row count of source, row count of target, row count of missing data, completeness value

```

missing_data = 0;
ii = 1;
count_source = 0;

while (ii < 11) do
    rowDepartment_ii = count(row in sheet_ii);
    count_source = count_source + rowDepartment_ii;
    ii = ii + 1;
End
SELECT count(ID_CARD) as count_target FROM Lecturer;
differ_rows = count_source - count_target;
completeness = 1 - (differ_rows/count_source);
while not EOF of Lecturer do
    if (ID_CARD is null or STAFF_NAME is null) or
       (EL_ID is null or GRADUATION is null)
    then
        missing_data = missing_data + 1;
    end
end
end
Display count_source, count_target, missing_data, completeness;
```

Algorithm 2: Completeness evaluation of LecAdvisor workflow

Result: row count of source, row count of target, row count of missing data, completeness value

```

missing_data = 0;
SELECT count(ID_CARD) as count_source FROM Advisor;
SELECT count(ID_CARD) as count_result FROM Lec_Advisor;
differ_rows = count_source - count_target;
completeness = 1 - (differ_rows/count_source);
while not EOF do
    if ((THESES_TITLE_ENG is null and THESES_TITLE_TH is null) or
       (ID_CARD is null or ADVISOR_POSITION is null)) or
       (STUDENT_ID is null or DEGREE is null)
    then
        missing_data = missing_data + 1;
    end
end
End
Display count_source, count_result, missing_data, completeness;
```

Algorithm 3: Completeness evaluation of LecPublication workflow

Result: row count of source, row count of target, row count of missing data, completeness value

```

missing_data = 0;
SELECT count(AW_NO_ID) as count_source FROM Publication;
SELECT count(AW_NO_ID) as count_target FROM Lec_Publication;
differ_rows = count_source - count_target;
completeness = 1 - (differ_rows/count_source);
while not EOF do
    if ((CONFERENCE_ENG is null and CONFERENCE_THAI is null) and
       (JOURNAL_ENG is null and JOURNAL_THAI is null)) or
       ((PAPER_NAME_ENG is null and PAPER_NAME_THAI is null) or
       (MTYPE_ID is null or ID_CARD is null))
    then
        missing_data = missing_data + 1;
    end
end
end
Display count_source, count_target, missing_data, completeness;
```

2.3.4 Efficiency

Efficiency evaluates the ETL workflow's resource optimization, focusing on minimizing both time and materials both time and materials while achieving the desired outputs. For this assessment, the total

execution time of the three proposed ETL workflows was calculated and compared to a manual-based system, which involved human data preparation without workflow software. The manual system averaged 3 hours and 35 minutes, while the proposed ETL workflows demonstrated significantly reduced execution times, highlighting their efficiency. This comparison underscores the time-saving benefits and resource optimization of the automated ETL approach.

2.4 Design and Develop Business Intelligence System

The Lecturer Qualification Analysis System (LQAS) was developed to support decision-making based on SCGSP criteria regarding curriculum instructor and advisor allocation. Microsoft Power BI was utilized to design and develop data visualizations. It supports a wide range of data connectors, enabling seamless integration with multiple data sources and facilitating real-time data access. Its advanced data modeling features allow for complex calculations and measures, providing deeper insights into lecturer qualifications through interactive reports and dashboards. Before creating data visualizations, a data model was developed to establish relationships between entities and to prepare the dimensions for visualization. The main dashboard presents an overview of the number of lecturers eligible to serve as curriculum instructors and major advisors, both currently and in the future, as shown in Figure 4. This data visualization allows filtering based on various conditions, such as curriculum, lecturer roles, types of advisors, and year ranges. Additionally, it illustrates the total number of lecturers, theses, major advisors, co-advisors, and publications. The dashboard also leverages useful BI features, such as drill-down and drill-through functionalities.

The 'drill through' feature allows users to access additional dashboards for further insights. Figure 5 illustrates a dashboard displaying a list of lecturers and their workloads, which can be accessed by drilling through from the bar chart in Figure 4. Similarly, the dashboard in Figure 6 allows users to drill through from the list of lecturers in Figure 5 to view detailed information about each lecturer, including their

name, major, education, email, role, list of advisees, and list of publications.

Additionally, users can click on visuals to 'drill down' and explore the next level of hierarchical data. Figure 7 demonstrates the drill-down interaction on the publication bar chart from Figure 6, revealing the breakdown of publications by language (THA for Thai and ENG for English) for each year.

2.5 Evaluate the User's Satisfaction

The study population comprised academic and support staff involved in curriculum management and required to use the system. To evaluate user satisfaction, an online questionnaire was distributed to 44 individuals related to curriculum management. The questionnaire was divided into three parts: (1) participant profiles, including gender, education level, and roles (e.g., lecturer, curriculum instructor, Graduate School officer); (2) factors influencing user satisfaction, such as information quality, perceived ease of use, and perceived usefulness, assessed using a 5-point Likert scale (1 = not satisfied, 5 = very satisfied); and (3) a section for additional suggestions. For statistical analysis, the SPSS program was utilized to compute descriptive statistics, including mean, standard deviation, and frequency, providing insights into user satisfaction levels and feedback.

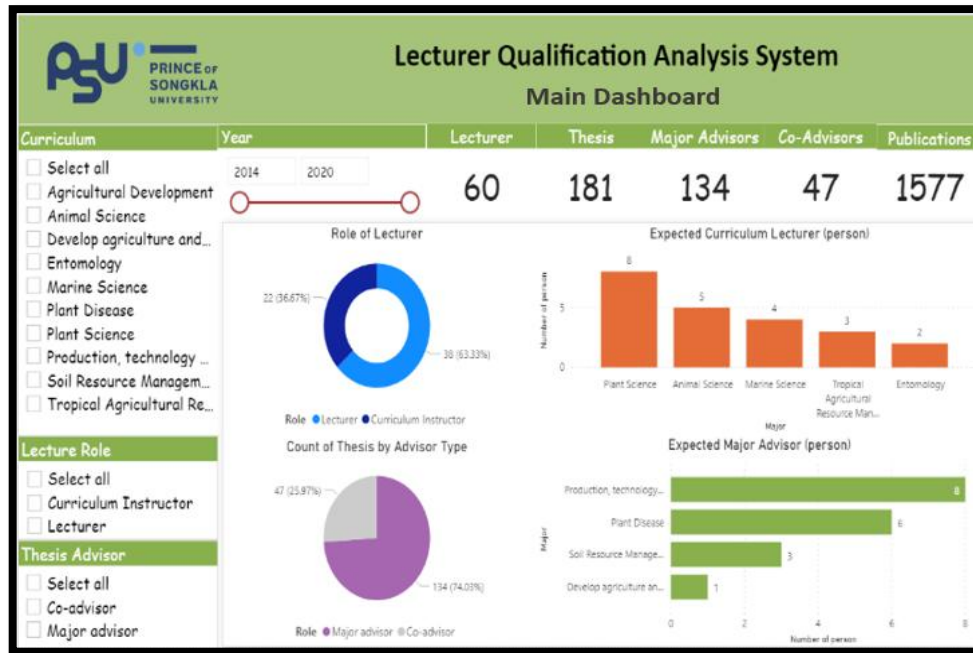


Figure 4 The main dashboard

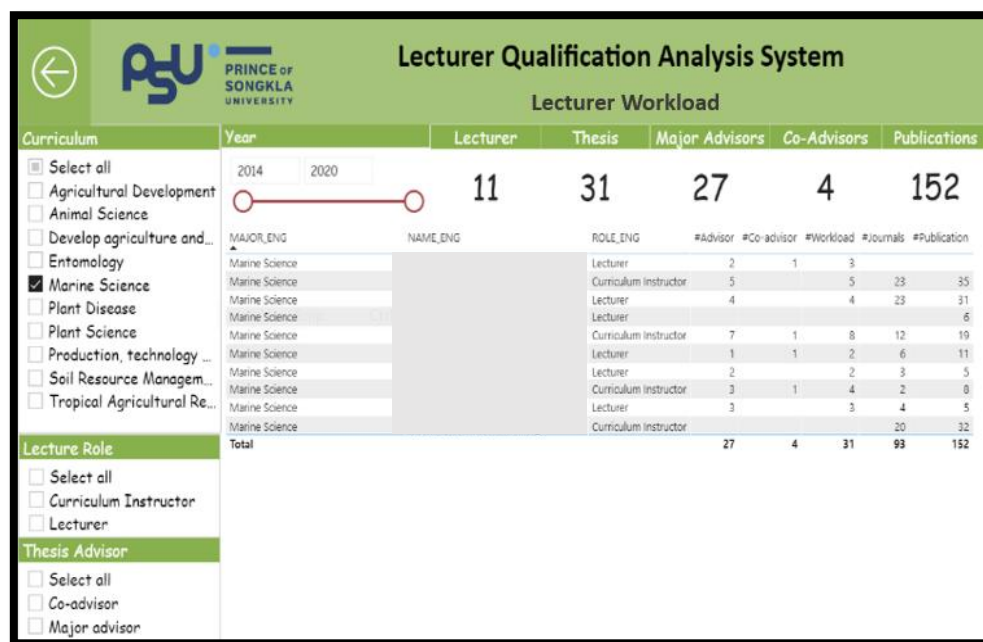


Figure 5 The list of lecturers and workload dashboard from drill thought method

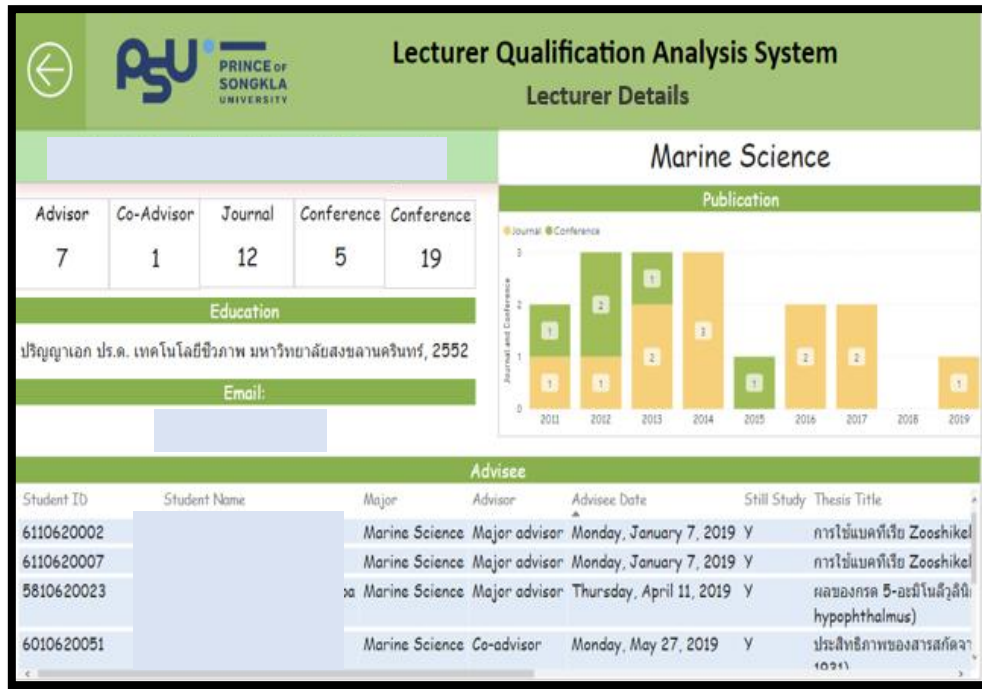


Figure 6 The details of lecturer dashboard from drill thought interaction

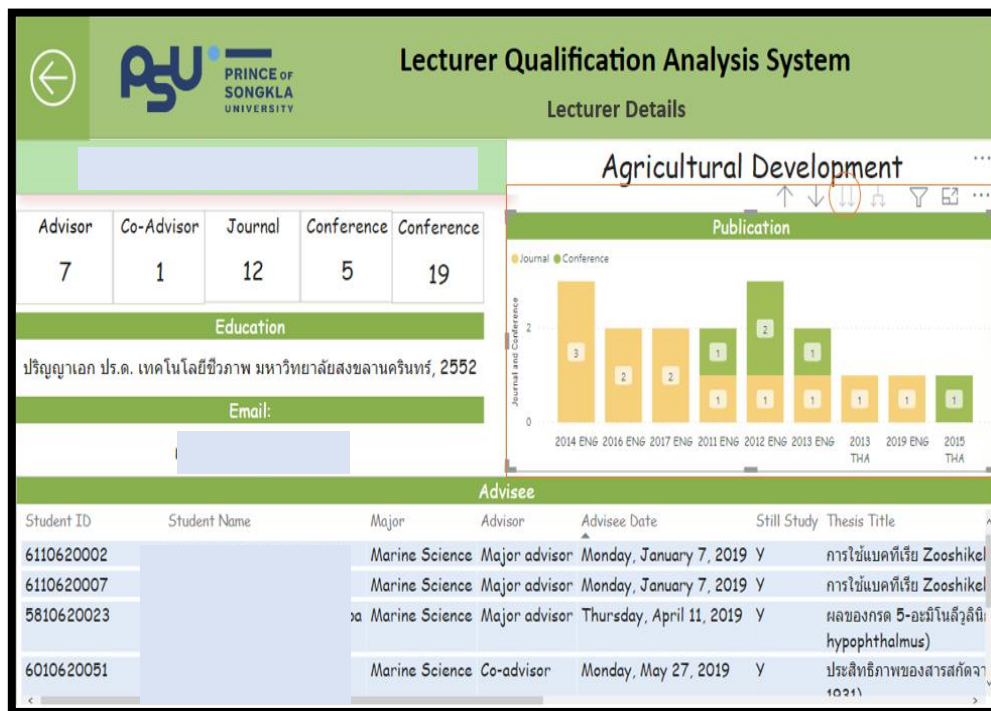


Figure 7 The example of drill down data in the publication bar chart

3. Results and Discussion

This section consisted of two main evaluations: (1) the quality of ETL workflows, and (2) users' satisfaction.

3.1 Results of ETL Workflow based on QOX

In this study, the quality evaluation of the designed ETL workflow was based on four key dimensions: accuracy, completeness, efficiency, and scalability.

3.1.1 Accuracy

For accurate testing, the data provided through simple random sampling was run in each ETL workflow and compared using mapping method as presented in Figure 8. The results compared five times, showed the accuracy mappings, even though the data sets were different. Testing the ETL workflow across all three instances, with five runs, revealed an average accuracy rate of 99.99% as shown in Table 9. The findings demonstrate a high accuracy rate of 99.99%,

which aligns with recent research in BI systems that utilize other approach such as machine learning models. For instance, studies conducted by Bony *et al.* (2024), Biaojun *et al.* (2021), Wang (2023), and Susilo and Susanto (2024) reported accuracy levels ranging from 85% to 98%. This consistency highlights the effectiveness of this BI system. The results demonstrate that the accuracy achieved falls within the accepted range established by previous research, confirming the effectiveness of the methodology of this study.

Table 9 The experiment results of accuracy

ETL	Accuracy running tests					
	1	2	3	4	5	%
LecProfile	100	100	100	100	100	100
LectAdvisor	100	100	100	100	100	100
LecPublication	99.98	99.98	99.98	99.98	99.98	99.98
Average	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99

Table 10 The experiment results of completeness

ETL Workflow	Source file (rows)	Target file (rows)	Missing data (rows)	Completeness (0 – 1)
LecAdvisor	181	181	0	1
LecProfile	129	129	15	0.88
LecPublication	2,086	2,086	310	0.85

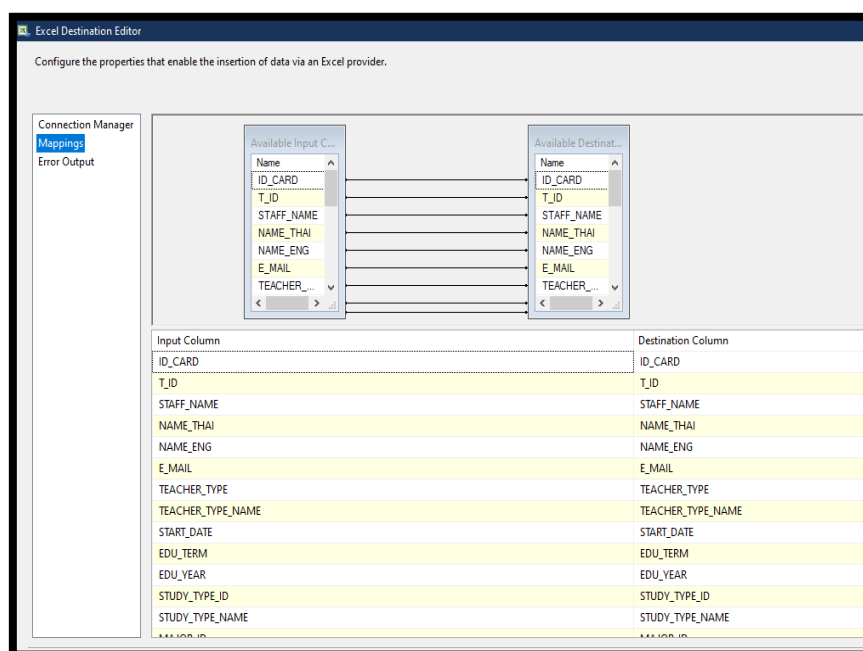


Figure 8 The example mapping comparison between source and target

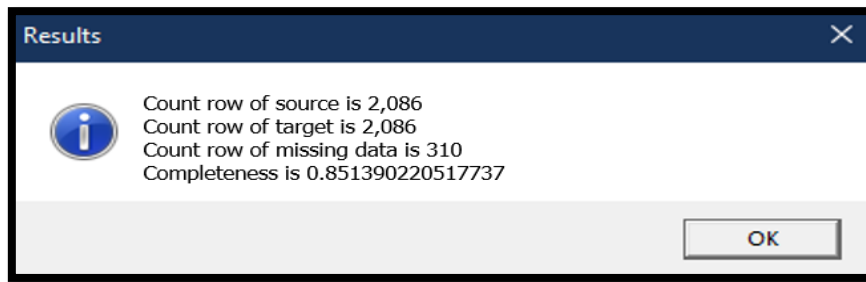


Figure 9 The results of completeness evaluation in LecPublication workflow

3.1.2 Completeness

For the completeness evaluation, the study systematically analyzed the number of rows in both the source and target files, identified rows with missing data, and calculated the completeness value for each ETL workflow. Initial results revealed a completeness value of 85%, with Figure 9 illustrating the evaluation outcomes for the LecPublication workflow. Table 10 presents the experimental results, showing that the LecAdvisor workflow achieved a completeness value of 1, indicating optimal completeness. However, the LecProfile and LecPublication workflows initially recorded completeness values below 1 due to missing data in

the source files. To address this issue, the ETL workflow scripts were modified to include conditions for handling null values, excluding rows with null values from the missing data count. After these adjustments, all three workflows—LecAdvisor, LecProfile, and LecPublication—achieved a completeness value of 1 in the final run. This demonstrates that the ETL workflow, when properly optimized, can deliver high completeness in data management. When compared with the literature, the initial completeness value of 85% falls within the acceptable range reported in similar studies. For instance, Zineb and Rachid (2023) and Cheruku *et al.* (2024) highlighted challenges of obtaining complete datasets from diverse sources, aligning with the findings of this study. The subsequent modifications to the ETL workflow, which improved the completeness value to 1, underscore the effectiveness of tailored data management strategies in enhancing data quality. Achieving a completeness value of 1, as seen in the LecAdvisor workflow, corroborates previous research findings, which suggest that well-designed

ETL solutions can effectively mitigate data quality issues related to completeness. These improvements not only enhance the integrity of the data being analyzed but also support more reliable decision-making processes, which are critical for the success of BI systems. These insights emphasize the importance of continuous refinement of ETL processes to ensure high data quality. Future research will explore the impact of specific ETL modifications on completeness and other data quality dimensions across various contexts, with ongoing efforts to refine and improve these metrics in future iterations.

3.1.3 Scalability

For the scalability experiment, the number of rows in each ETL workflow was increased by 5 times and 10 times, as presented in Table 11. The results of all compiled experiments demonstrated success, indicating that the workflows maintained their performance even with the increased data volume. Specifically, the execution times for the LecAdvisor and LecPublication workflows increased proportionally with the number of additional rows. In contrast, the execution time for the LecProfile workflow did not increase significantly, likely due to its simpler algorithm and flow. Despite the increases in data volume, the total execution time across all three ETL workflows remained less than a minute. This finding suggests that the ETL workflows developed in this study exhibit scalability in terms of running time. When comparing the scalability results to previous research, the workflows' ability to efficiently handle increased data loads aligns with findings from studies like those by Cheruku *et al.* (2024) and Gueddoudj and Chikh, (2023), which emphasize the importance of scalable architecture in ETL processes.

Table 11 The experiment results of scalability

ETL workflow	Raw data from sources		Increasing rows		
	Number rows	of Usage time (Sec)	Increasing rows	Compiled results	Usage time (Sec)
LecAdvisor	3,408	3.49	5x	✓	15.05
			10x	✓	24.64
LecProfile	129	3.81	5x	✓	4.05
			10x	✓	4.50
LecPublication	3,705	8.66	5x	✓	14.08
			10x	✓	17.17

Their research indicates that efficient ETL systems can process larger datasets with minimal impact on performance, similar to the outcomes observed in this study. Additionally, the scalability demonstrated in our workflows aligns with insights from Szilveszter *et al.* (2024), who highlighted that well-designed ETL workflows can adapt to growing data volumes without significant performance degradation. These comparisons underscore the effectiveness of our ETL design, affirming that it not only meets current data processing needs but is also well-prepared to handle future demands as data volumes continue to expand. Overall, these results reinforce the notion that scalability is a crucial attribute of ETL workflows, ensuring that organizations can maintain high performance levels despite increasing data challenges. Future studies could delve deeper into specific aspects of scalability to uncover potential optimizations and further enhance the efficiency of ETL processes across different applications.

3.1.4 Efficiency

In the efficiency evaluation, experiments were conducted to measure the computing time for each ETL workflow, as presented in Figure 10 and Table 12. The workflow running times for LecAdvisor, LecProfile, and LecPublication were 3.49, 3.81, and 9.85 minutes, respectively, totaling 17.15 minutes for total all three

workflows combined. Compared to the manual-based system, which took approximately 3 hours and 19 minutes, the ETL workflows demonstrated significant time savings. This result clearly indicates that preparing data with the ETL workflow is far more efficient than using a manual-based system. These efficiency gains highlight the benefits of automating data processing tasks, enabling faster execution and freeing up valuable time that can be redirected toward more strategic activities. When compared to previous research, these findings are consistent with studies that emphasize the efficiency improvements offered by ETL processes. For example, Cheruku *et al.* (2024) and Mayuk *et al.* (2021) discuss how automation in ETL can substantially reduce data processing times, an observation that is corroborated by our results. This dramatic reduction in processing time underscores the potential of ETL systems to streamline operations and enhance productivity. Overall, the efficiency of our ETL workflows not only reduces time consumption but also minimizes the likelihood of human error, further strengthening the reliability and accuracy of data processing. Future research could explore additional techniques or technological advancements that could further improve the efficiency of ETL workflows, thus providing even greater benefits in data management and analysis.

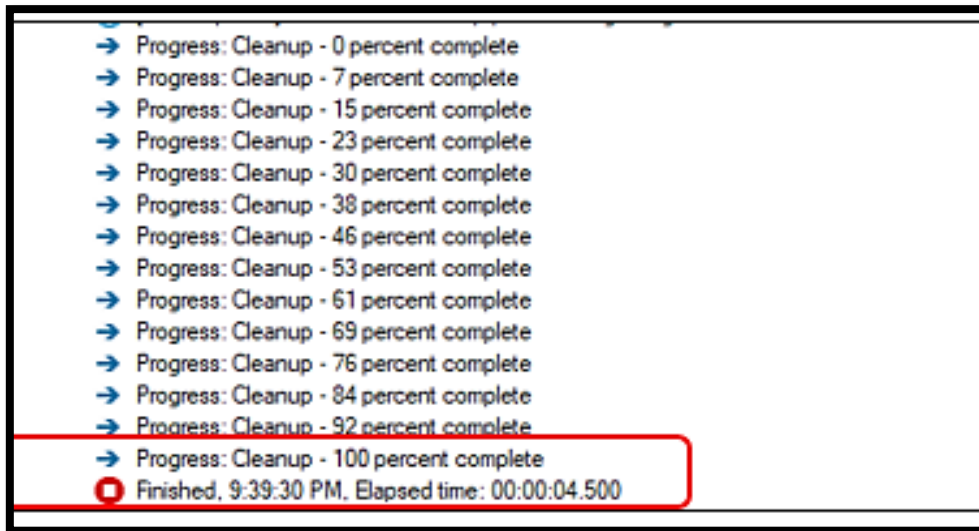


Figure 10 The example screen of ETL processing

Table 12 The experiment results of efficiency

ETL Times running	Runtime Duration (Seconds)		
	LecProfile	LecAdvisor	LecResearch
1	3.03	2.58	4.00
2	3.24	2.58	22.19
3	3.00	2.81	22.15
4	3.08	3.52	8.63
5	3.02	2.53	21.94
6	3.02	2.49	16.50
7	2.98	16.93	2.11
8	3.36	2.75	2.13
9	2.81	2.53	2.14
10	2.94	2.66	16.51
11	3.34	2.89	2.27
12	3.13	2.50	16.68
13	3.16	2.50	16.67
14	17.11	2.95	2.28
15	3.34	2.93	16.64
16	3.06	2.58	1.92
17	3.27	2.50	1.91
18	3.17	2.60	16.29
19	2.95	2.55	1.94
20	3.25	4.50	2.03
Average	3.81	3.49	9.85

3.2 Results of Users' Satisfaction

For the satisfaction evaluation, 44 complete questionnaires were analyzed using descriptive statistics. The results indicated that the overall user satisfaction level was very good, with an average score of 4.58, and standard deviation values below 1.0, as presented in Table 13. These results reflect a high level of user satisfaction with the Learning Quality Assurance System (LQAS). Specifically, the average scores for the three evaluated aspects were all above 4.50, highlighting a particularly high level of satisfaction with the quality of information provided. These findings suggest that users perceive the system as highly effective and reliable, particularly in terms of the quality

of the information it delivers. This high satisfaction level aligns with user experience studies that emphasize the importance of information quality in influencing overall satisfaction with digital systems. The consistently high scores across different evaluation categories reinforce the system's value in meeting user expectations and needs. Overall, the positive feedback from users not only validates the system's design and functionality but also underscores the importance of continuous improvement to maintain high standards of satisfaction. Future studies could focus on exploring specific aspects of user experience that contribute to satisfaction, aiming to identify potential areas for further enhancement in the system.

Table 13 The users' satisfaction results

Issue	Mean	S.D.	Satisfaction
Information Quality			
- Information completeness	4.58	0.61	Very good
- Sufficient data for decision making	4.67	0.40	Very good
- Sufficient data for SCGSP analysis	4.66	0.48	Very good
- Accurate reports	4.52	0.45	Very good
- Accurate data compiled based on SCGSP	4.53	0.44	Very good
Perceived Ease of Use			
- Easy usage	4.55	0.43	Very good
- Incomplex process for usage	4.65	0.48	Very good
- Good Graphic User Interface (GUI)	4.54	0.49	Very good
- Easy searching	4.50	0.50	Good
- Understanding of data visualization	4.50	0.56	Good
Perceived Usefulness			
- Reducing time for searching	4.63	0.57	Very good
- Reducing the time for file preparation	4.47	0.63	Good
- Convenience for SCGSP analysis	4.56	0.51	Very good
- Usefulness for Faculty	4.65	0.53	Very good
Total	4.58	0.50	Very good

4. Conclusion

This study demonstrates the transformative potential BI systems, supported by a robust ETL workflow, in addressing challenges related to evaluating lecturer qualifications and ensuring compliance with higher education standards in Thailand. The QOX provided a systematic framework for evaluating workflow attributes, achieving high accuracy, completeness, and significant time savings compared to manual processes. High user satisfaction scores further validated the system's effectiveness in terms of information quality, ease of use, and perceived usefulness. The study shows that advanced BI systems with efficient ETL workflows can drastically improve operational efficiency, reduce processing times, and enhance data quality, enabling faster, more informed decision-making. It also highlights the importance of scalability and user-centric design, ensuring adaptability to larger datasets and fostering trust in technology-driven solutions. Methodologically, the QOX framework offers a novel approach to evaluating ETL workflows. Practically the BI system serves as a model for similar institutions. Empirically, the study contributes to the literature on technology adoption in education, encouraging policymakers and leaders to invest in advanced data management technologies to enhance compliance, operational efficiency, and standardization in higher education. Despite its contributions, this study has limitations. Its focus on Thai higher education may limit generalizability, and reliance on user feedback could introduce bias. The study emphasized technical aspects of the ETL workflow and BI system, with less attention to organizational or cultural factors influencing implementation. Additionally, scalability was tested in a controlled environment, leaving real-world performance unvalidated. Future research could expand to diverse educational contexts, conduct longitudinal studies, and explore organizational culture, leadership, and training in BI system adoption. Integrating emerging technologies like AI and machine learning, as well as testing scalability in large-scale, real-world settings, could further enhance the system's applicability and

robustness, advancing BI systems in higher education and beyond.

5. Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the support of Management of Information Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University for its support in the successful completion of this research.

6. References

- Arputhamary, B. and Arockiam, L. 2015. Data integration in Big Data environment. *Bonfring International Journal of Data Mining* 5(1): 1-5.
- Ashfaq, M., Yun, J., Yu, S. and Loureiro, S.M.C. 2020. I Chatbot: Modeling the determinants of users' satisfaction and continuance intention of AI-powered service agents. *Telematics and Informatics* 54: 101473.
- Astriani, W. and Trisminingsih, R. 2016. Extraction, Transformation, and Loading (ETL) module for hotspot spatial data warehouse using geokettle. *Procedia Environmental Sciences* 33: 626-634.
- Awad, M.M., Abdullah, M.S. and Ali, A.B.M. 2011. Extending ETL framework using service-oriented architecture. *Procedia Computer Science* 3: 110-114.
- Awiti, J., Vaisman, A.A. and Zimányi, E. 2020. Design and implementation of ETL processes using BPMN and relational algebra. *Data & Knowledge Engineering* 129: 101837.
- Azeroual, O., Saake, G. and Abuosba, M. 2019. ETL best practices for data quality checks in RIS Databases. *Informatics* 6(10): 1-13.
- BiaoJun, L., Yao, C., Zheng, F., Wang, L., Dai, J. and Xiang, Q. 2021. "Intelligent decision support system for business forecasting using artificial intelligence." *Arabian Journal for Science and Engineering* 46(1): 1-11.
- Bony, M.N.V., Das, P., Pervin, T., Shak, M.S., Akter, S., Anjum, N., Alam, M., Akter, S. and Rahman, M.K. 2024. Comparative performance

- analysis of machine learning algorithms for business intelligence: a study on classification and regression models. **Frontline Marketing, Management and Economics Journal** 4(11): 72-92.
- Chakraborty, A., Maji, A. and Saha, T. 2021. Transparency in higher education assessment standards: A case study from Thailand. **Higher Education Research & Development** 40(1): 125-140.
- Chen, Y. and Lin, Z. 2021. Business intelligence capabilities and firm performance: A study in China. **International Journal of Information Management** 57: 102232.
- Cheruku, S.R., Goel, O. and Jain, S. 2024. A Comparative Study of ETL Tools: DataStage vs. Talend. **Journal of Quantum Science and Technology** 1(1): 80.
- Cho, H., Chi, C. and Chiu, W. 2020. Understanding sustained usage of health and fitness apps: Incorporating the technology acceptance model with the investment model. **Technology in Society** 63: 101429.
- Davis, F.D. 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. **MIS quarterly** 13(3): 319-339.
- Dayal, U., Castellanos, M., Simitsis, A. and Wilkinson, K. 2009. Data integration flows for business intelligence, pp. 1-11. *In Proceedings of the 12th International Conference on Extending Database Technology: Advances in Database Technology*. Saint Petersburg, Russia.
- Gaardboe, R., Nyvang, T. and Sandalgaard, N. 2017. Business intelligence success applied to healthcare information systems. **Procedia Computer Science** 121: 483-490.
- Geetha, S., Dhanani, K.R. and Doshi, P.P. 2020. Data analysis and ETL tools in business intelligence. **International Research Journal of Computer Science** 7(5):127-132.
- Girsang, A.S., Isa, S.M. and Ginzal, M.E.C. 2020. Implementation of journalist business intelligence in social media monitoring system. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal** 5: 1517-1528.
- Guan, C., Mou, J. and Jiang, Z. 2020. Artificial intelligence innovation in education: a twenty-year data-driven historical analysis. **International Journal of Innovation Studies** 4(4): 134-147.
- Gueddoudj, E.Y. and Chikh, A. 2023. Towards a scalable and efficient ETL. **International Journal of Computing and Digital Systems** 14(1): 10223-10231.
- Haenlein, M. and Kaplan, A. 2021. Artificial intelligence and robotics: Shaking up the business world and society at large. **Journal of Business Research** 124(C): 405-407.
- Jansawang, N., Insumran, Y. and Kenaphoom, S. 2025. Quality Assurance for Lifelong Education. **A Comprehensive Review. ONESQA Quality Assurance in Education Journal** 1(1): 1-19.
- Khan, N., Iqbal, S. and Mahboob, T. 2015. A comparative study of data quality management in data warehouses. **International Journal of Computer and Communication System Engineering** 2: 464-471.
- Khatibi, V., Keramati, A. and Shirazi, F. 2020. Deployment of a business intelligence model to evaluate Iranian national higher education. **Social Sciences & Humanities Open** 2(1): 100056.
- Khatir, N. and Madani, H. 2024. The impact of digital transformation on achieving outstanding performance in educational administration. **International Journal of Educational Management** 38(7): 1821-1838.
- Kleesuwat, S., Mitatha, S., Yupapin, P.P. and Piyatamrong, B. 2010. Business intelligence in Thailand's higher educational resources management. **Procedia-Social and Behavioral Sciences** 2(1): 84-87.
- Koivumäki, T., Ristola, A. and Kesti, M. 2008. The effects of information quality of mobile information services on user satisfaction and service acceptance-empirical evidence from

- Finland. **Behaviour & Information Technology** 27(5): 375-385.
- Liu, D. 2024. October. Business Intelligence Tools for Data Extractions Transformations and Visualizations, pp. 1-4. *In 2024 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. IEEE, Washington DC, USA.
- Lucas, A. 2010. Corporate data quality management: From theory to practice, pp. 1-7. *In 5th Iberian Conference on Information Systems and Technologies*. IEEE, Santiago de Compostela, Spain.
- Marshall, L. and De La Harpe, R. 2009. Decision making in the context of business intelligence and data quality. **South African Journal of Information Management** 11(2): 1-15.
- Mayuk, V., Falchuk, I. and Muryjas, P. 2021. The comparative analysis of modern ETL tools. **Journal of Computer Sciences Institute** 19: 126-131.
- Ministry of Higher Education. 2022. **Higher Education Program Standards B.E. 2022 Title: Science and Research, and Innovation**. Government Gazette vol.135, Special Part 212. (date September 9, 2022). (in Thai)
- Moreno, V., Cavazotte, F. and de Souza Carvalho, W. 2020. Business intelligence and analytics as a driver of dynamic and operational capabilities in times of intense macroeconomic turbulence. **The Journal of High Technology Management Research** 31(2): 100389.
- Mukul, E. and Büyüközkan, G. 2023. Digital transformation in education: A systematic review of education 4.0. **Technological Forecasting and Social Change** 194: 122664.
- Nethravathi, R., Sathyanarayana, P., Vidya Bai, G., Spulbar, C., Suhan, M., Birau, R. and Ejaz, A. 2020. Business intelligence appraisal based on customer behaviour profile by using hobby-based opinion mining in India: a case study. **Economic research-Ekonomska istraživanja** 33(1): 1889-1908.
- Niño, H.A.C., Niño, J.P.C. and Ortega, R.M. 2020. Business intelligence governance framework in a university: Universidad de la cost a case study. **International Journal of Information Management** 50: 405-412.
- Pikhart, M. 2020. Intelligent information processing for language education: The use of artificial intelligence in language learning apps. **Procedia Computer Science** 176: 1412-1419.
- Saebao, S., Matayong, S. and Trakulmaykee, N. 2020. QOX based ETL design for business intelligence system of lecturers' qualifications analysis, pp. 539-542. *In 2020 17th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. IEEE, Phuket, Thailand.
- Samir Abdel-Moneim, M., Hamed El-Bastawissy, A. and Hamed Kholief, M. 2015. Quality Driven Approach for Data Integration Systems, pp. 409-420. *In Proceedings of the 7th International Conference on Information Technology*. AL-Zaytoonah University, Amman, Jordan.
- Simitsis, A., Gupta, C., Wang, S. and Dayal, U. 2010. Partitioning real-time ETL workflows, pp. 159-162. *In 2010 IEEE 26th International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW 2010)*. IEEE, Long Beach, CA, USA.
- Simitsis, A., Wilkinson, K., Castellanos, M. and Dayal, U. 2009. QOX-driven ETL design: reducing the cost of ETL consulting engagements, pp. 953-960. *In Proceedings of the 2009 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. MachineryNew YorkNYUnited States.
- Souibgui, M., Atigui, F., Zammali, S., Cherfi, S. and Yahia, S.B. 2019. Data quality in ETL process: A preliminary study. **Procedia Computer Science** 159: 676-687.
- Susilo, B.W. and Susanto, E. 2024. Employing Artificial Intelligence in Management Information Systems to Improve Business Efficiency.

- Journal of Management and Informatics**, 3(2): 212-229.
- Szilveszter, M., Molnár, G. and Nagy, E. 2024. April. Comparison of commercial and open source ETL tools, pp. 000037-000042. *In* **2024 IEEE 11th International Conference on Computational Cybernetics and Cyber-Medical Systems (ICCC)**. IEEE, Hanoi, Vietnam.
- Theodorou, V., Jovanovic, P., Abellò, A. and Nakuçi, E. 2017. Data generator for evaluating ETL process quality. **Information Systems** 63: 80-100.
- Ubachs, G. and Henderikx, P. 2022. Quality assurance systems for digital higher education in Europe, pp. 1-20. *In* **Handbook of Open, Distance and Digital Education**. Springer Nature Singapore, Singapore.
- Wand, Y. and Wang, R.Y. 1996. Anchoring data quality dimensions in ontological foundations. **Communications of the ACM** 39(11): 86-95.
- Wang, C. and Teo, T.S. 2020. Online service quality and perceived value in mobile government success: An empirical study of mobile police in China. **International Journal of Information Management** 52: 102076.
- Wang, G. and Song, J. 2017. The relation of perceived benefits and organizational support to user satisfaction with building information model (BIM). **Computers in Human Behavior** 68: 493-500.
- Wang, J. and Liu, B. 2020. Design of ETL tool for structured data based on data warehouse, pp. 1-5, *In* **Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science and Application Engineering**. ACM, New York, United States.
- Wang, N. 2023. Design of an intelligent processing system for business data analysis based on improved clustering algorithm. **Procedia Computer Science** 228: 1215-1224.
- Wang, Y. 2021. Educational management system of colleges and universities based on embedded system and artificial intelligence. **Microprocessors and Microsystems** 82: 103884.
- Xu, F. and Du, J.T. 2019. Examining differences and similarities between graduate and undergraduate students' user satisfaction with digital libraries. **The Journal of Academic Librarianship** 45(6): 102072.
- Zineb, L. and Rachid, F. 2023. November. ETL Technologies for Big Data: A Comparative Study, pp. 1-6. *In* **2023 IEEE International Conference on Advances in Data-Driven Analytics And Intelligent Systems (ADACIS)**. IEEE, Marrakesh, Morocco.



Research Article

Vermicomposting Mushroom Waste to Enhance Phoenix Oyster Mushroom (*Pleurotus pulmonarius*) Cultivation via Circular Economy

Arpapan Satayavibul and Tantus Piekkoontod *

Environmental Health and Disasters Program, Department of Science and Technology, Suan Dusit University, Bang Phlat, Bangkok 10700, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-08-08

Revised: 2025-03-30

Accepted: 2025-04-01

Keywords:

vermicompos;

phoenix;

oyster mushroom;

circular economy

This research aimed to study the yield of Phoenix oyster mushrooms (*Pleurotus pulmonarius*) using vermicompost derived from spent mushroom substrate. The vermicompost was produced by using spent mushroom compost as both food and habitat for earthworms. Vermicompost was mixed to replace rice bran in ratios of 100%, 75%, 50%, 25%, and a control group without vermicompost. The experiment followed a completely randomized design (CRD). Nutrient analysis of the vermicompost produced from the spent mushroom substrate revealed moisture content of 20.29–36.35%, pH of 7.51–8.24, total nitrogen of 1.21–1.64%, total phosphorus of 0.52–0.77%, total potassium of 4.34–5.23%, and a carbon-to-nitrogen ratio of 15.90–31.40. These values comply with the organic fertilizer standards of the Department of Agriculture of Thailand. Analysis of phoenix oyster mushroom yield using vermicompost as a substrate mixture showed that the 75% vermicompost ratio produced the highest fresh weight and stem length. The number of mushrooms and cap diameter also tended to be highest at this ratio. The yield in terms of fresh weight and cap diameter of Phoenix oyster mushrooms was significantly different from that of mushrooms grown without vermicompost, whereas the number of mushrooms and stem length did not show significant differences across all treatments. These findings suggest that vermicompost enhances mushroom growth compared with the original formula without vermicompost.

© 2025 Satayavibul, A. and Piekkoontod, T. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

Currently, increased consumption has led to greater resource use, resulting in the depletion of natural resources due to production processes and the generation of substantial waste. Consequently, the concept of the circular economy has garnered widespread attention and cooperation. Mushrooms are agricultural products with high production potential, including oyster mushrooms (*Pleurotus ostreatus*), Phoenix oyster mushrooms (*Pleurotus pulmonarius*),

jelly ear mushrooms (*Auricularia polytricha*), and straw mushrooms (*Volvariella volvacea*). In 2020, Thailand produced approximately 150,000 tons of mushrooms, valued at over 9 billion baht (266 million USD) (Chinnawong and Longja, n.d.). After mushroom cultivation, a large amount of spent mushroom substrate remained in the area (Nopparatmaitree *et al.*, 2017), posing a disposal problem. One method of disposing of organic waste is vermicomposting, where earthworms break down the waste into nutrient-rich compost. Vermicompost not only reduces organic

* Corresponding author.

E-mail address: Tantus.aek@gmail.com

Cite this article as:

Satayavibul, A. and Piekkoontod, T. 2025. Vermicomposting Mushroom Waste to Enhance Phoenix Oyster Mushroom (*Pleurotus pulmonarius*) Cultivation via Circular Economy. *Recent Science and Technology* 17(2): 264330.

waste but also enhances plant growth and soil health. It consists of fine, brownish-black granules that are light, airy, with good drainage and air circulation. It has a high moisture capacity and contains abundant organic matter. This results from the decomposition of organic waste by earthworms. The activity of microorganisms and digestive juices in the earthworms' intestines converts nutrients from organic debris into forms that plants can utilize.

Previous research has explored the use of various waste materials as components in mushroom cultivation or as a fertilizer for other crops. For instance, empty palm fruit bunches have been used to make straw mushroom substrates, and spent mushroom lumps have been used as a fertilizer in mangosteen orchards. This practice was found to increase the availability of secondary nutrients, supplementing but not entirely replacing chemical fertilizers (Kuntad *et al.*, 2012). Additionally, waste materials such as pineapple pulp, sawdust, and bamboo left over from chopstick production have been successfully utilized in the cultivation of Phoenix oyster mushrooms (Srinak *et al.*, 2012; Pongthornpruek and Kraiwuttinan, 2013). Moreover, the fronds or petioles of oil palm that are cut off and allowed to decompose naturally can be used as a material for growing mushrooms as well (Seephueak *et al.*, 2021). From the above information, therefore, this

research applies the circular economy concept to the Phoenix oyster mushroom farm community enterprise. It utilizes spent Phoenix oyster mushroom compost as food and bedding for earthworms. The resulting vermicompost is then used as an ingredient in Phoenix oyster mushroom compost. This approach comprehensively repurposes agricultural waste to enhance productivity and improve the soil structure and chemical properties, providing essential plant nutrients, reducing reliance on chemical fertilizers, and returning organic matter to the soil. This enhances soil fertility, making it suitable for the next cultivation season.

2. Materials and Methods

2.1 Preparing habitat and food for earthworms

The spent mushroom substrates were sun-dried to eliminate fungi that might grow in the mushroom compost. After that, they were mixed with cow manure in a ratio of 1:1 to be used as bedding and food for African Night Crawler earthworms (*Eudrilus eugeniae*). Vermicompost samples were collected every 15 days for 45 days and analyzed for mineral nutrients, including moisture, pH, total nitrogen (Total N), total phosphorus (Total P_2O_5), total potassium (Total K_2O), and carbon to nitrogen ratio (C/N ratio), and the analytical methods are shown in Table 1.

Table 1 Analytical methods of the vermicompost

Parameters	Method
Total Nitrogen	Total Kjeldahl method
Phosphorous (Total P_2O_5)	Vanadomolybdate (Barton) method
Potassium (Total K_2O)	Atomic Emission Spectrophotometry
C/N ratio	Walkley Black modified acid-dichromate digestion, $FeSO_4$ titration method
pH	pH meter
Moisture content	Oven - drying method

2.2 The productivities of phoenix oyster mushroom with vermicompost

In this study, a Completely Randomized Design (CRD) was employed to evaluate the effects of five different vermicompost formulas derived from spent mushroom compost. The formulas replaced rice bran in varying proportions: 0% (control), 25%, 50%, 75%, and 100% vermicompost. The experiment was conducted over 30 days. Data were collected on fresh weight, number of fruiting bodies, cap diameter, and stem length.

Mushroom compost, the mixing ratio includes 100 kilograms of rubberwood sawdust, 5 kilograms of rice bran, 1 kilogram of rice flour, 0.2 kilograms of magnesium sulfate, 1 kilogram of calcium carbonate, and 60-70% clean water. Vermicompost is used to replace rice bran in different proportions: 0% (control), 25%, 50%, 75%, and 100% vermicompost. After preparing the formula with various ratios, mix all the ingredients together as shown in Figure 1(a) and put them in plastic bags for mushrooms cultivation. Immediately steam the spawns to pasteurize for about 3-4 hours, then let them cool, as shown in Figure 1(b). Transfer the phoenix oyster mushroom spawn cultivated on sorghum seeds, using approximately 10-20 seeds per inoculum, into the cooled substrate mixture under aseptic conditions. Immediately seal the cultivation bags with sterile cotton plugs to prevent contamination. Maintain aseptic conditions in the transfer area and sterilize inoculation tools with alcohol between each use to prevent contamination. Place the inoculated spawn substrates in an incubator with controlled temperature and humidity conditions. After sufficient mycelial colonization of the substrate, fruiting bodies will begin to form within approximately 3-4 days. All experimental replications were conducted within controlled cultivation facilities where temperature, humidity, and light conditions were uniformly maintained across all treatments. Collect mushroom samples daily for 30 days, analyzing the yield by measuring the size and weight of the phoenix oyster mushrooms in term of g/bag.



(a)



(b)

Figure 1 Sample preparation for each experiment; ingredients for each experimental formula (a), incubation stage (b)

2.3 Data analysis

Data were collected on phoenix oyster mushroom growth, including the fresh weight, the number of fruiting bodies, the diameter of the mushroom caps, and the length of stalk. The data were analyzed using SPSS software, and differences between treatments were compared with the Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at a 95% confidence level.

3. Results and Discussion

3.1 Properties of vermicompost

The results of the nutrient content in vermicompost produced from spent phoenix oyster mushroom substrate. During the time of the experiment,

it was found that the moisture content was 25.2%, the pH was 7.81, the total nitrogen was 1.43%, the total phosphorus was 0.61%, the total potassium was 4.82%, and the C/N ratio was 26.17%, respectively. All values are in accordance with the organic fertilizer standards of the Department of Agriculture of Thailand. The composition of nitrogen, phosphorus, and potassium in the compost depends on the type of organic waste. Vermicompost is effective due to their fine texture, porosity, ventilation and humidity. These characteristics influence the activity of microorganisms, soil nutrient absorption, and plant growth (Jaitea, 2015).

According to the report of Sriwongchai (2017), it was found that spent mushroom compost has a main component of lignocellulose and contains structures such as cellulose and hemicellulose, which make up more than 50% of its dry weight. The study by Chuphong *et al.* (2012) produced vermicompost from water hyacinth. It was found that waste materials were used as food and bedding for earthworms, including sawdust, dry rice straw, crushed eggshells, and paper. The materials used for mushroom and water hyacinth cultivation were mixed in the ratio of 1:1:1:1:1:3. This experiment found a moisture content of 24.67%, a pH of 8.2, a total nitrogen content of 1.44%, a total phosphorus content of 1.05%, a total potassium content of 2.08%, and a carbon to nitrogen ratio of 25%. In addition, Jianwichayakul and Somniyam (2021) studied vermicompost from water hyacinth. The local earthworms *Polypheretima elongata* (PE) and the commercial earthworm *E. eugeniae* (EE) were grown on food with four different ratios of water hyacinth and cow manure: water hyacinth (control), water hyacinth (WH) to cow manure (CM) at 3:1, 4:1, and 5:1. The

results of the study found that EE produced vermicompost with higher total N and organic matter than PE, but the total P, total K and pH were not different. The ratio of water hyacinth and cow manure is suitable for producing vermicompost. It was found that using a ratio of 4:1 gave the highest yield, but the nutrient content did not differ across all treatments.

3.2 Effects of vermicompost on the quality of phoenix oyster mushrooms

3.2.1 Total weight and number of fruiting bodies of phoenix oyster mushrooms

Regarding the fresh weight, the results showed significant differences between the control and vermicompost formulas. The formula with 75% vermicompost yielded the highest average fresh weight of 43.17 grams, followed by the 100% vermicompost formula, which had an average of 42.09 grams. The use of the 50% and 25% vermicompost formulas resulted in average fresh weights of 40.97 and 40.24 g, respectively. The control (0% vermicompost) had the lowest average fresh weight at 34.26 g/bag (Table 2).

Regarding the number of fruiting bodies, no significant differences were observed between the formulas. The 100% vermicompost formula had the highest average number of flowers at 5.05 basidiocarps/bag. This was followed by the 25% and 75% vermicompost both with an average of 4.90 basidiocarps/bag. The 50% vermicompost formula had an average of 4.84 basidiocarps/bag, while the control group had the lowest average number of flowers at 4.66 basidiocarps/bag. The productivity of the Phoenix oyster mushroom is shown in Table 2.

Table 2 Productivities of phoenix oyster mushroom in the first flush

Vermicompost:Rice bran (v/v)	Fresh weight (g /bag)	Number of fruiting bodies (basidiocarp/bag)
0 : 100	34.26±1.51 ^{b 1/}	4.66±0.09
25 : 75	40.24±1.67 ^a	4.90±0.32
50 : 50	40.97±1.70 ^a	4.84±0.13
75 : 25	43.17±7.08 ^a	4.90±0.17
100: 0	42.09±2.38 ^a	5.05±0.23

Note: ^{1/} Mean values within the same columns followed by different superscript letters are significantly different according to Duncan's multiple range test (P<0.05).

3.2.2 Yields and basidiocarps of phoenix oyster mushroom

The productivity of phoenix oyster mushrooms, in terms of cap diameter, varied significantly between the control and the vermicompost formulas. The 100% vermicompost formula had the largest average cap diameter measuring 41.62 mm, followed by the 50% vermicompost formula at 41.35 mm. The 75% and 25% vermicompost formulas had average diameters of 40.59 and 40.06 mm, respectively. The control, which did not contain

vermicompost, had the smallest average cap diameter at 34.60 mm, as shown in Table 3.

There was no significant difference in the average stalk length of phoenix oyster mushrooms among the formulas. The formula mixed with 75% vermicompost had the highest average stalk length of 43.38 mm, followed by the 25% vermicompost formula with an average stalk length of 42.77 mm. The 100% and 50% vermicompost formulas had average stalk lengths of 42.23 and 41.92 mm., respectively. The lowest stalk length was observed in the control group, which did not contain vermicompost, measuring 41.09 mm, as indicated in Table 3 and Figure 2.

Table 3 Cap diameter and stalk length of phoenix oyster mushroom in different formulations

Vermicompost : Rice bran	Basidiocarp	
	Cap diameter (mm.)	Stalk length (mm.)
0:100	34.60±1.34 ^{b 1/}	41.09±3.09
25 :75	40.06±1.95 ^a	42.77±6.89
50 : 50	41.35±1.78 ^a	41.92±2.11
75 : 25	40.59±1.92 ^a	43.38±7.30
100:0	41.62±1.53 ^a	42.23±1.95

Note: ^{1/} Mean values within the same column followed by different superscript letters are significantly different according to Duncan's new multiple range test (P<0.05).



Figure 2 Productivities of phoenix oyster mushroom in the first flush

The study of the effect of vermicompost on the basidiocarp of phoenix oyster mushrooms, in terms of yield, total number of basidiocarp, cap size and stalk length, is consistent with the study by Tudsas *et al.* (2018), which reported that the use of vermicompost at a ratio of 40% increased the total weight of straw mushrooms (*V. volvacea*). The highest average total yield of straw mushroom was 444.01 grams per pile. The highest average number of basidiocarps was 36.67 flowers per pile. The highest average number of button-shaped basidiocarps was 4.67 per pile.

3.2.3 Production cost and yield analysis

The study analyzed the cost and return of phoenix oyster mushroom (*P. pulmonarius*) cultivation using vermicompost-amended substrates compared to traditional substrates. The total production cost per kilogram of mushrooms was lower with the vermicompost treatment (47-55 THB/kg) than with the traditional substrate (50-60 THB/kg). The use of vermicompost resulted in a yield increase of 15-20%, with vermicompost-amended substrates producing 300-350 kg per 1,000 bags, compared to 250-300 kg per 1,000 bags in the traditional system.

4. Conclusion

This study demonstrates the efficacy of vermicompost derived from spent phoenix oyster mushroom substrate as a nutritionally viable growing medium for subsequent mushroom cultivation. The vermicompost produced exhibited nutrient parameters (moisture content 20.29-36.35%, pH 7.51-8.24, total nitrogen 1.21-1.64%, total phosphorus 0.52-0.77%, total potassium 4.34-5.23%, and C/N ratio 15.90-31.40) that comply with Department of Agriculture organic fertilizer standards. Experimental results indicate that the substrate containing 75% vermicompost yielded optimal production metrics, with specimens exhibiting the highest wet weight (43.17 grams) and longest stalk length (43.38 millimeters). While the fruiting body count remained consistent across treatment groups, the incorporation of vermicompost significantly enhanced overall growth parameters compared to control conditions. The results highlight that integrating

vermicompost into phoenix oyster mushroom production not only enhances yield but also reduces per-unit production costs, leading to greater financial returns. These findings support the economic viability of vermicompost adoption in commercial mushroom farming, contributing to both profitability and sustainability in agribusiness.

5. Acknowledgments

The research team extends its gratitude to the National Science Research and Innovation Fund and the Program Management Unit for Competitiveness Enhancement for their support from the national budget for fiscal year 2020. Further gratitude is extended to the Research and Development Institute and the Faculty of Science at Suan Dusit University for their valuable assistance.

6. References

- Chinnawong, S. and Longja, N. n.d. **Economic mushrooms provide an opportunity to create a career and create income.** Available Source: https://eto.kps.ku.ac.th/ETO/images/iconmenu/KM_economic_mushroom.pdf, March 13, 2024.
- Chuphong, S., Boonlertnirun, K. and Tangsombattwijit, P. 2012. Study of the production potential of vermicompost from water hyacinth in the water canal area in Phra Nakhon Si Ayutthaya Province, pp. 519-524. In Watjanatepin, N.B., eds. **Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi National Academic Conference the 1st.** Research and Development Institute, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Phra Nakhon Sri Ayutthaya. (in Thai)
- Jaitea, S. 2015. Vermicompost on organic waste. **RMUTP Research Journal** 9(2): 189-200.
- Jianwichayakul, P. and Somniyam P. 2021. Efficiency of vermicompost from water hyacinth on growth, yield and yield component of rice var. RD41. **Khon Kaen Agriculture Journal** 49 (Suppl.1): 949-955. (in Thai)
- Kuntad, P., Koauychai, P. and Wichrsawasdi, J. 2012. **Research Report on the use compost fertilize**

of oil palm from straw mushroom production system for mangosteen of Chumporn province. Maejo University. (in Thai)

- Nopparatmaitree, M., Seanpoom, P., Panthong, A. and Kitpipit, W. 2017. Nutritive value and modified byproduct from mushroom cultivation as feedstuff. **Khon Kaen Agriculture Journal** 45 (Suppl.1): 715-721. (in Thai)
- Pongthornpruek, S. and Kraiwuttinan, P. 2013. The used of bamboo residues from chopstick production for mushroom cultivation material. **RMUTP Research Journal** (Special Issue): 20-26. (in Thai)
- Seephueak, P., Makmoon, J., Trithin, T., Seephueak, W. and Preecha, C. 2021. Use of oil palm petiole for *Pleurotus ostreatus* cultivation. **Khon Kaen Agriculture Journal** (Suppl.1): 1018-1023. (in Thai)
- Srinak, J., Srisukjai, R., Youman, W. and Phachan, U. 2012. Cultivation of mushroom (*pleurotus ostreatus*) on pineapple from the factory of tipco foods Thailand. Special Problems in Biology Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani. (in Thai)
- Sriwongchai, S. 2017. **Research Report on biodiesel production from agricultural wastes by using biotechnological process.** Burapha University. (in Thai)
- Tudses, N., Toonputta, A., Chaemchamrat, S., Phungbunhan, K., Chanataepaporn, P., Tohwankaew, J., Wongsa, T. and Leaungthitikanchana, S. 2018. Effects of vermicompost on quality of paddy straw mushroom (*Volvariella volvacea*) by short stack. **King Mongkut's Agricultural Journal** 36(3): 81-90. (in Thai)



Research Article

Molecular detection of Haemoparasitic *Babesia* spp. infection in Thai fighting bulls in Nakhon Si Thammarat province, Thailand

Jaturapat Kompan ^a, Vassakorn Khophlolklang ^a, Anyarat Thiptara ^b, Wandee Kongkaew ^b
and Nijjareeya Sirisriro ^{c*}

^a Livestock Animal Hospital, Faculty of Veterinary Science, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon-Si Thammarat Campus, Nakhon-Si Thammarat 80240, Thailand.

^b Veterinary Research and Development Center (Upper Southern Region), Thungsong, Nakhon-Si Thammarat 80110, Thailand.

^c Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Bangkokthonburi University, Thawi Watthana, Bangkok 10170, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2025-02-26

Revised: 2025-04-26

Accepted: 2025-04-28

Keywords:

bovine babesiosis;
Babesia bovis;
phylogenetic analysis;
apical membrane antigen 1
gene

Bovine babesiosis significantly impacts cattle health and productivity; however, its epidemiology in Thai fighting bulls remains understudied. This research investigated the prevalence and genetic characteristics of *Babesia* species in these bulls from Nakhon Si Thammarat province, Thailand. Blood samples from 267 bulls across 13 districts were analyzed using PCR targeting the *ama-1* gene. The overall *Babesia* prevalence was 12.36%. District-specific infection rates were: Nophitam, 20.0% (4/20); Phipun, 15.0% (3/20); Ronphibun, 31.81% (7/22); Chulaphon, 15.0% (3/20); Chauat, 25.0% (5/20); Huasai, 25.0% (5/20); and, Chianyai, 26.09% (6/23). Sequencing identified *Babesia bovis* as the sole infecting species; *B. bigemina* was not detected. Nucleotide sequencing confirmed that all positive samples were *Babesia bovis*, and *B. bigemina* was not detected. Phylogenetic analysis of the *B. bovis* *ama-1* sequences delineated two distinct genetic clades with geographical correlation. Clade I, comprising isolates from the northern districts of Nophitam and Phipun, exhibited close genetic relatedness to isolates from Brazil and other regions of Thailand. Conversely, Clade II, encompassing isolates from the southern districts of Ronphibun, Chulaphon, Chauat, Huasai, and Chianyai, showed genetic similarity to isolates from Israel and Sri Lanka. The varying district prevalence highlights heterogeneous infection distribution, indicating high-risk areas for targeted interventions. Distinct phylogenetic clades suggest regional *B. bovis* strain differences, warranting further investigation into transmission and management implications for this economically and culturally important fighting bull population.

© 2025 Kompan, J., Khophlolklang, V., Thiptara, A., Kongkaew, W. and Sirisriro N. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: nsirisriro@outlook.com

Cite this article as:

Kompan, J., Khophlolklang, V., Thiptara, A., Kongkaew, W. and Sirisriro N. 2025. Molecular detection of Haemoparasitic *Babesia* spp. infection in Thai fighting bulls in Nakhon Si Thammarat province, Thailand. *Recent Science and Technology* 17(2): 266483.

1. Introduction

Bovine babesiosis, a tick-borne disease caused by intraerythrocytic protozoa of the genus *Babesia* (phylum Apicomplexa), results in significant economic losses globally, affecting both domestic and wild bovids (Almazán *et al.*, 2022). Key etiological agents include *B. bovis*, *B. bigemina*, *B. divergens*, and *B. major* (Santos *et al.*, 2023). In Thailand, *B. bovis* and *B. bigemina* are the primary pathogens, with *B. bovis* associated with more severe disease, indicating higher virulence (Cao *et al.*, 2012; Nagano *et al.*, 2013; Srionrod *et al.*, 2022). The distribution of *Babesia* spp. is closely linked to their tick vectors, particularly the *Rhipicephalus microplus* species complex, a prevalent ectoparasite of cattle in tropical and subtropical regions (Yin *et al.*, 1997; Bock *et al.*, 2004). *B. bovis* undergoes both sexual and asexual reproduction: the sexual phase within the tick vector and asexual reproduction within erythrocytes of the mammalian host (Bock *et al.*, 1992). While ticks are the primary vectors, mechanical transmission by blood-feeding flies from the families Tabanidae and Muscidae, is also possible (Van den Bossche and Mudenge, 1999; Sontigun *et al.*, 2022).

Babesia infection initiates with the invasion of erythrocytes by sporozoites, followed by asexual reproduction via binary fission. Released merozoites infect additional erythrocytes, with some differentiating into gametocytes. The sexual phase commences when a tick ingests blood containing these gametocytes (Jalovecka *et al.*, 2018). *Babesia* replication within erythrocytes leads to hemolysis and hemolytic anemia. Hemograms of infected cattle often reveal macrocytic hypochromic anemia and thrombocytopenia (Mahmoud *et al.*, 2015). Furthermore, *Babesia* spp. infection increases oxidative stress markers and enhances cell-mediated immune responses, as observed in *B. bovis*-positive cattle (Attia and Khalifa, 2023).

Tentative diagnosis of bovine babesiosis is based on clinical signs. Microscopic examination of stained blood smears remains the gold standard for confirmatory diagnosis, although it may yield false negatives in subclinical and chronic infections with low parasitemia (Fahrimal *et al.*, 1992; Bal *et al.*, 2016). Serological assays, while available, can exhibit cross-

reactivity, limiting their ability to differentiate closely related *Babesia* species (Bal *et al.*, 2016). Immunochromatographic test (ICT) strips are preferred for rapid field diagnosis (Guswanto *et al.*, 2017; Ganzinelli *et al.*, 2020). Nucleic acid-based assays, particularly polymerase chain reaction (PCR), provide high sensitivity and specificity for the identification of *Babesia* species (Bal *et al.*, 2016; Jirapattarasate *et al.*, 2017; Hossain *et al.*, 2023). The *ama-1* gene is a valuable target for species-specific PCR assays due to its conserved nature within species and variability between species (Torina *et al.*, 2010; Sivakumar *et al.*, 2012; Niu *et al.*, 2015). In Thailand, sequence analysis of *B. bovis* *ama-1* (Bbama-1) has revealed low polymorphism and high conservation (95.46-99.94%) among Thai and global isolates (Nagano *et al.*, 2013; Rittipornlertrak *et al.*, 2017). This suggests that the conserved Bbama-1 region may be suitable for detecting regional variations in *B. bovis*. Additionally, AMA-1 is considered a potential antigen for vaccine development (Rittipornlertrak *et al.*, 2017).

Thai fighting bulls represent more than just livestock; they are integral to a cultural tradition that underpins a substantial economic ecosystem, particularly in southern Thailand. This thriving industry encompasses a wide network of activities, including livestock trade, specialized breeding programs focused on desirable fighting traits, and a significant demand for veterinary services catering to these high-value animals (Rakjan, 2023). Further underscores the financial significance of Thai bull fighting, which also supports livelihoods, drives local tourism, and contributes to the preservation of indigenous cattle breeds (Pramahasuriya *et al.*, 2024). The investigation of *Babesia* spp. prevalence in Thai fighting bulls is of significant importance due to the cultural and substantial economic value. Despite this economic relevance, the epidemiological status of *Babesia* infection within this specific population remains largely uncharacterized, highlighting a critical lack of baseline data necessary for understanding the current disease burden and for the development and evaluation of effective control and prevention strategies. This study aimed to determine the prevalence of *Babesia* spp. in Thai fighting bulls in Nakhon Si Thammarat province,

Thailand. Additionally, the study sought to analyze *B. bovis* ama-1-derived regions to identify genetic variability and selection signatures.

2. Materials and Methods

2.1 Animal ethical approval

This study was conducted in accordance with protocols approved by the Institutional Animal Care and Use Committee (IACUC) of Rajamangala University of Technology Srivijaya (IAC 003-06-62).

2.2 Sample collection

Sample collection was conducted from April 2020 until May in 2021, across 13 districts in Nakhon Si Thammarat: N01 Nophitam, N02 Phipun, N03 Chawang, N04 Thungyai, N05 Nabon, N06 Changklan, N07 Lansaka, N08 Ronphibun, N09 Chulaphon, N10 Chauat, N11 Huasai, N12 Chianyai and N13 Pakphanang (Figure1). Approximately 3-5 milliliter (ml) of venous blood were collected from the jugular veins of individual male fighting bulls (age 2-5 years) using 10 ml syringes with 18G needles. The blood was dispensed into BD Vacutainer® blood collection tubes with the ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) anticoagulant (BD, USA) and kept on ice during transport to the laboratory for DNA extraction.

2.3 DNA extraction

Genomic DNA was extracted from all blood samples using the DNeasy Blood and Tissue Kit (Qiagen, USA) according to the manufacturer's instructions. DNA concentration was determined using a NanoDrop 2000c Spectrophotometer (Thermo Scientific, USA) at 260/280 nm. Extracted DNA was diluted to 10 ng/μL and stored at -20 °C until nested-PCR analysis.

2.4 PCR for *Babesia* ITS

A nested PCR assay was performed to detect *B. bovis* and *B. bigemina* using ITS-specific primers (Cao *et al.*, 2012) (Table 1) in a T100 thermal cycler (Bio-Rad, USA). The amplification reaction involved two rounds using different primer sets with EmeraldAmp® GT PCR Master Mix (TaKaRa Bio Inc., Japan). Each

50 μL reaction contained 25 μL EmeraldAmp GT PCR Master Mix (2X Premix), 18 μL DNase/RNase-free deionized water, 2 μL of forward and reverse primer mix, and 5 μL of DNA template. PCR conditions were: initial denaturation at 95 °C for 3 min, followed by 35 cycles of denaturation at 95 °C for 30 s, annealing at 55 °C for 30 s, and extension at 72 °C for 60 s for both rounds of amplification. DNase/RNase-free water was used as a no-template control. *Babesia* DNA positive controls, *Theileria* and *Anaplasma* DNA controls provided by the Faculty of Veterinary Sciences, Rajamangala University of Technology Srivijaya, were included in all PCR assays. PCR products were electrophoresed on a 1.2% agarose gel in 1× TBE buffer for 30 min at 3 V/cm and visualized using SYBR Gold nucleic acid gel stain (Invitrogen, USA). A 100 bp DNA Ladder (Thermo Fisher, USA) was used as a molecular weight marker

2.5 PCR for *Babesia* ama-1 gene

To amplify the complete ama-1 gene sequence of *B. bovis*, four primer sets were designed based on the reference sequence of *B. bovis* apical membrane antigen 1 (NCBI accession number: XM_001610993) (Table 1; Rittipornlertrak *et al.*, 2017). All *Babesia*-positive samples, as determined by ITS-PCR, underwent nested PCR using the same conditions as described in section 2.4. PCR products were visualized by 1.2% agarose gel electrophoresis with SYBR Gold nucleic acid gel staining (Invitrogen, USA). The expected PCR fragment sizes were approximately 1126 bp for the first round and 960 bp for the second round of amplification.

2.6 Nucleotide analysis

Following PCR amplification of the ama-1 gene, all positive samples were purified and sequenced by Macrogen (Korea). The resulting nucleotide sequences were analyzed for internal consistency and compared with each other. Additionally, these sequences were compared to previously published *B. bovis* strains deposited in GenBank using the Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) available on the National Center for Biotechnology Information (NCBI) website (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>).

Table 1 Oligonucleotide primers of *B. bovis* and *B. bigemina*

Target	Sequences 5'-3'	Product size (bp)	References
B.bovis ITS	CGTCCCTGCCCTTTGTA	815	Cao <i>et al.</i> , 2012
	TATTTTCTTTTCTGCCGCTT		
B.bovis ITS (nestedPCR)	CACCACCAAGTGAAGCAC	545	
	TTGTGCCCCATGGACACT		
B.bigemina ITS	CGTCCCTGCCCTTTGTA	815	Cao <i>et al.</i> , 2012
	TATTTTCTTTTCTGCCGCTT		
B.bigemina ITS (nestedPCR)	AGTGGGTCGGGACTCGTC	495	
	AGTACCGCCTGCGAGCAG		
Babesia ama-1 (set 1)	TGCCCTTCAGTTGTCCATAGG	1240	Rittipornlertrak <i>et al.</i> , 2017
	CGATATCCAAGTCAGTCGCAG		
Babesia ama-1 (set 2)	CACTCTGTTGGTCCGCTTTC	1126	Rittipornlertrak <i>et al.</i> , 2017
	GCAGGAGCAATGGCAACACAA		
Babesia ama-1 (set 3)	TACAAGAGCGCTGAGGATGCA	1065	Rittipornlertrak <i>et al.</i> , 2017
	GATTAACAAGCGACCACGATG		
Babesia ama-1 (set 4)	ACCCGGTAAGGGATGCCATTT	960	Rittipornlertrak <i>et al.</i> , 2017
	CACACGGTCAATGAGATGTCT		

2.7 Phylogenetic analysis

Phylogenetic analysis was conducted to investigate the genetic relationships among the *B. bovis* isolates from this study and published strains by using a neighbor-joining method with 1000 bootstrap replicates in MEGA12 software. The *B. bovis* ama-1 sequences from the 33 positive samples were used as templates for the analysis. The *B. bovis* ama-1 isolate from Nakhon Pathom, Thailand (GenBank accession number: KY575957.1), was included as a reference sequence. *B. bigemina* ama-1, *B. divergens* ama-1, and *B. gibsoni* ama-1 sequences were included as outgroups.

3. Results and Discussion

3.1 Prevalence of Babesia infection in Nakhon Si Thammarat

Blood samples were collected from 267 fighting bulls across 13 districts in Nakhon Si Thammarat (Figure1): Nophitam, Phipun, Chawang, Thungyai, Nabon, Changklan, Lansaka, Ronphibun, Chulaphon, Chauat, Huasai, Chianyai, and Pakphanang. Nested PCR analysis identified 33

positive samples from 7 districts, resulting in an overall infection rate of 12.36% (33/267). District-specific infection rates were as follows: Nophitam, 20.0% (4/20); Phipun, 15.0% (3/20); Ronphibun, 31.81% (7/22); Chulaphon, 15.0% (3/20); Chauat, 25.0% (5/20); Huasai, 25.0% (5/20); and Chianyai, 26.09% (6/23) (Table 2).

Nucleotide sequencing and alignment to find the identical sequences confirmed that all positive samples were *B. bovis*; *B. bigemina* was not detected. This finding aligns with previous reports from Chiang Rai, Chiang Mai, and Lampang (Cao *et al.*, 2012), Lamphun and Nakhon Pathom (Koonyosying *et al.*, 2022), and Nan, Ratchaburi, Nakhon Si Thammarat, Phatthalung, and Surat Thani (Srionrod *et al.*, 2022).

The prevalence of tick-borne hemoparasitic infections, particularly Babesia, poses a significant threat to cattle health and the livestock economy. These infections can lead to severe illness, reduced production, and hemolytic anemia, even at low parasitemia levels. Although infected cattle may not exhibit overt clinical signs, low production and post-mortem examination can reveal significant pathological changes (Bock *et al.*, 2004; Almazán *et al.*, 2022).

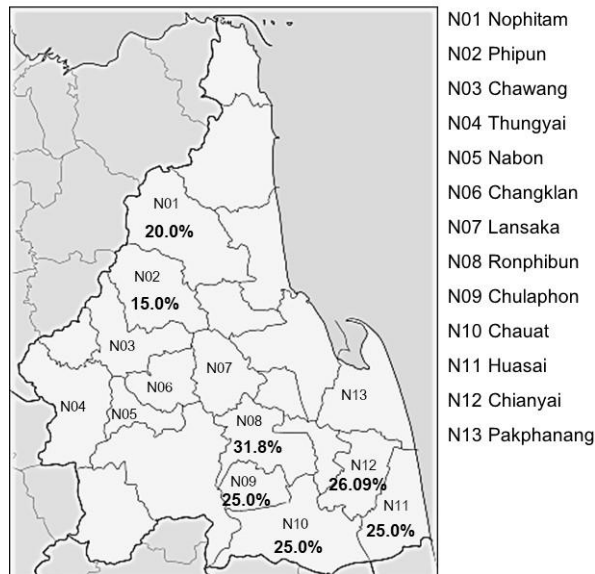


Figure 1 Map of the study area, showing of Nakhon Si Thammarat province. Number for the districts where samples were collected are as follows: N01 Nophitam, N02 Phipun, N03 Chawang, N04 Thungyai, N05 Nabon, N06 Changklan, N07 Lansaka, N08 Ronphibun, N09 Chulaphon, N10 Chauat, N11 Huasai, N12 Chianyai, N13 Pakphanang. The percentage indicated the infection rate in each area.

3.2 Determining *B. bovis* ama-1 gene

The ama-1 gene was successfully amplified and sequenced from all 33 *Babesia*-positive samples. Nucleotide BLAST analysis confirmed that all 33 sequences were *B. bovis* ama-1 gene. Within each district group, nucleotide sequences exhibited 100% identity. Across all districts, nucleotide sequence identity ranged from 96.04% to 100.00% when compared to the *B. bovis* isolate from Nakhon Pathom, Thailand (GenBank accession number: KY575957.1) (Table 2). These findings indicate a low genetic distance between the *B. bovis* populations from the seven infected districts and the reference strain (KY575957.1).

3.3 Phylogenetic analysis

Phylogenetic analysis of the ama-1 gene was conducted to elucidate the genetic relationships among *B. bovis* isolates (n=42) using the neighbor-joining

method with Maximum Composite Likelihood evolutionary distances (Tamura *et al.*, 2004), implemented in MEGA12 (Kumar *et al.*, 2024). The resulting phylogenetic tree (Figure 2) revealed a clear genetic differentiation, forming two distinct clades. Clade I, consisting of isolates from the northern districts of Nophitam (N01) and Phipun (N02), demonstrated closer evolutionary relatedness to *B. bovis* isolates from Brazil (FJ588028.1, FJ588027.1, FJ588026.1, FJ588025.1, and FJ588024.1) and other regions of Thailand including isolates from Chiang Rai, Chiang Mai, and Nakhon Pathom (KY575956.1, KY575955.1, and KY575957.1). In contrast, Clade II, comprising isolates from the southern districts of Ronphibun (N08), Chulaphon (N09), Chauat (N10), Huasai (N11), and Chianyai (N12), exhibited close evolutionary distances to *B. bovis* isolates from Israel (KX196263.1, KX196262.1, and AY486101.1) and Sri Lanka (AB787637.1, AB787636.1, AB787635.1, AB787634.1, AB787633.1, and AB787632.1).

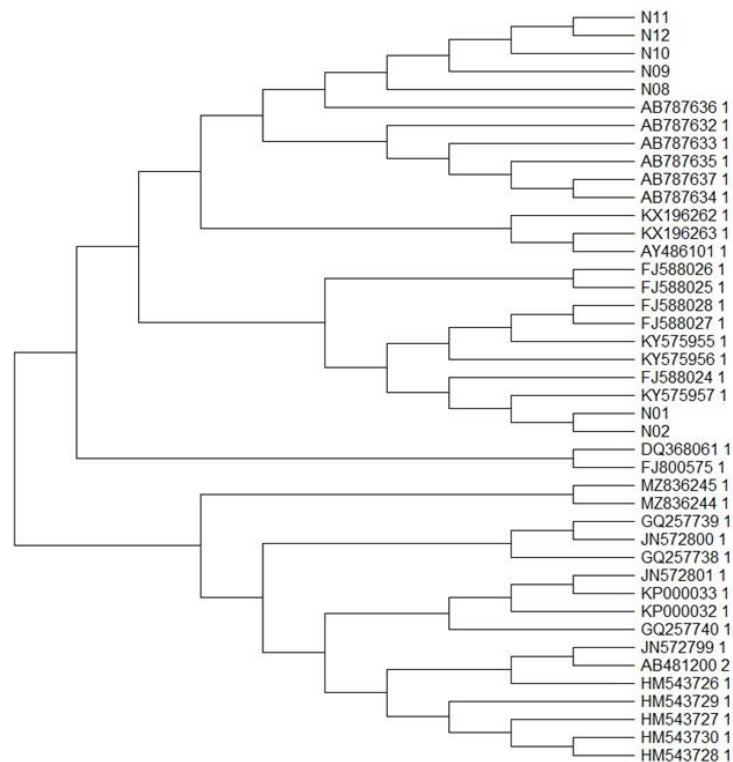
This distinct genetic structuring of *B. bovis* populations within Nakhon Si Thammarat has significant implications for disease management. The identification of two geographically associated genetic clades suggests the potential for regional variations in parasite characteristics, such as virulence, vector interactions, and drug susceptibility. For instance, control strategies effective against one clade might not be equally efficacious against the other. Furthermore, this genetic divergence underscores the importance of considering local strain diversity in the development of future interventions, including geographically targeted diagnostic assays and potentially vaccines. The observed genetic links to isolates from Brazil, other parts of Thailand, Israel, and Sri Lanka hint at potential historical or ongoing parasite introductions or shared evolutionary pathways, which could inform broader epidemiological investigations and biosecurity measures. Understanding this genetic heterogeneity is crucial for designing and implementing effective and sustainable control strategies for bovine babesiosis in this economically important fighting bull population.

Table 2 PCR Results, infection rate, and nucleotide sequence similarity of *B. bovis* ama-1 gene in Nakhon Si Thammarat.

Studied area	No of samples	PCR positive samples	Infection rate	Nucleotide sequences similarity ^a
N01 Nophitam	20	4	20.00%	100.00%
N02 Phipun	20	3	15.00%	100.00%
N03 Chawang	20	0	0.00 %	NA
N04 Thungyai	20	0	0.00 %	NA
N05 Nabon	20	0	0.00 %	NA
N06 Changklan	20	0	0.00 %	NA
N07 Lansaka	22	0	0.00 %	NA
N08 Ronphibun	22	7	31.81%	96.04%
N09 Chulaphon	20	3	15.00%	96.04%
N10 Chauat	20	5	25.00%	96.04%
N11 Huasai	20	5	25.00%	96.04%
N12 Chianyai	23	6	26.09%	96.04%
N13 Pakphanang	20	0	0.00%	NA
Total	267	33	12.36%	NA

^a Nucleotide sequence similarity analysis was conducted by aligning the sequences to the *B. bovis* ama-1 (Thailand isolate) complete reference sequence KY575957.1

NA = Not available

**Figure 2** Evolutionary relationships of 42 taxa based on the ama-1 gene.

Phylogenetic analyses were performed using the MEGA12 analysis tools (Kumar *et al.*, 2024).

4. Conclusion

In conclusion, this study confirms the presence of *B. bovis* infection in Nakhon Si Thammarat. Nested PCR analysis revealed an overall prevalence of 12.36% (33/267), with the highest prevalence observed in Ronphibun (31.81%, 7/22), followed by Chianyai, Chauat, Huasai, Nopitam, Phipun, and Chulaphon. Phylogenetic analysis of the ama-1 gene sequences from isolates in the northern area of Nakhon Si Thammarat province demonstrated a close genetic relationship with *Babesia* reported in Brazil and Thailand, while those from the southern area of the province closely resembled those reported in Sri Lanka and Israel. This study lays the groundwork for future research investigating factors contributing to the observed prevalence and the differences between the two phylogenetic clades. This could include vector studies, investigation of clinical manifestations, and assessment of the impact of infection on the bulls' fighting performance.

5. Acknowledgments

This study was supported by the Research Fund of National Research Council of Thailand (NRCT FY2019). We extend our gratitude to the Veterinary Research and Development Center (Upper Southern Region) for their support throughout the research period.

6. References

- Almazán, C., Scimeca, R.C., Reichard, M.V. and Mosqueda, J. 2022. Babesiosis and Theileriosis in North America. **Pathogens** 11(2): 168.
- Attia, M.M. and Khalifa, M.M. 2023. Virulence of *Babesia bigemina* in infected cattle (*Bos taurus*): Molecular and immunological studies. **Research in Veterinary Science** 156: 7-13.
- Bal, M.S., Mahajan, V., Filia, G., Kaur, P. and Singh, A. 2016. Diagnosis and management of bovine babesiosis outbreaks in cattle in Punjab state. **Veterinary World** 9(12): 1370-1374.
- Bock, R., Jackson, L., de Vos, A. and Jorgensen, W. 2004. Babesiosis of cattle. **Parasitology** 129: 247-269.
- Bock, R.E., de Vos A.J., Kingston, T.G., Shiels, I.A. and Dalglish, R.J. 1992. Investigations of breakdowns in protection provided by living *Babesia bovis* vaccine. **Veterinary World** 43(1-2): 45-56.
- Cao, S., Aboge, G.O., Terkawi, M.A., Yu, L., Kamyngkird, K., Luo, Y., Li, Y., Goo, Y.K., Yamagishi, J., Nishikawa, Y., Yokoyama, N., Suzuki, H., Igarashi, I., Maeda, R., Inpankaew, T. Jittapalpong, S. and Xuan, X. 2012. Molecular detection and identification of *Babesia bovis* and *Babesia bigemina* in cattle in northern Thailand. **Parasitology Research** 111(3): 1259-1266.
- Fahrimal, Y., Goff, W.L. and Jasmer, D.P. 1992. Detection of *Babesia bovis* carrier cattle by using polymerase chain reaction amplification of parasite DNA. **Journal of Clinical Microbiology** 30(6): 1374-1379.
- Ganzinelli, S., Benitez, D., Gantuya, S., Guswanto, A., Florin-Christensen, M., Schnittger, L. and Igarashi, I. 2020. Highly sensitive nested PCR and rapid immunochromatographic detection of *Babesia bovis* and *Babesia bigemina* infection in a cattle herd with acute clinical and fatal cases in Argentina. **Transboundary and Emerging Diseases** 67(2): 159-164.
- Guswanto, A., Allamanda, P., Mariamah, E.S., Munkjargal, T., Tuvshintulga, B., Takemae, H., Sivakumar, T., AbouLaila, M., Terkawi, M.A., Ichikawa-Seki, M., Nishikawa, Y., Yokoyama, N. and Igarashi, I. 2017. Evaluation of immunochromatographic test (ICT) strips for the serological detection of *Babesia bovis* and *Babesia bigemina* infection in cattle from Western Java, Indonesia. **Veterinary Parasitology** 30(239): 76-79.
- Hossain, M.J., Raut, S., Singh, R.P., Mishra, P., Hossain, M.S., Dey, A.R., Kabir, A., Talukder M.H., Shahiduzzaman, M. 2023. Molecular

- detection of *Babesia* and *Theileria* from crossbred cattle in Sirajganj and Rangpur districts of Bangladesh. **Veterinary Medicine and Science** 9(2): 899-906.
- Jalovecka, M., Hajdusek, O., Sojka, D., Kopacek, P. and Malandrin, L. 2018. The Complexity of Piroplasms Life Cycles. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology** 8: 248.
- Jirapattharasate, C., Adjou Moumouni, P.F., Cao, S., Iguchi, A., Liu, M., Wang, G., Zhou, M., Vudriko, P., Efstratiou, A., Changbunjong, T., Sungpradit, S., Ratanakorn, P., Moonarmart, W., Sedwisai, P., Weluwanarak, T., Wongsawang, W., Suzuki, H. and Xuan, X. 2017. Molecular detection and genetic diversity of bovine *Babesia* spp., *Theileria orientalis*, and *Anaplasma marginale* in beef cattle in Thailand. **Parasitology Research** 116(2): 751-762.
- Koonyosying, P., Rittipornlertrak, A., Chomjit, P., Sangkakam, K., Muenthaisong, A., Nambooppha, B., Srisawat, W., Apinda, N., Singhla, T. and Sthitmatee, N. 2022. Incidence of hemoparasitic infections in cattle from central and northern Thailand. **PeerJ** 10: e13835.
- Kumar, S., Stecher, G., Suleski, M., Sanderford, M., Sharma, S. and Tamura, K. 2024. MEGA12: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 12 for adaptive and green computing. **Molecular Biology and Evolution** 41: 1-9.
- Mahmoud, M.S., Kandil, O.M., Nasr, S.M., Hendawy, S.H., Habeeb, S.M., Mabrouk, D.M., Silva, M.G. and Suarez, C.E. 2015. Serological and molecular diagnostic surveys combined with examining hematological profiles suggests increased levels of infection and hematological response of cattle to babesiosis infections compared to native buffaloes in Egypt. **Parasites & Vectors** 12(8): 319.
- Nagano, D., Sivakumar, T., De De Macedo, A.C., Inpankaew, T., Alhassan, A., Igarashi, I. and Yokoyama, N. 2013. The genetic diversity of merozoite surface antigen 1 (MSA-1) among *Babesia bovis* detected from cattle populations in Thailand, Brazil and Ghana. **Journal of Veterinary Medical Science** 75(11): 1463-1470.
- Niu, Q., Liu, Z., Yu, P., Yang, J., Abdallah, M.O., Guan, G., Liu, G., Luo, J. and Yin, H. 2015. Genetic characterization and molecular survey of *Babesia bovis*, *Babesia bigemina* and *Babesia ovata* in cattle, dairy cattle and yaks in China. **Parasites & Vectors** 9(8): 518.
- Pramahasuriya, S., Rajbhandaraks, S., Chaipinit, C., Pungprawat, K. 2024. Thai's Traditional Sport Bulls Fighting and Local Politics in the Southern Thailand from 1997 to 2023. **The Journal of Development Administrator Research** 14(3): 807-823.
- Rakjan, S. 2023. The political and economic conditions that allow politicians to play a role in bullfighting in phatthalung province. **King Prajadhipok's Institute Journal** 21(3):153-182.
- Rittipornlertrak, A., Nambooppha, B., Simking, P., Punyapornwithaya, V., Tiwananthagorn, S., Jittapalapong, S., Chung, Y.T. and Sthitmatee, N. 2017. Low levels of genetic diversity associated with evidence of negative selection on the *Babesia bovis* apical membrane antigen 1 from parasite populations in Thailand. **Infection, Genetics and Evolution** 54: 447-454.
- Santos, J.H.M., Siddle, H.V., Raza, A., Stanisic, D.I., Good, M.F. and Tabor, A.E. 2023. Exploring the landscape of *Babesia bovis* vaccines: progress, challenges, and opportunities. **Parasites & Vectors** 16(1): 274.
- Sivakumar, T., Altangerel, K., Battsetseg, B., Battur, B., Aboulaila, M., Munkhjargal, T., Yoshinari, T., Yokoyama, N. and Igarashi, I. 2012. Genetic detection of *Babesia bigemina* from Mongolian cattle using apical membrane antigen-1 gene-based PCR assay. **Veterinary Parasitology** 187(1-2): 17-22.
- Sontigun, N., Boonhoh, W., Phetcharat, Y. and Wongtawan, T. 2022. First study on

- molecular detection of hemopathogens in tabanid flies (Diptera: Tabanidae) and cattle in Southern Thailand. **Veterinary World** 15(8): 2089-2094.
- Srionrod, N., Nooroong, P., Poolsawat, N., Minsakorn, S., Watthanadirek, A., Junsiri, W., Sangchuai, S., Chawengkirttikul, R. and Anuracpreeda, P. 2022. Molecular characterization and genetic diversity of *Babesia bovis* and *Babesia bigemina* of cattle in Thailand. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology** 12: 1065963.
- Tamura, K., Nei, M. and Kumar, S. 2004. Prospects for inferring very large phylogenies by using the neighbor-joining method. **Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)** 101(30): 11030-11035.
- Torina, A., Agnone, A., Sireci, G., Mosqueda, J.J., Blanda, V., Albanese, I., La Farina, M., Cerrone, A., Cusumano, F. and Caracappa, S. 2010. Characterization of the apical membrane antigen-1 in Italian strains of *Babesia bigemina*. **Transboundary and Emerging Diseases** 57(1-2): 52-56.
- Van den Bossche, P. and Mudenge, D. 1999. The effect of short-interval deltamethrin applications to control tsetse on the seroprevalence of babesiosis in cattle. **Tropical Animal Health and Production** 31(4): 215-222.
- Yin, H., Lu, W. and Luo, J. 1997. Babesiosis in China. **Tropical Animal Health and Production** 29: 11S-15S.



Research Article

Effects of Nutmeg and Coconut Milk Powder on Wheat-Rice Cookies

Pakamart Purintrapibul ^{a*}, Jareeporn Chuajedton ^b and Preecha Muneesri ^b^a Independent researcher, 389, Ramesuan road, Khuha Sawan, Mueang Phatthalung, Phatthalung 93000, Thailand.^b Department of Food Innovation and Management, Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat Campus, Thung Yai, Nakhon Si Thammarat 80240, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-11-26

Revised: 2025-04-15

Accepted: 2025-04-28

Keywords:

cookies;

Khao-Mo-Rin Rice;

natural colorant;

nutmeg;

coconut milk powder

This study aimed to investigate the quality of wheat-rice cookies with the addition of natural colorants, Nutmeg, and coconut milk powder (CMP). In the experiment of evaluating the impact of natural colorants on cookie quality, the Khao-mod-rin rice-wheat cookie recipe was used as the control. The addition of natural colorants did not significantly affect cookie color or sensory evaluations ($P>0.05$). Therefore, the control formula was chosen for studying the effects of nutmeg addition. Nutmeg addition decreased L^* and b^* values while increasing a^* values. Cookies with 4% nutmeg had a significantly higher spreading ratio ($P<0.05$), but the % baking loss was similar across treatments. Sensory evaluations indicated similar acceptance scores for cookie color. Acceptance scores for odor, taste, texture, and overall quality were higher for cookies containing 2% and 3% nutmeg, with no significant difference in overall acceptability between these two treatments. Therefore, the 2% nutmeg cookie formula was chosen for studying the effects of CMP addition. CMP was supplemented at four levels: 0%, 15%, 30%, and 45% (w/w as margarine substitution). Results showed that increasing CMP levels tended to decrease L^* values and increase a^* values. The spreading ratio decreased with higher CMP levels, and the % baking loss was lowest in the 45% CMP cookies. Sensory evaluation scores showed that cookies with 30% CMP had the highest scores average liking scores for color, odor, taste, texture and overall acceptance being 7.50, 7.30, 7.13, 7.13, and 7.60 respectively. The Nutmeg-CMP wheat-rice cookies had a moisture content that conformed to the Community Product Standard 118/2003 guidelines. In conclusion, this study shows that nutmeg and CMP can be effectively applied to produce an acceptable product: the Nutmeg-CMP wheat-rice cookie.

© 2025 Purintrapibul, P., Chuajedton, J. and Muneesri, P. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

1. Introduction

In Thailand, "Cookies" according to the Community Product Standard 118/2003 means a type of baked goods made from wheat flour or wheat flour mixed with other types of flour, sugar, fat or edible oil, milk, eggs, baking powder, baking soda, flavoring agents, salt. They may also contain other ingredients

such as cocoa, grains, herbs, dried fruits, dried shrimp, shredded fish. Cookies are formed into pieces by dropping, cutting, molding, pressing with a mold or other appropriate methods, and then baked until crisp (Thai Industrial Standards Institute, 2003). In 2023, the biscuit market was worth 15 billion baht, growing by only 6%, consisting of crackers worth 5-6 billion baht, growing 9%, cookies worth 4 billion baht, growing 3%,

* Corresponding author.

E-mail address: purinpaka@gmail.com

Cite this article as:

Purintrapibul, P., Chuajedton, J. and Muneesri, P. 2025. Effects of Nutmeg and Coconut Milk Powder on Wheat-Rice Cookies. *Recent Science and Technology* 17(2): 265411.

and wafers worth 4 billion baht, growing 4% (MGROnline, 2024). Cookies are widely accepted and consumed in nearly all parts of the world due to being ready to eat, affordable, having good nutritional qualities, offering a wide range of tastes, and having a long shelf life. However, due to the problem of gluten allergy in wheat flour, which poses a risk for some consumers, cookies have been developed in many forms to reduce the amount of wheat flour used as the main ingredient in cookie recipes, such as using rice flour, cereal flour, and others. Bolarinwa *et al.* (2019) reported that a blend of 75% germinated brown rice flour and 25% potato starch was used to prepare high-quality and acceptable gluten-free cookies. Sresatan *et al.* (2024) reported that the optimal ratio of gluten-free flour was 90% rice flour, 5% corn starch and 5% modified tapioca starch as a substitute for wheat flour in cookies when using physical quality as the evaluation criterion.

Also, in the consumer market situation, consumers have continuously changed their preferences when choosing products, following trends that emphasize visual appearance, such as color, size, packaging, taste perception during consumption, as well as consideration of health effects after consumption. Therefore, product development that fulfills consumers' needs and responds to their behavior is essential. The development of products with natural plant substances has been accepted for their safety when used as food ingredients. However, the amount used in each product must take into account its effect on the product's characteristics and consumer acceptance. Fathonah *et al.* (2018) reported that the 7-point quality scale of sensory evaluation of pumpkin cookies showed differences in the quality of yellow color, crispness, and taste. The substitution of 10% pumpkin flour was most preferred across four sensory quality characteristics: aroma, crispness, sweetness and pumpkin taste, with scores ranging from 4.5 to 5.2. Kulkarni *et al.* (2010) reported that cookies enriched with 10% of mushroom powder scored highest for all sensory quality attributes. Farheena *et al.* (2015) reported high acceptability in the organoleptic properties of cookies when 15% date paste was used in the formulation.

In the southern region of Thailand, 12% of the total rice planting area is used for native rice cultivation. Khai-mod-rin rice accounts for 55% of the native rice planting area. Khai-mod-rin rice is a local rice variety from Nakhon Si Thammarat Province which is commercially sold as milled rice for consumption (Nooake *et al.*, 2009). Khai-mod-rin rice is gluten-free. Its nutritional composition is as follows: 12.10% moisture content, 74.11% carbohydrate, 4.47% fat, 7.63% protein, 1.70% ash, and 4.66% fiber. It contains 0.75 mg FAE/g DW of total phenolic content and exhibits 14.62% antioxidant activity (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH) (Chooklin *et al.*, 2019). Local rice has the advantage of being available and gluten-free. Chuajedton and Purinthapibal (2017) reported the use of Khai-mod-rin rice flour as an ingredient in wheat-rice baked products, thereby increasing the utilization of local rice and reducing the gluten content in bakery products.

Nutmeg (*Myristica fragrans*) is abundant in the south of Thailand, particularly in Chumphon, Surat Thani, Phang Nga, Nakhon Si Thammarat, and in the three southern border provinces. A popular OTOP product of Ron Phibun District is dried edible nutmeg pulp, which is opaque and reddish brown. Assa *et al.* (2014) reported that nutmeg pulp extracts were very effective in inhibiting linoleic peroxidation and had a relative similar ability to Butylated hydroxytoluene (BHT). Sipahelut *et al.* (2020) reported that nutmeg fruit pulp-derived oil had a greater capability to inhibit oxidation process than α -tocopherol. Nur *et al.* (2023) reported that the ethanol extract of that the pulp at doses of 450, 900 and 1,800 mg/kg wb showed significantly different anti-ulcer activity compared to the negative control group ($P < 0.05$) in acetocal-induced rats.

Fat is an important ingredient in baked goods, playing a role in giving them a soft texture. Margarine is a processed palm oil fat that is commonly used in cookies. Current research has found the effects of palm oil on the health of experimental animals. Memedi (2023) reported that studies in mice indicate palm oil increased the activity of xanthine oxidase (XOD) in the blood and caused changes in the glucose tolerance test related to carbohydrate metabolism. Analysis of the results from two studies on XOD and carbohydrate

metabolism showed a correlation between increased XOD levels and the development of prediabetes. Coconut milk is obtained from coconuts, a local plant in the south of Thailand. Its use in food can be obtained by squeezing fresh coconut milk, commercial coconut milk powder, or commercial sterilized coconut milk in a box. Laboratory studies have indicated the health benefits of coconut milk. Karunasiri *et al.* (2020) reported that the results showed the phenolic compounds in all coconut milk preparations (domestic coconut milk, powdered coconut milk, and liquid coconut milk) provided protection against oxidative damage to lipids and inhibited oxidative damage to both proteins and DNA. Alyaqoubi *et al.* (2015) reported that antioxidant properties evaluated by the ferric reducing power (FRAP) assay and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) assay indicated that coconut milk displays higher antioxidant properties than cow's milk.

The research aimed to investigate wheat-rice cookie quality through three primary aspects: (1) the impact of natural colorants on cookie quality, (2) the influence of nutmeg on cookie quality, and (3) the effect of coconut milk powder as a margarine substitute on cookie quality.

2. Materials and Methods

2.1 Cookie process

In this experiment, the wheat-rice cookie formula was chosen as the control cookie. The main ingredient for making the cookie was wheat flour. Other ingredients were specified as a percentage of the wheat flour weight as follows: 30% Khai-mod-rin rice flour, 35.70% icing sugar, 37.80% margarine, 8.40% milk powder, 1.20% baking powder, 4.20% evaporated milk, and 12.60% eggs (Chuaedton and Purinthapibal, 2017). The steps for making cookies were as follows: all-purpose wheat flour, Khai-mod-rin rice flour, milk powder, and baking powder were sifted together as a dry mixture and set aside. Margarine, in a mixer bowl, was beaten with a paddle attachment until it was slightly fluffy. Icing sugar was gradually added and beaten until the margarine was very fluffy. The speed of the paddle attachment was then reduced. The eggs were added to the mixture and beaten until well blended. The dry

ingredients were added alternately with the evaporated milk (starting and ending with the dry ingredients). The dough was divided into small pieces of equal weight. Each piece was shaped with a spoon to make a spoon cookie and to control the consistency of the cookie diameter. The cookies were baked in an electric oven at 170°C for 15 min (Bolarinwa *et al.*, 2019) and cooled at room temperature for 1 hour. Finally, they were packed in aluminum foil bags for further analysis.

2.2 Study of the effect of natural colorants, Nutmeg and CMP on the quality of cookies

2.2.1 Natural colorants

Two types of plants were selected to prepare natural colorants: dried red roselle extract and fresh turmeric extract. The extracts were prepared by boiling 3 g of each plant material in 100 g of clean water for 10 minutes. The extracted solution was filtered through a thin cloth and then used for soaking the Khai-mod-rin rice (using a ratio of extract to Khai-mod-rin rice 2:1 w/w) for 1 hour at room temperature. The solution was then drained and the dyed rice was reduced in moisture using a hot air oven, 70°C for 3 hours (Chalermesaen and Kitnok, 2016). The dried dyed rice was ground and sized by sifting through a flour sieve. The dyed rice flour was packed in aluminum foil bags for further experiments.

2.2.2 Nutmeg

Commercial dried nutmeg pulp product was coarsely chopped and added to the dough before shaping. The Nutmeg supplement was tested at 2%, 3%, and 4% levels based on the wheat flour weight. The control cookie formula contained no nutmeg.

2.2.3 Coconut milk powder (CMP)

The commercial CMP was used in this experiment. The CMP was added at levels of 15%, 30%, and 45% (w/w as a margarine substitute). The control cookie formula contained no CMP. In the cookie-making process, the dry ingredients wheat flour, Khai-mod-rin rice flour, milk powder, baking powder, and CMP were sifted together.

2.3 Quality analysis

2.3.1 Color of cookies

The color was measured using a MiniScan EZ Hunter Lab (Hunter Associates Laboratory Inc., USA) and recorded the value in L^* , a^* , and b^* CIE coordinates. The L^* value represents lightness versus darkness, where a low number (0-50) indicates darkness and a high number (51-100) indicates lightness. The a^* value represents red versus green, where a positive number indicates red and a negative number indicates green. The b^* value represents yellow versus blue, where a positive number indicates yellow and a negative number indicates blue.

2.3.2 Baking loss

Baking loss (BL) was determined by measuring the cookie weight before and after baking (Saric *et al.*, 2014). It was calculated according to the following equation:

$$BL (\%) = (m_0 - m_t) / m_0 * 100$$

Where m_0 is the initial cookie weight (g) and m_t is the weight (g) after baking time t (min).

The cookie weight (m_0 and m_t) was determined as average value of six cookies each time and measured in triplicate.

2.3.3 Spread Ratio

The cookie diameter (width) was determined by placing six cookies horizontally (edge to edge) in a row and the diameter was measured in cm. The thickness of cookies was determined by stacking six cookies on top of one another and measuring the thickness in centimeters (Inyang *et al.*, 2018). The spread ratio was calculated by dividing the average diameter by the average thickness of the cookies (Bolarinwa *et al.*, 2019). The experiments were carried out in triplicate, and the mean values were reported.

2.3.4 Nutritional compositions

The nutritional analysis of the samples was conducted according to the AOAC method (AOAC, 2000) to determine their moisture, crude protein, crude

fat, ash, and crude fiber content. Moisture content was determined by subjecting the samples to oven drying at 105°C until a constant weight was achieved. Crude protein was determined using Kjeldahl equipment (GERHARDT, Germany). Crude fat was determined using an automated Soxhlet method (FOSS, Sweden). Ash content was determined Inc., dry-ashing method at 550°C for 24 hours. Total dietary fiber was measured using a fiber analyzer (FOSS, Sweden). Carbohydrate content was calculated by difference [$100 - \% (\text{moisture} + \text{fat} + \text{crude protein} + \text{ash})$]. Data were expressed as g/100 g in wet weight. Water activity of the cookies was measured with Aqualab water activity analyzer (Aqualab, USA). The experiments were carried out in triplicate, and the mean values were reported.

2.3.5 Sensory evaluation

For the sensory evaluation of the cookies, a panel of 50 participants consisting of students and staff from Rajamangala University of Technology Srivijaya, Faculty of Agro-Industry, in the Major of Food Innovation and management The cookies were evaluated for color, odor, taste, texture and overall acceptability using a 9-point hedonic scale, with 1 representing the least score (dislike extremely) and 9 representing the highest score (like extremely) (Anprung, 2008).

2.3.6 Statistical analysis

A Completely Randomized Design (CRD) was used for physical and chemical quality analysis, while a Completely Randomized Block Design (RCRD) was used for sensory quality analysis. The obtained data were statistically analyzed in terms of mean, standard deviation, and variance (Analysis of variance, ANOVA). The difference in mean values between groups was analyzed using Duncan's Multiple Range Test at the 95% ($P < 0.05$) level of significance.

3. Results and Discussion

3.1 Effect of natural colorants on the sensory quality of cookies

Khai-mod-rin rice-wheat cookies were the product described in the report by Chuajedton and Purinthrapibal (2017). Their color characteristics were acceptable to the panelists. However, developing products with a variety of colors is one of the characteristics that attracts consumers' attention. In addition, the use of natural colorants to develop product colors is safer for consumers compared to the use of synthetic colors. Natural dyes can be obtained from plant tissues (e.g. Curcumin, Carotenoids, Anthocyanins, Betalains, or Chlorophyll). In this study, inexpensive and abundant food plants in this area were selected: red Roselle (*Hibiscus sabdariffa* Linn.) and Turmeric (*Curcuma longa* L.). Red Roselle provides a red color from the anthocyanin group, which has antioxidant properties (Jindamung and Thipbharos, 2012). Turmeric has a orange-yellow color from Curcumin, which has antioxidant properties (Manasa *et al.*, 2023). The colorants can be prepared in the form of an extract and powder. Jindamung and Thipbharos (2012) reported that the ratio of fresh red Reselle residue to distilled water was 1:4 w/v and the optimal extraction was 100°C for 30 min. To avoid the influence of plant tissue on the evaluation of the textural characteristics of cookies, the extraction method was chosen. Red Roselle and Turmeric were extracted at 100°C using the water extraction method (Jindamung and Thipbharos, 2012; Tanongkankit and Poonnoi, 2014; Manasa *et al.*, 2023). The extractants are presented in Figure 1. The roselle

extract had a purple-red color with an a^* (reddish tone) value of 1.39. According to the report by Tang (2019), using dried roselle extract at the ratio of 25 g dried roselle to 100 ml water, the extracted solution had an a^* value of 8.50. The Turmeric extractant had an orange-yellow color with a b^* (yellowish tone) value of 13.40. Fresh Turmeric raw materials have different yellow colors depending on the variety and the place of cultivation. As reported by Thammapat *et al.* (2021), fresh Turmeric had a b^* value of 21.21, while Madhusankha *et al.* (2018) reported that the color of fresh Turmeric from Indian source had b^* values ranging from 41.24 to 42.04, and from Sri Lanka, it had b^* values ranging from 31.46 to 46.06. The dyed rice colorants are presented in Figure1. The addition of colorants resulted in cookies with L^* , a^* and b^* values that were significantly different from the control cookies (Table 1). The red Roselle cookies had decreased L^* and b^* values, whereas a^* values increased. The turmeric cookies had decreased L^* values, whereas a^* and b^* values increased.

Sensory properties of the cookies were not significantly ($P>0.05$) affected by the addition of natural colorants (Table 2). This result was inconsistent with the report of Renzo *et al.* (2022), which found that cookies product developed with 1% turmeric extract (based on total formula weight) were more acceptable in terms of color and flavor than control cookies without added Turmeric extract. Based on the results of this experiment, the color characteristics of colorant cookies changed according to instrumental measurement, but the sensory acceptability of the colorant cookies was not better than that of the control formula

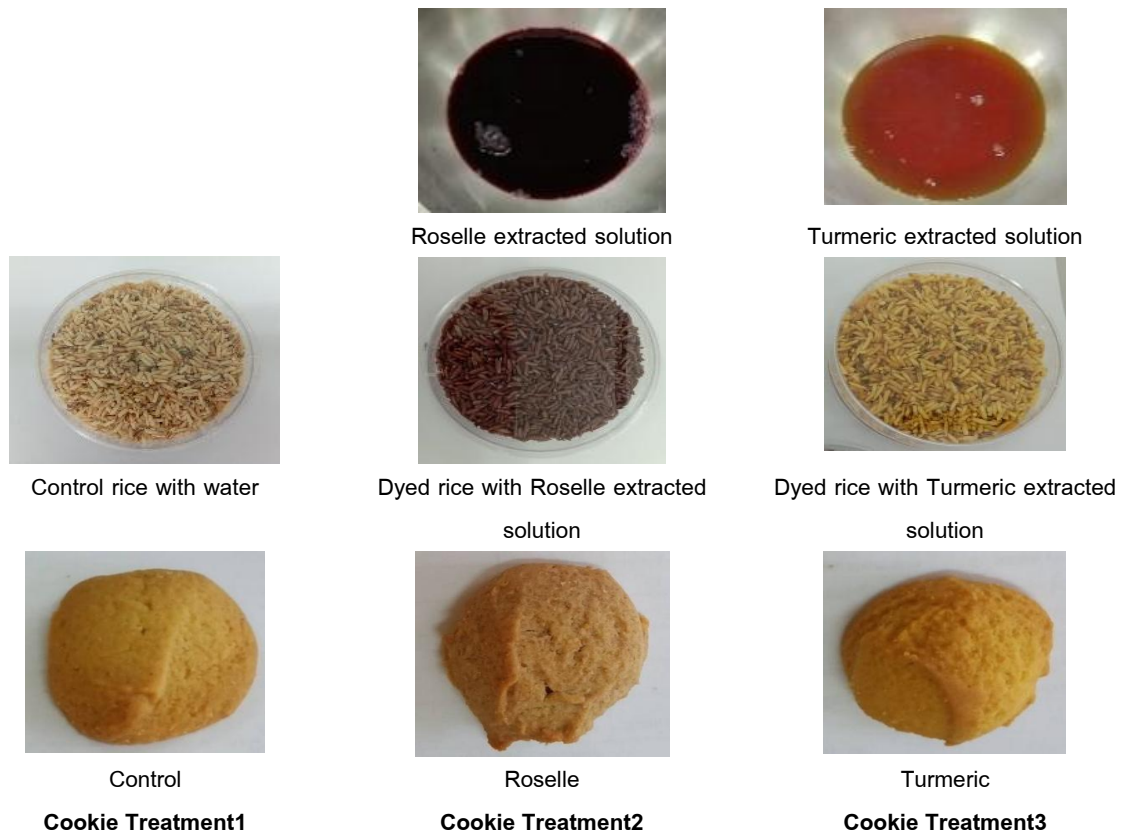


Figure 1 Effect of the natural colorants on appearance quality of cookies

Table 1 Effect of the natural colorants on Moisture (%), L*, a*, and b* values of cookies

Cookie treatment	Moisture ^{ns} (%)	L*value	a* value	b* value
1 Control	1.67±0.50	63.90±0.05 ^a	6.38±0.02 ^c	26.78±0.04 ^b
2 Roselle	1.70±0.20	31.32±0.01 ^c	10.21±0.03 ^a	7.55±0.03 ^c
3 Turmeric	2.60±0.20	59.86±0.10 ^b	7.56±0.24 ^b	42.60±0.11 ^a

Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation

^{a,b,...} Means within a column followed by different letters are significantly different ($p < 0.05$).

Table 2 Effect of the natural colorants on Sensory evaluation of cookies

Cookie treatment	Color ^{ns}	Odor ^{ns}	Taste ^{ns}	Texture ^{ns}	Overall acceptance ^{ns}
1 Control	7.48±1.18	7.32±1.32	7.42±1.01	7.44±0.88	7.50±0.84
2 Roselle	7.42±0.97	7.30±1.18	7.58±1.01	7.14±1.07	7.50±0.86
3 Turmeric	7.58±1.16	7.36±1.21	7.46±1.11	7.44±1.03	7.50±0.79

Mean value of 50 replicate measurements ± standard deviation

^{ns} Not significant ($p > 0.05$)

3.2 Effect of Nutmeg on the quality of cookies

Nutmeg is a plant commonly used in pharmaceuticals, as well as in products like Mac and nutmeg. The Nutmeg pulp is not usually consumed fresh because of its sour and astringent taste. Currently,

there is a Community Product Standard (1058/2005) guideline for dried nutmeg seasoning (Thai Industrial Standards Institute, 2005). Commercial dried nutmeg pulp seasoned with sugar have a reddish-brown color due to the Maillard reaction (Gupa *et al.*, 2022). In this experiment, the appearance of nutmeg cookies is

shown in Figure 2. The rise in nutmeg content led to significant variations in the L^* , a^* and b^* values (Table 3). The L^* value of the control cookies was 58.16, which was statistically different from that of the nutmeg cookies. The addition of nutmeg, characterized by its reddish-brown and opaque pulp, resulted in a decrease in the L^* values, indicating increased darkness in the cookies. The L^* values of nutmeg cookies with the addition of 2%, 3% and 4% nutmeg were 54.40, 54.41, and 52.82, respectively. However, addition of 2-4% Nutmeg did not cause a significant difference in the L^* values of nutmeg cookies. Thongnok (2024) reported that substituting wheat flour with reddish Sungyod rice flour in cookies resulted in a decrease in the L^* value. The results showed that increasing the amount of Sungyod rice flour led to a decrease in the L^* values of the cookies. The a^* value of cookies was affected from Nutmeg addition. The a^* values of the control cookies was 11.52, which was significantly different from the nutmeg cookies. Cookies containing 2-4% nutmeg had a^* values of 13.41-14.65, which were not statistically different from each other. These results are consistent with the findings of Thongnok (2024), who reported that substituting wheat flour with reddish Sungyod rice flour resulted in an increase in the a^* values of cookies. Nutmeg addition resulted in a decrease in the b^* values of cookies. The control cookies had a b^* value of 38.60. The addition of 4% nutmeg led to a statistically significant difference in the b^* value compared to the other cookie treatments. The 4% nutmeg cookies had the lowest b^* value at 35.15.

The spread ratio or spread factor of cookies has been used as an important characteristic for determining the quality of cookies. Cookies with higher spread ratios are considered to be more desirable than those with lower values. In the present study, the addition of nutmeg significantly affected the spread ratio (Table 4). The 4% nutmeg cookies had the highest spread ratio (2.22) that was significantly different from those of the other cookies. The spread ratio of the

control cookies was 2.14, while 2% and 3% Nutmeg cookies were 2.21, and 2.12, respectively (Table 4). This result may be attributed to the nutmeg pulp seasoned with sugar. Akesowan (2002) reported that a decrease in the amount of sucrose in cookies resulted in a decrease in the spread ratio. Similarly, Panghal *et al.* (2018) found that increasing the sugar content from 40 g to 70 g increased the spread factor of cookies from 6.42 to 8.17. Baking loss refers to the moisture loss during baking. A higher water-binding capacity of the dough is associated with lower baking loss. Both rice and wheat flour have the ability to bind and hold water that characterizes the ability of system to retain moisture in the formed structure after heat treatment (Sedlacek and Svec, 2023). The main composition of nutmeg is dietary fiber. Therefore, the addition of 2-4% nutmeg did not significantly affect the percentage of baking loss in the cookies.

The sensory evaluation of Nutmeg cookies is presented in Table 5. The results showed that the color score of cookies were not significant different. The sensory attributes evaluated in terms of color, odor, taste, texture, and overall acceptability indicated that the cookies with 2% and 3% nutmeg were the most preferred cookies and were significantly different from the other treatments. This was due to the essential oils in the nutmeg pulp. Sipahelut *et al.* (2020) reported that nutmeg pulp oil contains 32 components, with major constituents including α -pinene (18.0%), myristicin (14.1%), α -terpineol (9.4%), β -pinene (8.9%), limonene (8.5%), and terpinene-4-ol (8.4%). However, excessive nutmeg negatively affected the cookies' odor, taste, texture, and overall acceptance. The cookies with 4% nutmeg showed no significant difference in these characteristics compared to the control cookies. Based on the experimental results at this stage and considering the raw material cost, the 2% Nutmeg cookie formula was selected for further experimental study.



Figure 2 Nutmeg Cookies

Table 3 Effect of Nutmeg on L*, a* and b* values quality of cookies

	Cookie treatment	L* value	a* value	b* value
1	Control	58.16±0.27 ^a	11.53±0.32 ^b	38.60±0.65 ^a
2	2 % Nutmeg	54.40±1.42 ^b	13.41±0.71 ^a	36.77±0.96 ^{ab}
3	3 % Nutmeg	54.41±1.25 ^b	14.16±0.62 ^a	37.05±1.52 ^{ab}
4	4 % Nutmeg	52.82±2.65 ^b	14.65±0.12 ^a	35.15±0.75 ^b

Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation

^{a,b}...Means within a column with different letters are significantly different (p<0.05).

Table 4 Effect of Nutmeg on Spread ratio and Baking loss (%) of cookies

	Cookie treatment	Spread ratio	Baking loss (%) ^{ns}
1	Control	2.14±0.06 ^b	13.76±0.23
2	2 % Nutmeg	2.12±0.05 ^b	12.72±0.93
3	3 % Nutmeg	2.12±0.01 ^b	13.38±0.28
4	4 % Nutmeg	2.22±0.03 ^a	13.36±0.42

Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation

^{a,b}... Means within a column with different letters are significantly different (p < 0.05).

Table 5 Effect of Nutmeg on Sensory evaluation of cookies

	Cookie treatment	Color ^{ns}	Odor	Taste	Texture	Overall acceptance
1	Control	6.46±1.07	6.54±1.11 ^c	6.16±1.17 ^b	6.46±1.01 ^b	6.48±0.97 ^b
2	2 % Nutmeg	6.96±1.50	7.00±1.36 ^a	7.08±1.10 ^a	7.12±1.01 ^a	7.30±1.09 ^a
3	3 % Nutmeg	7.02±0.92	7.50±0.96 ^a	7.16±0.98 ^a	7.34±1.04 ^a	7.34±0.98 ^a
4	4 % Nutmeg	6.96±1.11	6.88±1.08 ^b	6.12±1.15 ^b	6.38±1.03 ^b	6.50±0.84 ^b

Mean value of 50 replicate measurements ± standard deviation

^{a,b}... Means within a column with different letters are significantly different (p < 0.05).

3.3 Effect of coconut milk powder (CMP) on the quality of cookies.

The results of color measurements of cookies made with different levels of CMP are given in Table 6. It was found that the lightness L* value of the cookies exhibited a decreasing trend with increasing substitution

levels of CMP. The reduction in L* value indicated that the cookies became darker at higher substitution levels compared to the control sample. There was no significant difference in the b* value between the control and CMP cookies. The changes in color of cookies made with CMP were consistent with the findings of Phungamngoen *et al.* (2009), who reported that coconut

milk heated above 110° C results in a significant decrease in L* and a* values, while the b* value tended to increase. From the color analysis of coconut milk, it was found that the color changed to brown when the temperature was higher. The sterilization temperature which was higher than 100°C caused a browning reaction (non-enzymatic browning), resulting in a decrease in the L* value and a significant increase in the a* and b* values (Phuttarakmongkol *et al.*, 2008).

Commercial CMP had Maltodextrin as an ingredient. Maltodextrin is widely used for partial replacement of fats in variety of processed foods because of its ability to form a particle gel cream in food systems (Hye *et al.*, 2001). The increasing amount of CMP caused the spread ratio to decrease (Table 7). Control cookies and cookies with 15%, 30% and 45% CMP had spread ratios of 2.14, 2.06, 2.05 and 1.70, respectively, which was consistent with the findings reported by Alyaqoubi *et al.* (2015). They found that the addition of Maltodextrin at 0%, 4.5%, 9%, 13.5%, 18% and 22.5% of wheat flour caused the spread ratio of cookies to tend to decrease, with values of 3.03, 2.90, 2.79, 2.67, 2.57 and 2.50, respectively. Baking loss in control, 15%, and 30% CMP cookies was 13.54%, 13.14%, and 13.80% respectively, with no statistically significant differences. In cookies with 45% CMP, the baking loss was 10.75%, which was statistically different from the other treatments (Table 7). Charoenphun and Kwanhian (2019) reported that in a study on *Alpinia nigra* Burt cookies, the weight loss of cookies varied directly with the amount of butter.

The sensory properties of cookies can be affected by the CMP addition. The data on sensory scores as shown in Table 8 indicated that there were significant differences in color, odor, taste, texture, and overall acceptability between the control cookies and those prepared with 15%, 30%, and 45% CMP. Color is an important quality indicator of food system that can affect consumer acceptance. The color scores of the cookies ranged from 6.93 to 7.50; control sample had the lowest value (6.93) while the 30% CMP cookies had the highest value (7.50). There was no significant difference between control and 45% CMP cookies. Odor is a key process control parameter. The presence

and character of odors indicate how well the process is being managed. The odor rating of 15% and 30% CMP cookies were significantly different from those of the control and 45% CMP cookies, with no significant difference between the control and 45% CMP cookies. The odor scores for the 15%, 30%, and 45% CMP were 7.05, 7.30, and 6.45, respectively. Taste is the primary factor determining the acceptability of any product and has the greatest impact on its market success. There was a significant difference in taste among the treatments. The 30% CMP cookies had the highest taste score (7.13), while the 45% CMP cookies had the lowest (6.38). Texture is the sensory manifestation of the structure of food and the manner in which the structure reacts to the applied force. It is one of the most important parameters connected to product quality. Texture analysis involves measuring the properties related to how a food feels in the mouth during the initial bite. There was no significant difference in the texture scores between the cookies made with 30% CMP, which showed the highest texture score, and those made with 15% CMP. The cookies made with 45% CMP showed the lowest texture score. Overall acceptability includes many factors and is the important parameter in organoleptic evaluation. The overall acceptability expresses how the consumers or panelists accept the product generally. Commercial CMP contained maltodextrin as an ingredient. A-sa *et al.* (2023) reported that the drying condition that produced the greatest quality and highest powder recovery was the application of 20 g of maltodextrin per 100 g of coconut milk. The 30% CMP cookies had the highest score for overall acceptability (7.60) while the lowest was recorded from the 45% CMP cookies (6.15). The result was consistent with the findings of Thongnok (2024), who reported that substituting Maltodextrin at 30% in cookies led to the highest overall preference, while the substitution of Maltodextrin at 50% and 70% in cookies resulted in decreased overall preference compared to the control cookies. The nutritional composition, expressed as g/100 g in weight, of the Nutmeg-CMP wheat-rice cookies were 5.66% moisture content, 69.70% carbohydrate, 18.24 % fat, 6.10 % crude protein, 1.30 % ash, and 0.88 % dietary fiber.

The water activity was 0.38 (Table 9). The nutritional value of cookies varies depending on the ingredients used. According to the Community Product Standard

No.118/2003 guidelines for cookies, only the moisture content is specified, which should not exceed 7%

Table 6 Effect of CMP on L*, a* and b* values of cookies

Cookie treatment	L* value	a* value	b* ^{ns} value
1 Control	56.04±0.04 ^a	13.43±0.02 ^c	37.08±0.03
2 Margarine substitution with 15% CMP	55.73±0.37 ^a	13.65±0.05 ^c	36.38±0.74
3 Margarine substitution with 30% CMP	54.69±0.11 ^b	14.53±0.10 ^b	35.91±0.02
4 Margarine substitution with 45% CMP	52.58±0.45 ^c	15.57±0.35 ^a	36.21±2.20

Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation

^{a,b,...} Means within a column with different letters are significantly different (p < 0.05).

Table 7 Effect of CMP on Spread ratio and Baking loss (%) of cookies

Cookie treatment	Spread ratio	Baking loss (%)
1 Control	2.14±0.02 ^a	13.54±0.06 ^a
2 Margarine substitution with 15% CMP	2.06±0.05 ^{ab}	13.14±0.50 ^a
3 Margarine substitution with 30% CMP	2.05±0.06 ^b	13.80±0.22 ^a
4 Margarine substitution with 45% CMP	1.70±0.02 ^c	10.75±0.90 ^b

Table 8 Effect of CMP on Sensory evaluation of cookies

Cookie treatment	Color	Odor	Taste	Texture	Overall acceptance
1. Control	6.93±0.76 ^b	6.68±1.20 ^{bc}	6.10±1.32 ^c	6.50±1.29 ^b	6.70±1.94 ^c
2. Margarine substitution with 15% CMP	7.20±0.79 ^{ab}	7.05±1.74 ^b	6.65±1.07 ^{ab}	6.73±1.88 ^{ab}	7.13±1.76 ^b
3. Margarine substitution with 30% CMP	7.50±0.93 ^a	7.30±1.22 ^{ab}	7.13±1.27 ^a	7.13±1.99 ^a	7.60±1.90 ^a
4. Margarine substitution with 45% CMP	6.95±0.88 ^b	6.45±1.30 ^c	6.25±1.92 ^{bc}	6.38±1.84 ^b	6.15±1.12 ^d

Mean value of 50 replicate measurements ± standard deviation

^{a,b,...} Means within a column with different letters are significantly different (p < 0.05).

Table 9 Nutritional compositions of Nutmeg-CMP wheat-rice cookies

Nutritional compositions	
Water activity	0.38±0.00
Moisture (%)	5.66±0.04
Carbohydrate (%)	69.70±1.76
Fat (%)	18.24±0.09
Crude Protein (%)	6.10±0.13
Ash (%)	1.30±0.05
Dietary fiber (%)	0.88±0.02

4. Conclusion

This study has shown that the products from locally grown plants dried nutmeg pulp and CMP affect the quality of wheat-rice cookies. According to the results of sensory evaluation, the wheat-rice cookies containing 2% nutmeg and 30% CMP as a margarine substitution received the highest score from the panelists. These findings provide values insights for enhancing guidelines on utilizing nutmeg and CMP in cookie formulations, as well as expanding their application in various baked products.

5. Acknowledgments

The research work was funded by Rajamangala University of Technology Srivijaya.

6. References

- Akesowan, A. 2002. Effect of reducing levels of sugar content on quality characteristics of reduced-calorie cake and cookie made with konjac flour, sorbitol, and polydextrose. **Food** 32(4): 291-299. (in Thai)
- Alyaqoubi, S., Abdullah, A., Samudi, M., Abdullah, N., Addai, R.Z. and Musa, H.K. 2015. Study of antioxidant activity and physicochemical properties of coconut milk (*Pati santan*) in Malaysia. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research** 7(4): 967-973.
- Anprung, P. 2008. **Principle of sensory evaluation of food** (2nd ed). Chulalongkorn University Printing House, Bangkok. (in Thai)
- AOAC. 2000. **Official methods of analysis of AOAC international** (17thed). Maryland.
- A-sa, K., Jittanit, W. and Charoensiddhi, S. 2023. Processing of coconut milk powder using spray drying technique and Carboxymethylcellulose produced from coconut residue, pp. 681-689. *In The Proceeding of 61st Kasetsart University Annual Conference Science, Engineering and Architecture, Agro-Industry, Natural Resources and Environment*. Kasetsart University. (in Thai)
- Assa, J. A. , Widjanarko, S. B. , Kusnadi, J. and Berhimpon, S. 2014. Antioxidant potential of flesh, seed and mac of nutmeg (*Myristica fragrans* Houtt.). **International Journal of ChemTech Research** 6(4): 2460-2468.
- Bolarinwa, I.F. , Lim, P.T. and Muhammad, K. 2019. Quality of gluten-free cookies from germinated brown rice flour. **Food Research** 3(3): 199-207.
- Chalermesaen, P. and Kitnok, A. 2016. **Research Report on Drying of rice noodle (Khanom jeen)**. Rajabhat Maha Sarakham University. (in Thai)
- Charoenphun, N. and Kwanhian, W. 2019. Production of gluten free cookies supplemented with durian rind flour. **Science and Technology RMUTT Journal** 9(2): 23-38. (in Thai)
- Chooklin, S. , Purintrapibal, P. and Maudsri, T. 2019. **Research Report on Optimum production of snack food from indigenous brown rice flour of southern of Thailand with twin screw extruder**. Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- Chuaajedton, J. and Purintrapibal, P. 2017. **Research Report on Local rice cookie**. Faculty of Agro- Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- Farheena I. , Avanish, K. and Uzma, A. 2015. Development and quality evaluation of cookies fortified with date paste (*Phoenix dactylifera* L). **International Journal of Science, Engineering and Technology** 3(4): 975-978.
- Fathonah, S. , Rosidah, Setyaningsih, D.N. , Paremita, O., Istighfarin, N. and Litazkiyati. 2018. The sensory Quality and Acceptability of pumpkin in flour cookies, pp.439-445. *In Proceeding of the 7th Engineering International Conference on Education, Concept and Application of Green Technology*. Universitas Negeri Semarang.
- Gupa, S.S. , Sood, M. , Gupta, N. , Bandral, J.D. and Langeh, L. 2022. Food browning, its type

- and controlling measure: A review. **Chemical Science Review and Letters** 11(41): 29-45.
- Hye, K., Hyeon, Y., Hyesook, L. and Seung-Taik, L. 2001. Replacement of shortening in yellow layer cakes by corn dextrins. **Cereal Chem** 78(3): 267-271.
- Inyang, U.E., Effiong, C.E. and Edima- Nyah, A.P. 2018. Physical properties, nutritional composition and sensory evaluation of cookies prepared from rice, unripe banana and sprouted soybean flour blends. **International Journal of Food Science and Biotechnology** 3(2): 70-76.
- Jindamung, Y. and Thipbharos, P. 2012. Stability of Anthocyanin from red Roselle (*Hibiscus sabdariffa* Linn.) residue in the sweet sticky rice. **Suthiparithat Journal** 26(80): 129-146. (in Thai)
- Karunasiri, A.N., Gunawardane, M., Senanayake, C. M., Jayathilaka, N. and Seneviratne, K.N. 2020. Antioxidant and nutritional properties of domestic and commercial coconut milk preparation. **International Journal of Food Science** 2020(4): 1-9.
- Kulkarni, S.W., Sakhale, B.K., Pawar, V.D., Miniyar, U. G. and Patil, B.M. 2010. Studies on sensory quality of cookies enriched with mushroom powder. **Food Science Research Journal** 1(2): 90-93.
- Madhusankha, G.D.M.P., Thilakaratha, L.T. and Navaratne, S.B. 2018. Analysis of Curcumin content in Sri Lankan and Indian Turmeric rhizomes and investigating its impact on the colour. **International Journal of Food Science and Nutrition** 3(4): 3-5.
- Manasa, P.L., Kamble, A.D. and Chilakamarthi, U. 2023. Various extraction techniques of Cucumin-A comprehensive review. **American Chemical Society** 8: 34868-34878.
- Memedi, B. 2023. Comparative studies of influence of palm oil on activity of xanthine oxidase and free radicals in liver and blood: Diabetes and metabolic syndrome. **Electronic Journal of General Medicine** 20(6): em551.
- MGRonline. 2024. **Biscuit market expected to grow by 10% to billion, URC Shows off its No.1 from, invents 500 million to enter the market.** **MGRonline.** Available Source: <https://mgronline.com/business/detail/9670000004120>, January 15, 2024. (in Thai)
- Nooake, S., Posiri, W., Saeton, S., Ratanasammicng, R., Panitcmkil, R., Boonyanupong, U., Preecha, R., Sengzim, P. and Rammanee, Y. 2009. **Khai Mod Rin (NSRC95001-1-3) Local rice for Muang Nakhon.** Available Source: https://tarr.arda.or.th/preview/item/3t_CqaoVF_TAOQFCKbd60_, January 15, 2024. (in Thai)
- Nur, A., Fiskia, E., Rahman, I. and Sapsuha, Y. 2023. Gastroprotective activity of nutmeg flesh extract (*Myristica fragrans* Houtt.) on acetosal-induced white rat. **Azerbaijan Medical Journal** 63(2): 7359-7365.
- Panghal, A., Chhikara, N. and Khatkar, B.S. 2018. Effect of processing parameters and principal ingredients on quality of sugar snap cookies: A response surface approach. **Journal of Food Science** 55(8): 3127-3134.
- Phungamngoen, C., Choosuk, N. and Suwan, T. 2009. Effect of thermal processing on the color of coconut milk. **KKU Research Journal** 14(9): 861-870. (in Thai)
- Phuttarakmongkol, S., Hemkhot, S., Phungamngoen, C. and Kittipongpittaya, K. 2008. Effect of fat content and sterilizing temperature on the color of coconut milk. **The Journal of KMUTNB** 18(1): 80-88. (in Thai)
- Renzo, A., Tedjakusuma, F. and Surya, R. 2022. Cookies product development with the addition of turmeric extract, pp.1-6. **In The 6th International Conference on Eco Engineering Development.** Institute of Physics Publishing Ltd., BINUS University.
- Saric, B. M., Nedeljkovic, N. M., Simurina, O. D., Pestoric, M.V., Kos, J.J., Mandic, A.I., Sakac, M.B., Saric, L.C., Psodorov, D.B., Misan, A. C. 2014. The influence of baking time and temperature on characteristics of gluten free

- cookies enriched with blueberry pomace. **Food and Feed Research** 41(1): 39-46.
- Sedlacek, T. and Svec, I. 2003. Water absorption of food wheat flour- comparison of direct and indirect methods. **Croatian Journal of Food Science and Technology** 15(2): 163-172.
- Sipahelut. G. S. , Kastanja, Y. A. and Patty, Z. 2020. Antioxidant activity of nutmeg fruit flesh-derived essential oil obtained through multiple drying methods. **EurAsian Journal of BioSciences** 14: 21-26.
- Sresatan, P. , Dhamvithee, P. , Nualkaekul, S. , Hudthagosol, C. and Sanporkha, P. 2024. Optimization of rice flour, corn starch and modified tapioca starch to produce gluten free cookie. **Natural and Life Science Communications**. Available Source: <https://cmuj.cmu.ac.th/nisc/journal/article/1051>, November 27, 2024.
- Tang, D.S. 2019. The usage of Anthocyanin in extracted from Roselle Calyx in carbonated Roselle juice. **Journal of Home Economic Technology** 1(2): 18-26. (in Thai)
- Tanongkankit, Y. and Poonnoi, P. 2014. **Research Report on Production of Natural food colorant from gac aril**. Maejo University. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2003. **Guidelines of Thai community standard product (No. 118/ 2003) Title: Cookie**. Ministry of Industry Institute, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2005. **Guidelines of Thai community standard product (No. 1058/ 2005) Title: Dried nutmeg seasoning**. Ministry of Industry Institute, Bangkok. (in Thai)
- Thammapat, P., Saenmahachai, W., Boryai, S. and Ponkham, K. 2021. Effects of far-infrared and hot air drying methods on physical chemical and antioxidant properties of Turmeric (*Curcuma longa* L.). **Prawarun Agricultural Journal** 18(2): 8-15. (in Thai)
- Thongnok, S. 2024. Effects of Sungyod rice flour and maltodextrin on quality of cookies.

Rajamangala University of Technology
Srivijaya Research Journal 16(1): 243-254.
(in Thai)



Research Article

การศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบ พลาสติกและไม้

A Study of Slot Milling Factors Affecting the Machined Surface Quality of Wood - Plastic Composites

วิมเนศ เพชรสุวรรณ และ กุลภัทร์ ทองแก้ว *

Wikanet Phetsuwan and Kunlapat Thongkaew *

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-26

Revised: 2024-05-24

Accepted: 2024-05-28

Keywords:

slot milling;

wood-plastic composite;

experimental design;

surface roughness;

burr formation

Wood-plastic composites require a molding process to fabricate composite wood products which limits the ability to create basic forms. To develop complex items, manufacturers must use a milling process, which can create for several patterns. Therefore, this research aims to investigate the milling parameters that influence the machined surface quality of composite made from rubber wood powder and recycled polypropylene. This material has advantages in high strength and moisture resistance. The milling parameters considered were spindle speeds of 330, 610, and 850 revolutions per minute, feed rates of 43, 120, and 200 mm/min, and cutting depths of 1, 3, and 5 mm. The impact of milling parameters on surface roughness and burr formation was investigated. The results revealed that surface irregularity decreased with an increase in spindle speed, but decreased with a reduction in feed rate and cutting depth. By increasing the feed rate and spindle speed while decreasing the cutting depth, burr formation was reduced. Burr formation was greater in up milling compared to down milling due to the direction of the cutting edge's rotation direction being opposite to the feed direction of the workpiece. The recommended milling parameters were as follows: a spindle speed of 850 RPM, a feed rate of 43 mm/min, and a cutting depth of 1 mm, resulting in a surface roughness of about 6.575 μm . The minimum burr formation was approximately 0.770 mm in up milling and 0.256 mm in down milling, under the conditions of a 850 RPM spindle speed, 120 mm/min feed rate and 1 mm cutting depth. The average differences between the predicted and actual milling results were 2.136% for surface roughness, 1.639% for burr formation in up milling, and 1.87% in down milling. These results can applied to improve the milling wood and plastic composites and forecast the quality of the milled surface.

© 2025 Phetsuwan, W. and Thongkaew, K. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: kunlapat.t@psu.ac.th

Cite this article as:

Phetsuwan, W. and Thongkaew, K. 2025. A Study of Slot Milling Factors Affect the Machined Surface Quality of Wood - Plastic Composite. **Recent Science and Technology** 17(2): 262664.

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทำให้มีข้อจำกัดด้านรูปทรง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงซับซ้อนวัสดุนี้จำเป็นต้องมีการกัดชิ้นงานเนื่องจากสามารถตัดเฉือนได้หลากหลายรูปทรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อความชื้น พิจารณาปัจจัยการกัดประกอบด้วย ความเร็วรอบ 330, 610 และ 850 rpm อัตราป้อน 43, 120 และ 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1, 3 และ 5 mm ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยน ผลจากการทดลองพบว่าความหยาบผิวจะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นแต่อัตราป้อนและระยะป้อนลึกลดลง การเกิดเศษเสี้ยนจะลดลงเมื่อความเร็วรอบและอัตราป้อนเพิ่มขึ้นแต่ระยะป้อนลึกลดลง การเกิดเศษเสี้ยนแบบกักขังมีค่ามากกว่าและการกัดลงเนื่องจากการหมุนของคมตัดที่สวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน เงื่อนไขการกัดที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 850 rpm อัตราป้อน 43 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm ทำให้ความหยาบผิวมีค่าประมาณ 6.575 μm การเกิดเศษเสี้ยนต่ำสุดในการกัดชิ้นคือ 0.770 mm และกัดลง 0.256 mm อยู่ภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบ 330 rpm อัตราป้อน 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm สมการทำนายค่าความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยนพบว่าค่าเฉลี่ยความแตกต่างของค่าความหยาบผิวคือ 2.136% การเกิดเศษเสี้ยนกักขัง 1.639% และกัดลง 1.878% ตามลำดับ งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการแปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้และทำนายคุณภาพรอยกัดได้

คำสำคัญ: การกัดร่อง, วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, การออกแบบการทดลอง, ความหยาบผิว, เศษเสี้ยน

1. บทนำ

ไม้ยางพาราเป็นทรัพยากรที่สำคัญของประเทศ ปัจจุบันมีการเพาะปลูกยางพาราโดยรวม 24.1 ล้านไร่ โดยส่วนใหญ่ปลูกในภาคใต้คิดเป็น 57.6% ของพื้นที่ทั้งหมด (Ministry of Commerce, 2022) มีการนำไม้ยางพารามาแปรรูปหลากหลาย และมีการนำเศษเหลือจากการแปรรูปไม้ไปผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) (Srivabut *et al.*, 2018) ได้เข้ามามีบทบาทแทนที่ไม้ยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นในงานด้านโครงสร้าง การทำเฟอร์นิเจอร์ ของเล่นเด็ก และอุปกรณ์ตกแต่งอาคารสถานที่ เป็นต้น WPCs มีมูลค่าถึง 7 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี 2565 และมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Acumen research and consulting, 2022) เพราะมีคุณสมบัติเด่น เช่น มีความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ไม่ก่อให้เกิดเชื้อรา ขึ้นรูปได้ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Smith and Wolcott, 2006; Ratanawilai and Taneerat, 2018; Ammar *et al.*, 2022) WPCs สามารถผลิตได้โดยการนำรีไซเคิลไม้และพลาสติก สามารถผสมกับพลาสติกได้หลายชนิด เช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP), พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) และ อะคริโลไนไตรล์ - สไตรีน (Acrylonitrile-Styrene; AS-SAN) ในการขึ้นรูปวัสดุด้วยวิธีการการอัดร้อน (Huang *et al.*, 2013) หรือการฉีดเข้าแม่พิมพ์แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตามลักษณะที่ต้องการ (Cheewawuttipong *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมานั้นยังไม่สามารถใช้งานได้ทันทีเนื่องจากมีขนาดและรูปทรงจำกัด ดังนั้นหากต้องการสร้างเป็นชิ้นส่วนรูปทรงเฉพาะต้องมีการตัดเฉือนหลังการขึ้นรูป

เช่น การกัด การเจาะ การกลึง เพื่อแปรรูปให้ได้ขนาดและรูปร่างตามต้องการสำหรับการใช้งาน ซึ่งงานกัดร่องเป็นวิธีการตัดเฉือนอย่างหนึ่งที่นิยมในอุตสาหกรรมแปรรูปวัสดุเชิงประกอบ (Ratanawilai and Taneerat, 2018) มีหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดเพื่อแปรรูปไม้ (Yabo *et al.*, 2022; Hajiahmadi, 2019; Saha *et al.*, 2023) Srivabut *et al.* (2022a) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) และซีลี้อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อความเร็วรอบกัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง แต่ต้องทำการลดอัตราป้อนและความลึกในการตัดเพื่อให้ค่าความหยาบผิวลดลง Srivabut *et al.* (2022b) ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมสภาวะที่เหมาะสมต่อความหยาบผิวในการกัดข้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมของการกัดที่ทำให้เกิดค่าความหยาบผิวประมาณ 2.865 μm คือ ความเร็วรอบ 1,000 rpm อัตราป้อน 315 mm/min และความลึกในการตัด 1 mm Meiqi *et al.* (2023) ได้ทดลองกัดวัสดุผสมจากไม้ไผ่และพลาสติกเพื่อหาผลกระทบของจำนวนคมมีดกัดความเร็วในการกัด และความลึกในการกัดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงและอุณหภูมิการกัดพบว่า จำนวนคมมีดกัดมีส่งผลต่อแรงกัดและอุณหภูมิการกัดสูงที่สุด ตามด้วยความลึกและความเร็วในการกัด Ratanawilai *et al.* (2023) ได้เปรียบเทียบประเภทวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE), พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) และ พอลิไวนิลคลอไรด์

(Polyvinylchloride; PVC) ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวในการกัดผิวหน้า และพบว่าวัสดุเชิงประกอบ PP ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุด เนื่องจากการทดลองที่ต่างกันจะขึ้นอยู่กับสองปัจจัยหลักคือ คุณสมบัติเฉพาะตัวของพลาสติก เช่น อัตราการไหล ความหนาแน่น อุณหภูมิหลอมเหลว และความเข้ากันได้กับวัสดุเสริมแรง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่ต่างกันของพลาสติก

จากการสำรวจงานวิจัยข้างต้น พบว่างานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาปัจจัยการกัด เช่น การกัดผิวหน้าที่ส่งผลต่อความหยาบผิววัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับการกัดร่องมีลักษณะเฉพาะและนิยมประยุกต์ใช้ในการผลิตภัณฑ์ประเภทงานสวมประกอบ เช่น เฟอ์นเจอร์ ของเล่นเด็ก และของตกแต่งภายในอาคาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ พิจารณาปัจจัยความเร็วรอบ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึก ที่ส่งผลต่อคุณภาพการกัดประกอบด้วย ค่าความหยาบผิวและการเกิดเสี้ยนบน

ชิ้นงาน ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้แปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สำหรับการเลือกเงื่อนไขการกัดร่องได้เหมาะสม ผลิตได้คุณภาพ ลดการผลิตชิ้นงานเสีย และให้มีความหลากหลายมากขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1. วัสดุและอุปกรณ์

2.1.1 วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

งานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ซึ่งถูกพัฒนาโดย Srivabut *et al.* (2019) มีส่วนประกอบหลัก รายละเอียดดัง Table 1 คุณสมบัติ ทนแรงกระแทกได้ ทนทานต่อความชื้น และไม่ก่อให้เกิดเชื้อรา มีความต้านแรงดึง 24.82 MPa, โมดูลัสแรงดึง 1.20 GPa, กำลังอัด 22.88 MPa และโมดูลัสอัด 1.32 GPa ขนาด 55 × 55 × 18 mm ดังแสดงใน Figure 1 (Srivabut *et al.*, 2019).

Table 1 Components of RWF wood and rPP plastic composites (Srivabut *et al.*, 2019)

Mixture component	wt%
Recycled polypropylene; rPP	51.8 %
Rubberwood flour; RWF	35.9 %
Calcium carbonate; CC	7.2 %
Maleic anhydride-grafted polypropylene; MAPP	3.9 %
Ultraviolet; UV	0.2 %
Lubricant; Lub	1.0 %

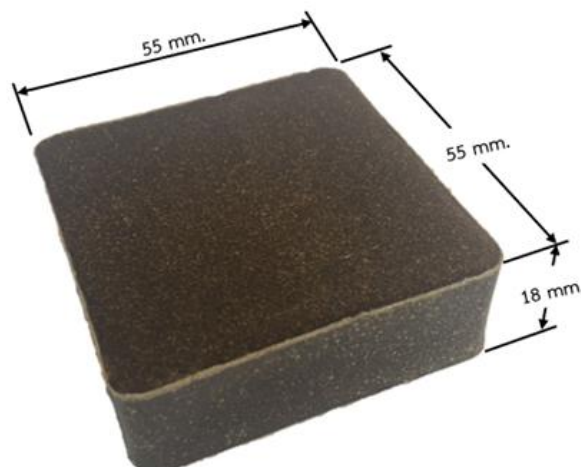


Figure 1 A sample of wood plastic composite



(A)



(B)

Figure 2 (A) a vertical milling machine and (B) an end mill.

Table 2 Slot milling parameters

Slot milling parameters	Unit	Level		
		Low	Medium	High
Speed (S)	rpm	330	610	850
Feed Rate (F)	mm/min	43	120	200
Depth of Cut (D)	mm	1	3	5

2.1.2 เครื่องกัดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องกัดแนวตั้ง มีความเร็วรอบสูงสุด 1,250 rpm อัตราป้อนสูงสุด 875 mm/min (Figure 2 (A)) ใช้ดอกกัดไม้ แบบ 3 คมตัด ผลิตจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm (Figure 2 (B))

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) เพื่อศึกษาผลกระทบหลัก (Main Factor) และผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction Factors) ของตัวแปรการกัดทุกเงื่อนไข (Ratanawilai *et al.*, 2023) กำหนดปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของปัจจัยการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยน มีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 27 สภาวะ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 81 การทดลอง พิจารณาช่วงตัวแปรการกัดจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้พบว่า ตัวแปรการกัดที่แนะนำคือ ความเร็วรอบ (Speed) ในช่วง 200-900 rpm อัตราป้อน (Feed rate) ในช่วง 40-400 mm/min และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ในช่วง 1-7 mm (Srivabut *et al.*, 2022b) ดัง Table 2

การทดลองนี้จะทำการกัดร่องชิ้นงาน ตามขนาดความกว้างดอกกัดคือ 8 mm กัดชิ้นงานตามทิศทางการ

ป้อน (workpiece feed) เป็นระยะทาง 55 mm การกัดขึ้น (Up milling) คมตัดหมุนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน และการกัดลง (Down milling) คมตัดหมุนไปในทิศทางเดียวกับการป้อนชิ้นงาน (Figure 4) ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการกัดแต่ละเงื่อนไขประมาณ 1 นาที ซึ่งเมื่อทำการทดลองทั้งหมดจะมีการกัดรวมประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ข้อกำหนดของอยู่การใช้งานดอกกัดที่แนะนำคือ 75 ชั่วโมง (End mill, 2022) ดังนั้นปัจจัยการสึกหรอของดอกกัดจึงไม่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัด

2.3 วิธีการประเมินคุณภาพรอยกัดชิ้นงาน

งานวิจัยนี้มีการประเมินคุณภาพรอยกัด 2 ส่วน คือ ค่าความหยาบผิวและการเกิดเสี้ยนของชิ้นงาน สำหรับการวัดค่าความหยาบผิวได้ใช้เครื่องวัดความหยาบผิว (Mitutoyo Corporation, 2023) มีช่วงความละเอียดจาก 0.002 μm ถึง 360 μm (Figure 3 (A)) ได้ถูกนำมาใช้ในการวัดคุณภาพรอยกัด โดยกำหนดระยะการวัดประมาณ 17.5 mm วัดซ้ำ 3 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดได้ (R_a) เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตดัง Figure 4 สำหรับการพิจารณาคุณภาพรอยกัดและการเกิดเสี้ยนได้มีการใช้กล้องไมโครสโคปแบบใช้แสงสะท้อนอเนกประสงค์กำลังขยายในช่วง 10x ถึง 100x (Figure 3 (B)) เพื่อวัดความกว้างของเศษเสี้ยน (Burr) โดยจะทำการวัดพิจารณาจาก 2 ส่วน คือ การกัดขึ้น (Up-milling) และการกัดลง (Down-milling)

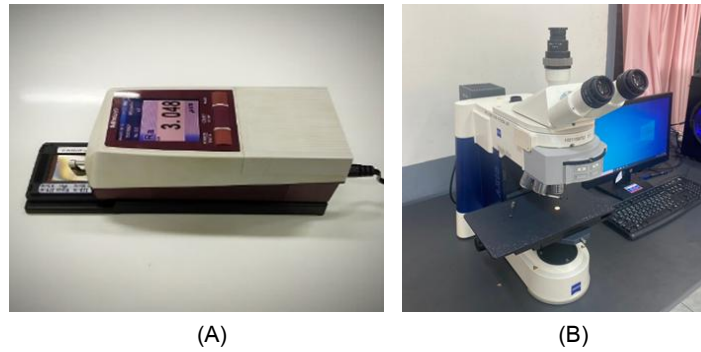


Figure 3 Equipment for workpiece quality measurement: (A) a surface roughness tester and (B) a microscope

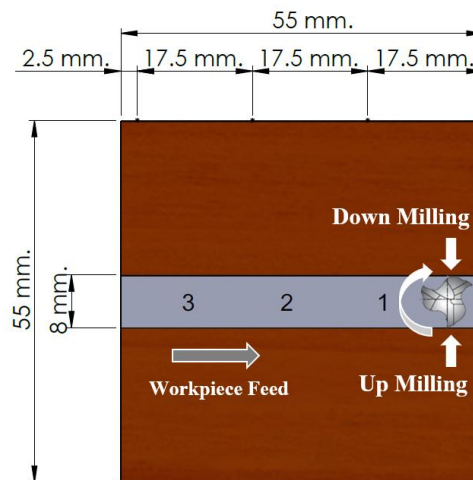


Figure 4 Diagram of slot milling operation.

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ลักษณะรอยกัดร่องประกอบพลาสติกและไม้

ลักษณะรอยกัดร่องวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ดัง Figure 5 โดยหากใช้ความเร็วรอบต่ำที่ 330 rpm อัตราป้อนสูงที่ 200 mm/min และระยะป้อนลึก 5 mm ทำให้เห็นรอยกัดชิ้นงานชัดเจนและมีค่าความหยาบผิวอยู่ที่ประมาณ 14.943 μm (Figure 5(A)) แต่ไม่มีการเกิดเศษเสี้ยน สาเหตุของความหยาบผิวสูง เนื่องจากอัตราป้อนและระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นทำให้ต้องตัดเฉือนชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หากมีการปรับความเร็วรอบสูงที่ 850 rpm ลดอัตราป้อน 43 mm/min และกำหนดระยะป้อนลึก 1 mm จะทำให้ค่าความหยาบผิวลดลงอย่างชัดเจน (Figure 5 (B)) แต่ส่งผลให้เกิดเศษเสี้ยนด้านบนชิ้นงาน (Saha *et al.*, 2023) โดยเฉพาะเสี้ยนบริเวณการกัดขึ้น ($Burr_1$) จะมีปริมาณมากกว่าการกัดลง ($Burr_2$) เนื่องจากคมตัดหมุนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน (Yabo *et al.*, 2022)

3.2 การวิเคราะห์ปัจจัยก่อกำเนิดที่ส่งผลต่อการความหยาบผิว

ผลจากการทดลองการกัดร่องภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ถูกวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Version 12 (Stat Ease, 2023) ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบความปกติของข้อมูลความหยาบผิว

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลความหยาบผิวเพื่อยืนยันดัง Figure 6 พบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ (Figure 6 (A)) กระดาษตัวของข้อมูลเป็นอิสระ (Figure 6 (B)) มีความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Figure 6 (C)) และข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นซึ่งสามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้ (Figure 6 (D)) ดังนั้นสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวได้ (Ratanawilai *et al.*, 2023)

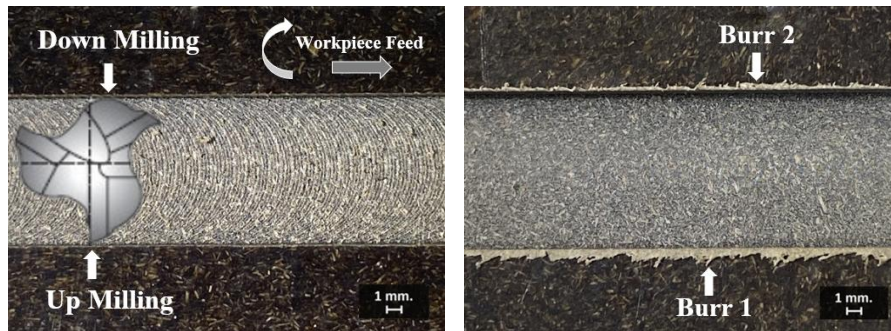


Figure 5 Characteristics of machined surface finish in slot milling (A) a case of no burr generation (B) a case of burr generation.

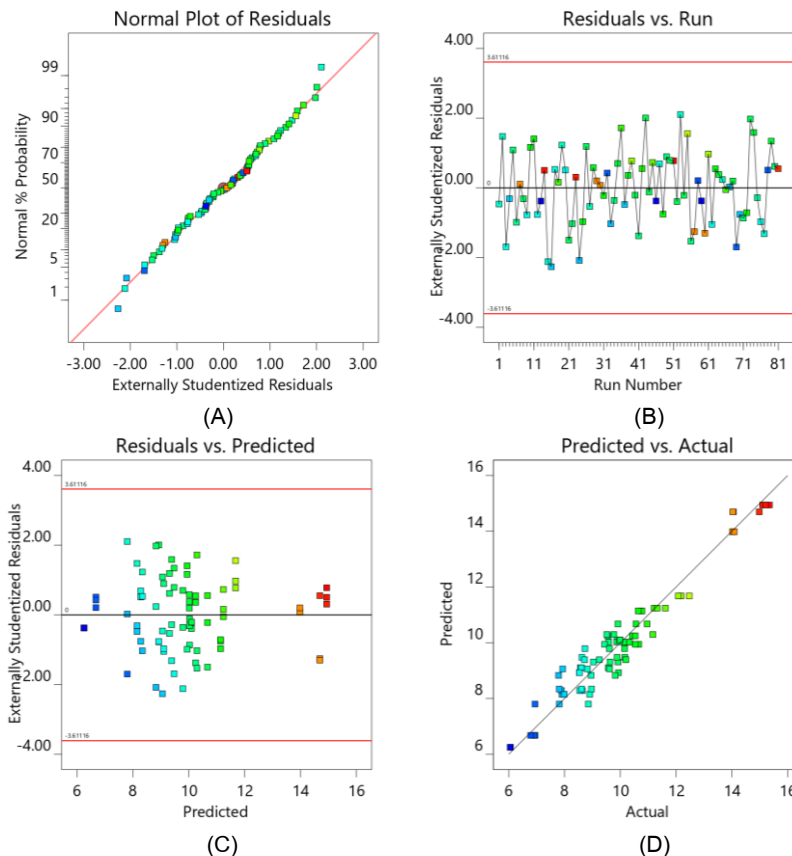


Figure 6 Normality analysis for surface roughness (A) normal probability examination (B) residuals vs. run examination (C) residuals vs. predicted response examination and (D) actual vs. predicted response examination.

3.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิว โดยพิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัยการกัด คือ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อน (F) และระยะป้อนลึก (D) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 3) พบว่าปัจจัยการกัดทั้งหมดมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความเร็วรอบมีผลต่อค่าความ

หยาบผิวมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยร่วม คือ ความเร็วรอบกับอัตราป้อน (SF) ความเร็วรอบกับระยะป้อนลึก (SD) และอัตราป้อนกับระยะป้อนลึก (FD) พบว่ามีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srivabut *et al.* (2022c) รายงานว่าปัจจัยหลักมีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05

Table 3 Variance analysis (ANOVA) for surface roughness

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	342.90	26	13.19	40.90	< 0.0001*
<i>S</i>	169.70	2	84.85	263.11	< 0.0001*
<i>F</i>	73.68	2	36.84	114.23	< 0.0001*
<i>D</i>	39.50	2	19.75	61.24	< 0.0001*
<i>SF</i>	40.98	4	10.24	31.77	< 0.0001*
<i>SD</i>	7.79	4	1.95	6.04	0.0004*
<i>FD</i>	7.27	4	1.82	5.64	0.0007*
<i>SFD</i>	3.98	8	0.4978	1.54	0.1642
Pure Error	17.41	54	0.3225		
Cor Total	360.32	80			

$R^2 = 89.88$

Note: * Refers to a significant factor

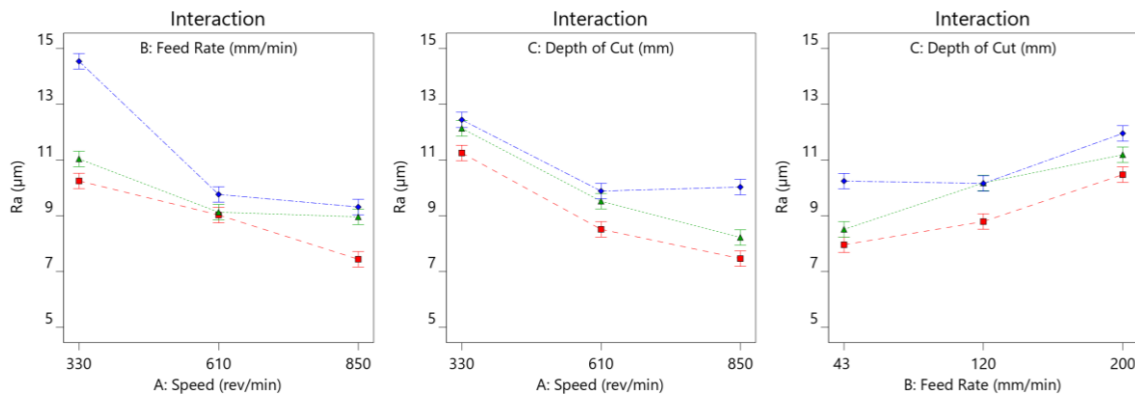


Figure 7 Analysis of factors affecting surface roughness values. (A) speed and feed rate (B) speed and depth of cut and (C) feed rate and depth of cut.

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวดัง Figure 7 พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง (Figure 7 (A)) แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนและระยะป้อนลึกทำให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น (Figure 7 (B) และ (C)) สาเหตุเนื่องจากอัตราป้อนและระยะป้อนลึกที่ทำให้ต้องตัดเฉือนชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srivabut *et al.* (2022c) เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง ปัจจัยอัตราป้อนและระยะป้อนลึกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคืออัตราป้อนและระยะป้อนลึกต่ำส่งผลให้ค่าความหยาบผิวต่ำ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวพบว่าความหยาบผิวที่ต่ำเกิดจากใช้ความเร็วรอบสูงแต่อัตราป้อนและระยะป้อนลึกต่ำ

3.2.3 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความหยาบผิว

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตัวแปรการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวแล้วสามารถสร้างสมการถดถอยของความหยาบผิวเพื่อใช้ประโยชน์ในการทำนายค่าความหยาบผิว ดังแสดงในสมการที่ (1) โดยค่าความผันแปร R^2 มีค่า 89.88 และค่า Adjusted R^2 มีค่า 88.44 สามารถนำสมการไปทำนายผลเพื่อหาคำตอบได้

$$R_a = 9.94 + 2.00 S - 0.6336 F - 1.04 D - 0.2309 F^2 - 0.8647 D^2 + 0.0190 S D - 0.6585 S F + 0.7551 S D^2 - 0.6730 S F^2 + 0.0525 S F D \quad (1)$$

โดยตัวแปร R_a คือ ความหยาบผิว

มีการวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการกัดร่องวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิว (R_a) มีค่าน้อยที่สุด พบว่าเงื่อนไขการกัดที่แนะนำเพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดคือเงื่อนไขที่ค่าความเร็วรอบ 850 rpm อัตราป้อน 43 mm/min และระยะ

บอนเล็ก 1 mm ให้ค่าความหยาบผิวประมาณ 6.575 μm
ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต้องมีการปรับแก้ผิวหลังการกัดตาม
มาตรฐานความหยาบผิว ISO 1302 (ISO, 2002)

Srivabut *et al.* (2022c) พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยابผิวลดลง หากลดอัตราป้อนและระยะป้อนก็ลดลงส่งผลให้ค่าความหยابผิวลดลง ผู้วิจัยทดลองสั้ทุกัดทั้งหมด 10 เงื่อนไข คือค่าความเร็วรอบ 330, 610 และ 850 rpm อัตราการป้อน 43, 120 และ 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1, 3 และ 5 mm ทำการประเมินผลการกัดเปรียบเทียบกับการทำงานพบว่า ความแตกต่างค่าทำนายความหยابผิวและค่าความหยابผิวที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.136% น้อยกว่า 5% ซึ่งสามารถยอมรับได้ดัง Table 4

3.3 การวิเคราะห์ปัจจัยการกีดที่ส่งผลต่อการเกิดเศษเสี้ยน

3.3.1 การตรวจสอบความปกติของข้อมูลการเกิด เศษเสี้ยน

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลการเกิด
เศษเสี้ยนด้านบนทั้ง 2 ส่วน คือ การกัดขึ้น (up-milling)
และการกัดลง (down-milling) (Figure 8) and (Figure 9)
พบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ กระจายตัวของ
ข้อมูลเป็นอิสระ มีความเสถียรภาพของความแปรปรวน
และข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นเช่นเดียวกับค่าความ
หยาบผิว ซึ่งสามารถสรุปนำข้อมูลไปการวิเคราะห์ความ
แปรปรวนของของการเกิดเศษเสี้ยนของการกัดต่อไปได้

Table 4 Comparing calculated values from regression equations and actual measured values. (R_a)

[illegible]

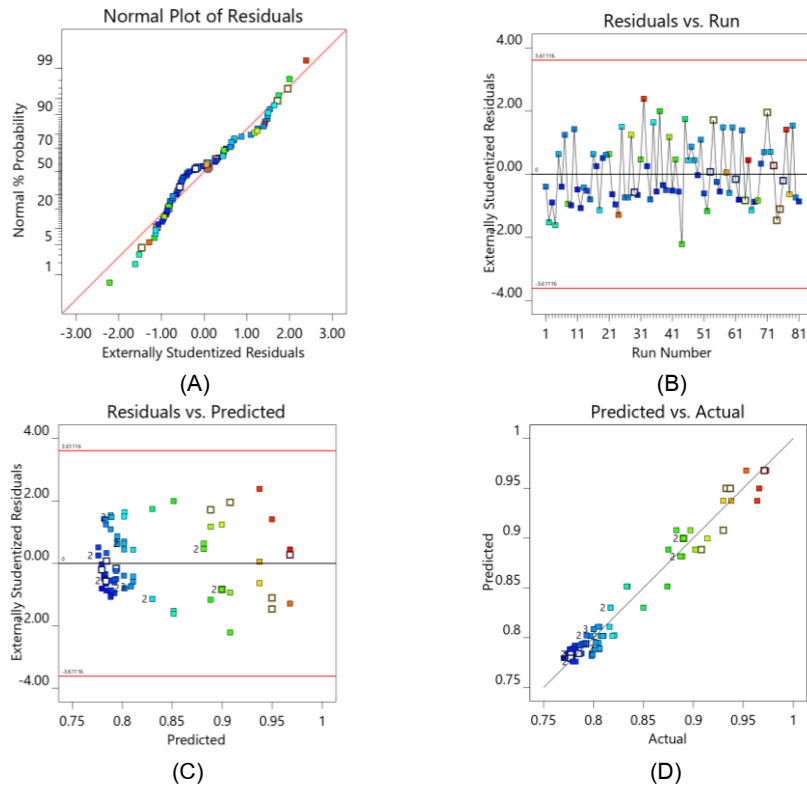


Figure 8 Normality analysis for burr formation (up-milling): (A) normal probability examination (B) residuals vs. run examination (C) residuals vs. predicted response examination and (D) actual vs. predicted response examination.

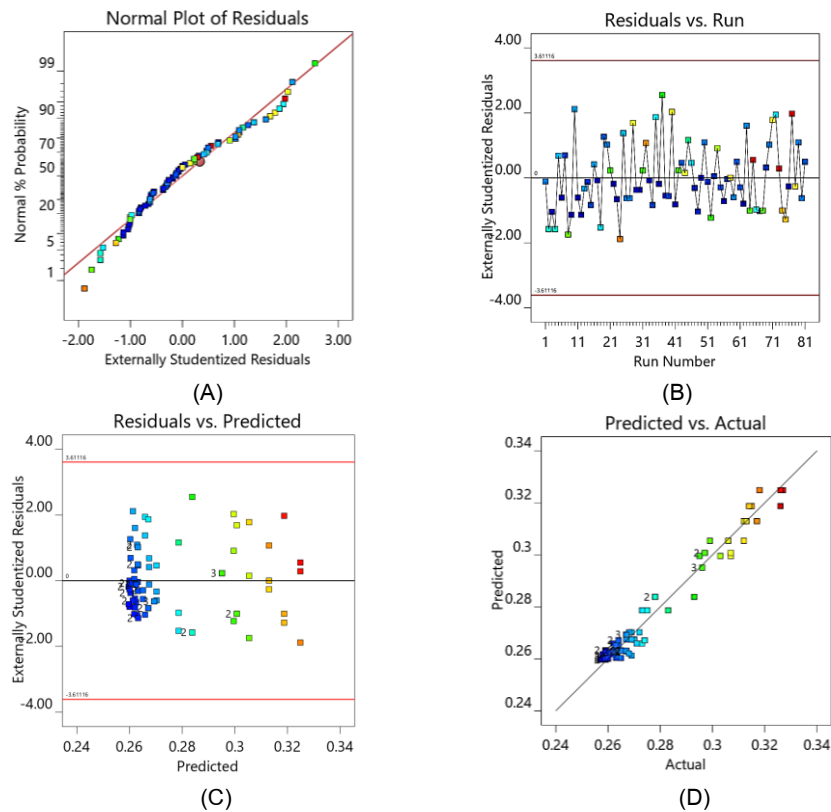


Figure 9 Normality analysis for burr formation (down-milling): (A) normal probability examination (B) residuals vs. run examination (C) residuals vs. predicted response examination and (D) actual vs. predicted response examination.

3.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเกิด เศษเสี้ยน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเกิดเศษเสี้ยนโดยพิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัยการกัด คือ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อน (F) และระยะป้อนลึก (D) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดัง Table 5 และ Table 6 พบว่า

ปัจจัยการกัดทั้งสามมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อการเกิดเศษเสี้ยนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอัตราป้อนมีผลต่อมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยร่วม คือ ความเร็วรอบกับอัตราป้อน (SF) ความเร็วรอบกับระยะป้อนลึก (SD) และอัตราป้อนกับระยะป้อนลึก (FD) พบว่ามีผลต่อการเกิดเศษเสี้ยนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05)

Table 5 Results of variance analysis for burr formation (up-milling)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.2755	26	0.0106	68.55	< 0.0001*
S	0.0215	2	0.0108	69.67	< 0.0001*
F	0.1173	2	0.0587	379.54	< 0.0001*
D	0.0458	2	0.0229	148.11	< 0.0001*
SF	0.0112	4	0.0028	18.15	< 0.0001*
SD	0.0365	4	0.0091	59.11	< 0.0001*
FD	0.0406	4	0.0101	65.63	< 0.0001*
SFD	0.0025	8	0.0003	2.03	0.0602
Pure Error	0.0083	54	0.0002		
Cor Total	0.2838	80			

R² = 92.22

Table 6 Results of variance analysis for burr formation (down-milling)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.0331	26	0.0013	69.72	< 0.0001*
S	0.0027	2	0.0013	73.77	< 0.0001*
F	0.0144	2	0.0072	395.06	< 0.0001*
D	0.0057	2	0.0029	156.80	< 0.0001*
SF	0.0012	4	0.0003	16.54	< 0.0001*
SD	0.0042	4	0.0010	57.32	< 0.0001*
FD	0.0047	4	0.0012	64.46	< 0.0001*
SFD	0.0002	8	0.0000	1.04	0.4180
Pure Error	0.0010	54	0.0000		
Cor Total	0.0341	80			

R² = 93.12

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักการกัดที่ส่งผลต่อค่าเกิดเศษเสี้ยนกัดขึ้นดัง Figure 10 และ Figure 11 พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 330 เป็น 850 rpm ส่งผลให้ค่าเกิดเศษเสี้ยนเพิ่มขึ้น (Figure 10 (A) และ 11 (A)) แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนส่งผลให้ค่าเกิดเศษเสี้ยนลดลง (Figure 10 (B) และ 11 (B)) และเมื่อเพิ่มระยะป้อนลึกส่งผลให้ค่าเกิดเศษเสี้ยนเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้อัตราการตัดเฉือนชิ้นงานมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าเกิด

เศษเสี้ยนเพิ่มขึ้น (Figure 10 (C) และ 11 (C)) ดังนั้นหากต้องการค่าการเกิดเศษเสี้ยนที่ต่ำต้องใช้ความเร็วรอบต่ำแต่ต้องกำหนดอัตราป้อนสูงและระยะป้อนลึกต่ำ การเกิดเศษเสี้ยนของการกัดขึ้นจะมีปริมาณมากกว่าการกัดลงเนื่องจากคมตัดหมุนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน (Yabo *et al.*, 2022) จึงทำให้เศษเสี้ยนกระจายออกไปด้านข้าง

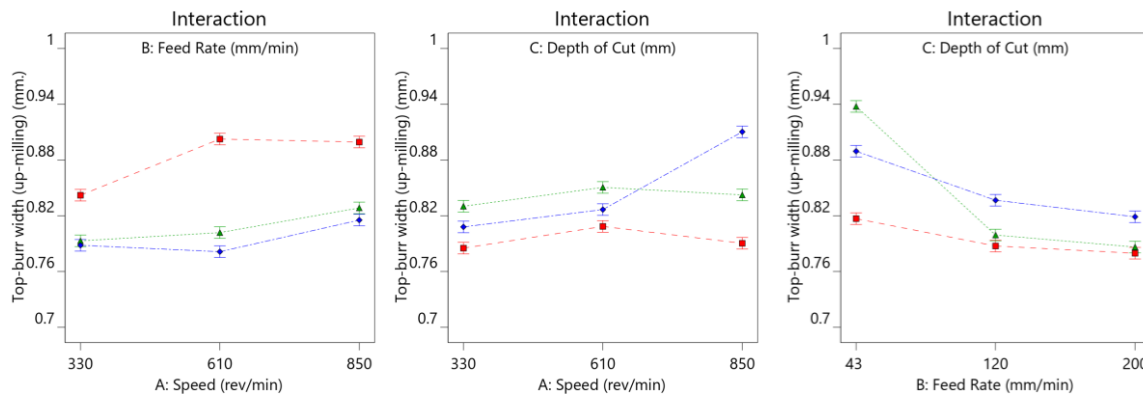


Figure 10 Analysis of factors affecting on the burr formation (up milling): (A) speed and feed rate (B) speed and depth of cut and (C) feed rate and depth of cut

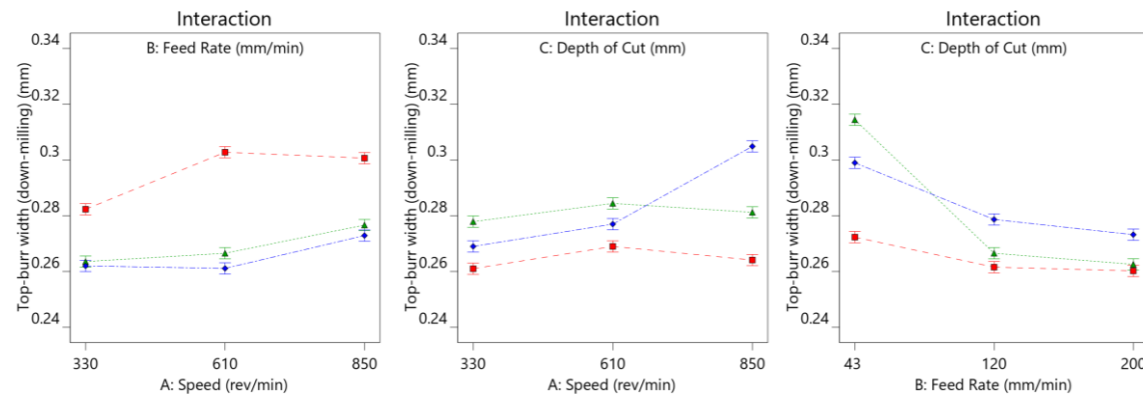


Figure 11 Analysis of factors affecting on the burr formation (down milling): (A) speed and feed rate (B) speed and depth of cut and (C) feed rate and depth of cut

3.3.3 การวิเคราะห์สมการถดถอยของการเกิดเศษเสี้ยน

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตัวแปรการกัดที่ส่งผลต่อการเกิดเศษเสี้ยนสามารถสร้างสมการถดถอยที่ทำนายค่าเศษเสี้ยนกัดขึ้น ($Burr_1$) ดังแสดงในสมการที่ (2) โดยค่าความผันแปร R -square มีค่า 92.22 และค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 90.57 สามารถนำสมการไปทำนายผลเพื่อหาคำตอบได้

$$Burr_1 = 0.8280 - 0.0202 S + 0.0006 S + 0.0533 F - 0.0202 F - 0.0334 D + 0.0130 D + 0.0107 SD + 0.0133 SD + 0.0094 SD + 0.0089 SD - 0.0311 FD + 0.0130 FD + 0.0433 FD - 0.0216 FD \quad (2)$$

โดยตัวแปร $Burr_1$ คือ การเกิดเศษเสี้ยนกัดขึ้น

การทำนายค่าเศษเสี้ยนกัดลง ($Burr_2$) ดังแสดงในสมการที่ (3) โดยค่าความผันแปร R -square มีค่า 93.12

No.	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Cal. Burr (F _t)	Actual Burr (d _t)	Error e _t = d _t -F _t	$\frac{ e_t }{d_t} \times 100$
1	850	43	1	0.270	0.268	-0.002	0.746
2	610	120	1	0.263	0.267	0.004	1.498
3	610	43	3	0.325	0.317	-0.008	2.524
4	850	43	3	0.313	0.317	0.004	1.262
5	610	43	5	0.299	0.313	0.014	4.473
6	330	120	5	0.266	0.271	0.005	1.845
7	850	120	1	0.262	0.268	0.006	2.239
8	330	43	1	0.263	0.259	-0.004	1.544
9	610	200	5	0.262	0.266	0.004	1.504
10	610	200	1	0.260	0.263	0.003	1.141
MAPE							1.878

4. สรุป

การกัดร่องเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้ในการแปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึกที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยน ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการถดถอย ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก มีผลต่อคุณภาพรอยกัด โดยเงื่อนไขการกัดร่องที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ ความเร็วรอบ 850 rpm อัตราป้อน 43 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm เกิดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ $6.575\ \mu\text{m}$ สามารถลดขั้นตอนการปรับแต่งผิวได้ เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการเกิดเศษเสี้ยนน้อยที่สุด คือ ความเร็วรอบ 330 rpm อัตราป้อน 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm ซึ่งทำให้เกิดเศษเสี้ยนกีดขึ้น $0.784\ \text{mm}$ และกีดลง $0.262\ \text{mm}$ การเกิดเศษเสี้ยนในการกัดขึ้นมีค่ามากกว่ากีดลงเนื่องจากคมกัดส่วนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงานทำให้เกิดแรงต้านและส่งผลต่อการเกิดเสี้ยนเพิ่มขึ้น เมื่อทำการพัฒนาสมการทำนายค่าความหยาบผิวและการเกิดเสี้ยนและทดสอบผลความแม่นยำพบว่าค่าความแตกต่างจากสมการทำนายเทียบกับจากการทดลองของค่าความหยาบผิวมีค่าเฉลี่ย 2.136% เศษเสี้ยนการกัดขึ้นมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.639% และเศษเสี้ยนการกัดลงมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.878% น้อยกว่า 5% แสดงให้เห็นว่าสมการมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ผลจากการศึกษาสามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับกระบวนการกัดแปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เพื่อใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในรูปแบบต่าง ๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ ดำเนินงานวิจัย และสถานที่ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

Acumen research and consulting. 2022. **Wood Plastic Composites Market Analysis - Global**

Industry Size, Share, Trends and Forecast

2022-2030. Available Source: <http://www.acumenresearchandconsulting.com/wood-plastic-composites-market>, September 8, 2022.

Ammar, H., Hitesh, P., Shanmugan, S., Muthuramalingam, T., Ahmed, M. and Ramesh, B. 2022. Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment. **Cleaner Engineering and Technology** 8(2022) 100450.

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(11): 31-46. (in Thai)

End mill. 2022. **Wood cutter**. Available Source: <https://www.26works.com>, September 16, 2023.

Hajiahmadi, S. 2019. Burr size investigation in micro milling of stainless steel 316L. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture** 2(4): 296-304.

Huang, R., Kim, B.J., Lee, S., Yang, Z. and Wu, Q. 2013. Co-extruded wood-plastic composites with talc-filled shells: morphology, mechanical, and thermal expansion performance. **BioResources** 8(2): 2283-2299.

ISO. 2002. **ISO 1302:2002(E)**. Available Source: <https://www.sharificadcam.ir/uploaded/8ed0498b-0ddb-4d36-8914-03459fa70e1c.pdf>, September 16, 2023.

Meiqi, S., Dietrich, B., Yingyue, Y., Xiaohang, D., Xiaolei, G., Jinxin, W. and Zhaolong, Z. 2023. Effects of Tool Tooth Number and Cutting Parameters on Milling Performance for Bamboo-Plastic Composite. **International Journal of Forests** (14): 433.

Ministry of Commerce. 2022. **Conditions of the Thai rubber and rubber wood products industry 2022**. Available Source: <https://www.rubber.oie.go.th/box/Article/2566>, September 1, 2022.

Mitutoyo Corporation. 2023. **Portable Surface Roughness Tester SJ-210**. Available Source: <https://www2>

- mitutoyo.co.jp/eng/support/service/catalog/03/E15028.pdf, March 27, 2023.
- 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.
- Ratanawilai, T., Jeenapong, S. and Srivabut, C. 2023. Suitable Condition for Face Milling of Wood-Plastic Composite Products on Surface Roughness. **Journal of Ladkrabang Engineering Journal** 40(1): 153-163. (in Thai)
- Saha, S., Ansary, S., Deb, S. and Bandyopadhyay, P.P. 2023. Influence of tool wear on chip-like burr formation during micro-milling, and image processing based measurement of inwardly-deflected burrs. **International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear** 530-531: 205024.
- Smith, P.M. and Wolcott, M.P. 2006. Opportunities for wood/natural fiber-plastic composites (WPCs) in residential and industrial applications. **Forest Products Journal** 56(3): 4-11.
- Srivabut, C., Ratanawilai, T. and Hiziroglie, S. 2018. Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber. **Construction and Building Materials** 162: 450-458.
- Srivabut, C., Ratanawilai, T. and Hiziroglie, S. 2019. Response surface optimization and statistical analysis of composites made from calcium carbonate filler-added recycled polypropylene and rubberwood fiber. **Journal of Thermoplastic Composites Materials** 35(3): 1-25.
- Srivabut, C., Homkhiew, C. and Rawangwong, S. 2022a. Effect of Factors and Optimal Condition in Milling Process of Composites Using I-Optimal Experimental Design. **Journal of Industrial Technology** 18(3): 260-279. (in Thai)
- Srivabut, C., Rawangwong, S., Homkhiew, C. and Rodjananugoon, J. 2022b. Optimal Condition on Surface Roughness in Side Milling of High Density Polyethylene and Rubberwood Flour Composites using Response Surface Methodology. **Journal of Ladkrabang Engineering Journal** 39(1): 23-34. (in Thai)
- Srivabut, C., Rawangwong, S. and Homkhiew, C. 2022c. Influence of Milling Parameters on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites Applying I-Optimal Experimental Design. **Journal of Ladkrabang Engineering Journal** 39(4): 22-35. (in Thai)
- Stat Ease. 2023. **Design-Expert**. Available Source: [https:// www.statease.com/software/design-expert/](https://www.statease.com/software/design-expert/), March 27, 2023.
- Yabo, Z., Qingshun, B., Yangyang, S. and Donghai, L. 2022. Burr formation mechanism and machining parameter effect in slot micro-milling titanium alloy Ti6Al4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 123(5): 2073-2086.



Research Article

อิทธิพลของสารต้านทานการดูดซึมน้ำที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษเยื่อกาบไผ่

The Effects of Water-Resistant Agents on Physical Properties, Mechanical Properties and Water Absorption Ability of Bamboo Culm Sheath Paper

วรวิดี สุขัยยะ^{a,b,*}, เปมิกา ขำวีระ^b, เจริญพร โชคบริบาล^a, สุธาทิพย์ ทองเล่ม^{a,b} และ อัยย์ญดา สิริจุลพงษ์^c
Voravadee Suchaiya^{a,b,*}, Pemika Khamweera^b, Jareonporn Chokboribal^a, Sutatip Thonglem^{a,b} and
Aiyada Sirinjullapong^c

^a สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

^a Majority of Materials Science, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, Bangkok 10220, Thailand.

^b สาขาวิชานวัตกรรมและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

^b Majority of Innovation and Product Technology, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, Bangkok 10220, Thailand.

^c สาขาเศรษฐศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

^c Majority of Home Economics, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, Bangkok 10220, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-11

Revised: 2024-05-26

Accepted: 2024-05-29

Keywords:

water-resistant paper;

bamboo culm sheath;

bamboo culm sheath paper;

water-resistant;

sizing agent

The objectives of this research were to study the production of water-resistant paper from bamboo culm sheath using a handmade method and study the influence of water-resistant agents on the physical properties, mechanical properties, and water absorption ability of the paper. Five water-resistant agents, which were rosin-alum, alkyl ketene dimers (AKD), chitosan, natural latex, and soy wax, were blended with bamboo culm sheath pulp during the paper-forming process in amounts of 1, 2, 3, and 4 % by weight, based on the pulp weight. The results showed that the optimum amount of unbleached bamboo pulp for paper formation is 40 grams. This amount produced strong, foldable, and rollable paper with the least amount of bending and shrinkage. The addition of water-resistant agents increased the weight and thickness of the paper, except for AKD and chitosan which did not lead to the significant change in paper weight. The addition of AKD significantly affected the brightness value (L^*) of the paper. Meanwhile, rosin-alum and natural latex increased the red and yellow values of the paper. Morphological studies revealed that AKD and chitosan had better distribution in the paper than rosin and alum, latex, and soy wax. For the mechanical properties of water-resistant paper, tensile strength, Young's modulus, and elongation depended on the type and amounts of water-resistant agents. The results showed that the presence of chitosan, AKD, and latex increased the modulus of the paper. Specifically, the addition of 2 %chitosan by weight led to the highest tensile strength and modulus values ($P \leq 0.05$), which were 3.81 ± 0.70 and 482.02 ± 72.40 MPa, respectively. Nevertheless, the addition of rosin-alum, AKD, chitosan, and soy wax caused the decrease in elongation at break of the paper. While, the addition of latex at 4% by weight could

* Corresponding author.

E-mail address: voravadee.s@pnru.ac.th

Cite this article as:

Suchaiya, V., Khumweera, P., Chokboribal, J., Thonglem, S. and Sirinjullapong, A. 2025. The Effects of Water-Resistant Agents on Physical Properties, Mechanical Properties and Water Absorption Ability of Bamboo Culm Sheath Paper. *Recent Science and Technology* 17(2): 262463.

improve the elongation at break of the paper. Water resistant agents could significantly improve the paper's resistance to water absorption. The water absorption resistance of the paper increased when amounts of water-resistant agents increased. The addition of 4% soy wax by weight contributed to the highest increase in water absorption resistance. After soybean wax, AKD and chitosan were the second and third best water-resistant agents, respectively. A contact angle study revealed that water droplets were able to wet and rapidly penetrate into the bamboo pulp paper. The presence of water-resistant agents resulted in higher contact angle value, indicating that the paper had a higher ability to resist water droplet penetration. It was found that adding 1 % AKD by weight resulted in the highest value of contact angle between the water drop and the paper surface.

© 2025 Suchaiya, V., Khumweera, P., Chokboribal, J., Thonglem, S. and Sirinjullapong, A. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำจากกาบไผ่ด้วยวิธีทำมือ และศึกษาอิทธิพลของสารต้านทานการดูดซึมน้ำที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษกาบไผ่ สารต้านทานการดูดซึมน้ำ 5 ชนิด คือ ชันสนกับสารส้ม แอลคิลดีทีนไดเมอ์ (AKD) ไคโตซาน น้ำยางพารา และไขถั่วเหลือง ถูกนำมาบ่มรวมกับเยื่อกาบไผ่ในขั้นตอนการขึ้นรูปกระดาษที่ปริมาณร้อยละ 1 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักเยื่อหาค ผลการทดลองพบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของเยื่อกาบไผ่ไม่พอกขาวสำหรับการขึ้นรูปกระดาษ คือ 40 กรัม เนื่องจากปริมาณเยื่อดังกล่าวทำให้กระดาษมีการโก่งและหดตัวน้อยที่สุด และมีความแข็งแรงสามารถพับและรีดได้ การเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำส่งผลให้กระดาษมีน้ำหนักและความหนาเพิ่มขึ้น ยกเว้น AKD และไคโตซาน ทำให้น้ำหนักของกระดาษไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก การเติม AKD ส่งผลต่อค่าความสว่าง (L^*) ของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ชันสนกับสารส้ม น้ำยางพารา ทำให้กระดาษมีค่าสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น การศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า AKD และไคโตซานสามารถกระจายตัวในเนื้อกระดาษได้ดีกว่าชันสนกับสารส้ม น้ำยางพารา และไขถั่วเหลือง การศึกษาสมบัติเชิงกลของกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำพบว่า ค่าการทนต่อแรงดึง ค่ายังมอดุลัส และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของกระดาษมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารต้านทานการดูดซึมน้ำ ผลทดลองพบว่า ไคโตซาน AKD และน้ำยางพาราช่วยเพิ่มค่ายังมอดุลัสของกระดาษ โดยเฉพาะการเติมไคโตซานที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กระดาษมีค่าการทนต่อแรงดึงและค่ายังมอดุลัสสูงที่สุด ($P \leq 0.05$) คือ 3.81 ± 0.70 และ 482.02 ± 72.40 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แต่การเติมชันสนกับสารส้ม AKD ไคโตซาน ไขถั่วเหลือง ทำให้กระดาษมีค่าการยืดตัวร้อยละ ณ จุดขาดลดลง ในขณะที่การเติมน้ำยางพาราที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงค่าการยืดตัวร้อยละ ณ จุดขาดของกระดาษเยื่อกาบไผ่ได้ สารต้านทานการดูดซึมน้ำช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษเยื่อกาบไผ่ เมื่อเพิ่มปริมาณสารต้านทานการดูดซึมน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การเติมไขถั่วเหลืองที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษได้สูงที่สุด อันดับรองลงมาคือ AKD และไคโตซาน การศึกษาค่ามัมสัมผัสมของหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษ พบว่า หยดน้ำสามารถเปียกและซึมลงกระดาษเยื่อกาบไผ่ได้ดี แต่เมื่อเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำส่งผลให้มุมสัมผัสมของหยดน้ำกับพื้นผิวกระดาษมีค่าสูงขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่ากระดาษมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของหยดน้ำได้สูงขึ้น และพบว่าการเติม AKD ที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักทำให้ค่ามัมสัมผัสมระหว่างหยดน้ำและผิวกระดาษมีค่าสูงที่สุด

คำสำคัญ: กระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำ, กาบไผ่, กระดาษเยื่อกาบไผ่, สารต้านทานการดูดซึมน้ำ, สารกันซึม

1. บทนำ

ไผ่เป็นพืชที่นิยมปลูกในหลายพื้นที่ของประเทศไทย เนื่องจากไผ่เป็นพืชที่ทนแล้งได้ดีและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนของต้นตั้งแต่หน่อ ลำต้น จนถึงใบไป เช่น หน่อไผ่ไปแปรรูปเป็นอาหาร ลำต้นนำไปทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ ใบไผ่สามารถนำไปห่อขนม หรือนำไปทำปุ๋ย ไผ่

มีหลากหลายชนิด ตัวอย่างของไผ่ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ ไผ่ป่า ไผ่สีสุก ไผ่รวกไผ่เลี้ยง ไผ่ข้าวหลาม ไผ่ทอง และ ไผ่ตง เป็นต้น อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี เป็นพื้นที่บริการของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร อำเภอชัยบาดาลเป็นอำเภอที่มีการปลูกไผ่เป็นจำนวนมาก และมีการแปรรูปหน่อไผ่สำหรับจำหน่ายและเป็นของฝากขึ้นชื่อประจำจังหวัด เช่นหน่อไผ่สด หน่อไผ่ต้ม และหน่อไผ่ดอง

ไผ่ตงเป็นไผ่ชนิดหนึ่งที่ปลูกมากในพื้นที่ ชาวบ้านมักปลูกไว้ในเขตบ้านเรือน ในพื้นที่สวน เนื่องจากไผ่ตงให้หน่ออวบขาว มีรสชาติและมีคุณค่าทางอาหารสูง (Department of Agricultural Extension, 2013; Sudchaleaw *et al.*, 2023) จากการลงสำรวจพื้นที่อำเภอชัยบาดาลพบว่า กาบไผ่ หรือ กาบหุ้มลำไผ่ เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีจำนวนมากในพื้นที่ กาบหุ้มลำ (Culm sheath) คือส่วนที่หุ้มอยู่รอบลำต้นสำหรับป้องกันลำต้นเมื่อยังอ่อนอยู่จะหลุดร่วงทิ้งไป เมื่อไผ่เจริญเติบโตเต็มที่ ในการปลูกไผ่มักจะขึ้นเป็นกอและมีจำนวนหลายต้น ทำให้ปริมาณของกาบหุ้มลำที่หลุดร่วงมีจำนวนมากตามไปด้วย ถึงแม้จะปล่อยให้แห้งกลายเป็นปุ๋ยบริเวณรอบโคนต้น แต่กาบหุ้มลำไผ่เหล่านี้ต้องอาศัยเวลานานในการย่อยสลาย ซึ่งอาจก่อให้เกิดขยะหมักหมม ดังนั้นการนำกาบไผ่มาใช้ประโยชน์เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาขยะจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ยั่งยืน คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่นำกาบไผ่มาเตรียมเป็นกระดาษเพื่อต่อยอดองค์ความรู้ของชุมชนเนื่องจาก ชุมชนในตำบลลำনারายณ์ อำเภอชัยบาดาล มีองค์ความรู้เดิมในการเตรียมกระดาษสาเพื่อผลิตเป็นดอกไม้จัน ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่ในการนำกาบไผ่มาเตรียมกระดาษเพื่อใช้ในงานด้านหัตถกรรมและบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เส้นใยจากกาบไผ่มีลักษณะแข็งยากต่อการต้มและต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีฤทธิ์เป็นด่างสูง (Kanjana-karn *et al.*, 2015) หรือต้องนำไปทำการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาหลายวัน (Chansaeng, 2020) จึงจะทำให้กาบไผ่แตกตัวเป็นเส้นใยสั้นๆ แล้วจึงสามารถนำเยื่อกาบไผ่มาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษสาได้ กระดาษจากกาบไผ่มีความแข็งแรงต่ำไม่ทนต่อการพับหรือรีด จึงมีการนำเส้นใยที่ได้ไปผสมกับเส้นใยจากชนิดอื่น เช่น เส้นใยปอสา เพื่อช่วยให้กระดาษมีความทนต่อการพับหรือรีด (Haruthaithanasan *et al.*, 2022; Maneewan, 2007) หรือการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษ นอกจากนี้ยังพบปัญหาจากชุมชนในกระบวนการขึ้นรูปกระดาษด้วยวิธีการทำมือ (handmade) คือ ควบคุมความหนาให้สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นเนื่องจากในขั้นตอนการใช้แม่พิมพ์ตักเยื่อกระดาษที่กระจายตัวในน้ำไม่สามารถควบคุมปริมาณของเยื่อกระดาษได้ และกระดาษที่เตรียมได้ มีการดูดซึมน้ำได้ดีจึงเปื่อยและขาดง่าย ปัญหาเหล่านี้จึงเป็นข้อจำกัดในการนำกระดาษสาไปใช้งาน โดยทั่วไปแล้วในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษจะมีกระบวนการรีดกระดาษเพื่อควบคุมความหนา และมีการเติมสารตกแต่งให้แก่กระดาษ เช่น สารตัวเติม (filler) เพื่อ

เพิ่มความขาว สารเพิ่มความแข็งแรงของผิว (surface sizing) ช่วยทำให้เส้นใยที่ผิวมีการยึดเกาะกับเส้นใยชั้นถัดลงไปได้ดีขึ้น ทำให้ผิวกระดาษมีความแข็งแรงทนต่อการขีด และสารกันซึม (sizing agent) หรือสารต้านทานการดูดซึมน้ำ เป็นสารที่ใช้เติมลงในน้ำเยื่อเพื่อช่วยลดการซึมของของเหลวเข้าไปในเนื้อกระดาษ อย่างไรก็ตามพบว่ากระดาษจากเส้นใยพืชมีสมบัติในการต้านทานน้ำที่ต่ำ เมื่อนำไปพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ หรืองานหัตถกรรม เช่น กล่องหรือถุงกระดาษ ดอกไม้ประดิษฐ์ จึงควรปรับปรุงสมบัติของการต้านทานการดูดซึมน้ำ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานมากขึ้น สารกันซึม หรือ สารต้านทานการดูดซึมน้ำที่ใช้กันทั่วไป (Hubbe, 2007; Ahmed *et al.*, 2021) ได้แก่ แอลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) (Ntifafa *et al.*, 2024; Köse *et al.*, 2017) อัลคิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (Alkyl Succinic Anhydride, ASA) (Rui *et al.*, 2024) ชันสนกับสารส้ม (Jablonsky *et al.*, 2020) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) (Shankar and Rhim, 2018) แป้งดัดแปร (modified starch) ไข (wax) (Shen *et al.*, 2020) และน้ำยางพารา (Khongtong and Patjun, 2013) เป็นต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งกาบไผ่มาเตรียมเป็นกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ โดยกระดาษจะเตรียมจากเยื่อที่ผ่านการไม่ฟอกขาวซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ใช้สารเคมีน้อยและเหมาะสมกับการเตรียมกระดาษสำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์ในชุมชน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือการเตรียมกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำจากกาบไผ่ โดยศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเยื่อกาบไผ่ที่ไม่ฟอกขาวสำหรับการขึ้นรูปกระดาษ สารต้านทานการดูดซึมน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ แอลคิลคีทีนไดเมอร์ (AKD) ชันสนกับสารส้ม ไคโตซาน น้ำยางพารา และไขถั่วเหลือง นอกจากนี้ยังศึกษาชนิดและปริมาณของสารต้านทานการดูดซึมน้ำที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวของกระดาษ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

กาบไผ่ตงแห้งจากอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จากบริษัท LOBA CHEMIE. สารแอลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Kemira Co. Ltd (Thailand) ไคโตซาน (Chitosan)

น้ำหนักโมเลกุลปานกลาง ชันสน(Rosin)กับอะลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulphate) หรือสารส้ม และไขถั่วเหลือง (Soy wax) จากบริษัท Labsystem Co., Ltd. (Thailand) และน้ำยาล้างจาน จากบริษัท World Chemical Far East Company Limited (Thailand). กรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 97 จากบริษัท RCI Labscan Limited. เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 จากบริษัท Duksan Pure Chemicals Co., Ltd.

2.2 การเตรียมเยื่อจากผ้า

วิธีการเตรียมเยื่อจากผ้าได้ดัดแปลงมาจากวิธีของ Haruthaithanasan *et al.* (2022) โดยนำผ้าฝ้ายมาตัดเป็นชิ้นขนาด 2x2 เซนติเมตร และนำไปต้มด้วยน้ำเดือดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ผ้านุ่มและเป็นการทำความสะอาดจากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 คืน และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำเยื่อจากผ้าที่ได้ไปกรองด้วยผ้าขาวบางและล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดจนค่า pH เป็นกลาง จากนั้นทำการคั้นหรือบีบเยื่อจากผ้าให้หมดเก็บบรรจุใส่ถุงซิปล็อคและแช่เก็บไว้ในห้องเย็นจนกว่าจะนำมาใช้งาน

2.3 การขึ้นรูปกระดาษ

2.3.1 การขึ้นรูปกระดาษที่ไม่เติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ

นำเยื่อจากผ้าที่คั้นหรือบีบน้ำให้หมด มาชั่งน้ำหนัก คือ 10 ถึง 100 กรัม โดยการเพิ่มน้ำหนักเยื่อจากผ้าครั้งละ 10 กรัม จากนั้นนำเส้นใยใส่ลงในเครื่องปั่น (รุ่น EM-14, Sharp, Thailand) ทำการปั่นที่ความเร็วประมาณ 13,300 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้เยื่อกระจายตัวและละเอียด อัตราส่วนเยื่อต่อน้ำ คือ 1 กรัม : 50 มิลลิลิตร จากนั้นเทเยื่อจากผ้าที่ปั่นเตรียมไว้ ลงไปในแม่พิมพ์ขนาด 11x8.5 นิ้วที่วางอยู่บนผิวหน้าในถาดพลาสติกที่เติมน้ำไว้ประมาณครึ่งถาด ทำการเกลี่ยเยื่อให้กระจายทั่วแม่พิมพ์ให้สม่ำเสมอ เสร็จแล้วยกแม่พิมพ์ขึ้นมาจนสะอาด น้ำ จากนั้นตากไว้ที่เหนือถาดพลาสติกให้น้ำหยดออกมาจากเยื่อกระดาษจนหมด แล้วนำไปผึ่งแดด เป็นเวลา 1-2 วัน จนกระดาษแห้ง จากนั้นนำกระดาษตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักและ

ความหนา เทียบกับกระดาษสาที่มีขายในท้องตลาด เพื่อศึกษาปริมาณเยื่อจากผ้าที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดาษ โดยน้ำหนักเยื่อจากผ้าที่เหมาะสมใช้ในการเตรียมกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำในขั้นถัดไป แผนผังการออกแบบการทดลองการเตรียมเยื่อกระดาษจากผ้าและการเตรียมกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำ ดังแสดงใน Figure 1

2.3.2 การเตรียมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ และการขึ้นรูปกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำ

สารต้านทานการดูดซึมน้ำที่ใช้ในการศึกษามี 5 ชนิด ได้แก่ ชันสนกับสารส้ม ไคโตซาน AKD ไขถั่วเหลือง และน้ำยาล้างจาน สารต้านทานการดูดซึมน้ำที่ต้องมีการเตรียมก่อนนำไปผสมกับเยื่อกระดาษ คือ ชันสนกับสารส้ม ไคโตซาน และไขถั่วเหลือง สารต้านทานการดูดซึมน้ำเหล่านี้ถูกนำไปปั่นผสมกับเยื่อกระดาษในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3, และ 4 โดยน้ำหนักขึ้นกับน้ำหนักของเยื่อกระดาษ จากนั้นนำเยื่อกระดาษมากระจายตัวในน้ำโดยใช้อัตราส่วนเยื่อต่อน้ำ คือ 1 กรัม : 50 มิลลิลิตร บันเยื่อให้กระจายในน้ำ 10 วินาที เติมน้ำสารต้านทานการดูดซึมน้ำที่ปริมาณต่าง ๆ ผสมรวมกับเยื่อและปั่นเพื่อให้เยื่อกระจายและผสมกันเป็นเวลา 30 วินาที และขึ้นรูปโดยเทและกระจายเยื่อกระดาษตามข้อ 2.3.1

- สารละลายชันสนกับสารส้มเตรียมตามวิธีของ โสรญา สัมเขียวหวาน (Somkeawwaan and Chongkhong, 2014) โดยนำสารส้มมาละลายในน้ำ DI ในขณะที่ชันสนละลายในสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยปริมาตร และเติมชันสนและสารส้มลงในเยื่อที่กระจายตัวในโถปั่นโดยใช้อัตราส่วนชันต่อสารส้มคือ 1:1

- ไคโตซานน้ำหนัก 10 กรัม ละลายในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนไคโตซานละลายและทำการผสมกับเยื่อกระดาษ

- ไขถั่วเหลืองที่ปริมาณร้อยละ 1, 2, 3, และ 4 โดยน้ำหนักเยื่อกระดาษ นำไปให้ความร้อนเพื่อให้ไขถั่วเหลืองละลาย และนำไปผสมกับเยื่อจากผ้า

- AKD หรือ น้ำยาล้างจาน ที่ปริมาณร้อยละ 1, 2, 3, และ 4 โดยน้ำหนัก นำมาผสมกับเยื่อกระดาษที่กระจายตัวในน้ำ และบันเยื่อให้ผสมกับสารต้านทานการดูดซึมน้ำเป็นเวลา 30 วินาที และขึ้นรูปโดยเทและกระจายเยื่อกระดาษตามข้อ 2.3.1

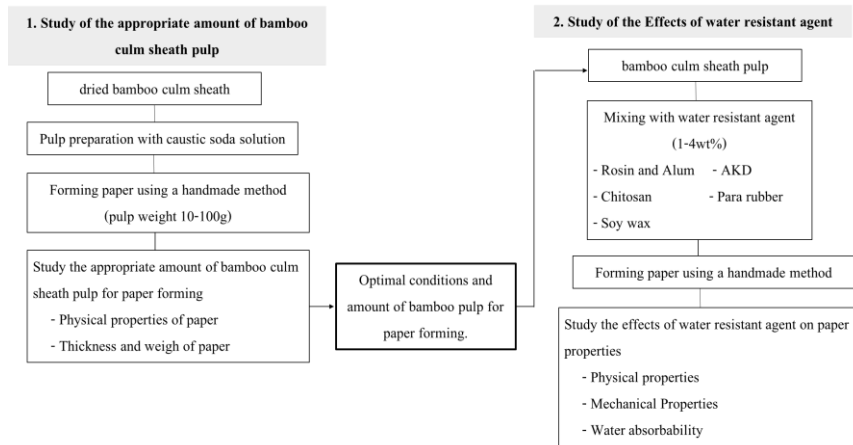


Figure 1 Schematic diagram of the experimental design

2.3.3 การวิเคราะห์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และทดสอบกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำจากกาบไผ่

การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต (yield) ของเยื่อที่ได้จากกาบไผ่ โดยนำเยื่อกาบไผ่ที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้งของกาบไผ่ที่เป็นวัตถุดิบ และน้ำหนักแห้งของเยื่อกาบไผ่ ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (1)$$

ค่าน้ำหนักกระดาษ โดยบันทึกน้ำหนักของกระดาษสาที่ขายตามท้องตลาดกับชั่งน้ำหนักกระดาษเยื่อกาบไผ่ที่เตรียมได้ เพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของกระดาษสาทางการค้าและทำการวัดขนาดความกว้างและยาวของกระดาษ เพื่อคำนวณค่าน้ำหนักต่อพื้นที่ โดยทำการวัดค่าเฉลี่ยจำนวน 3 ซ้ำ

ความหนาของกระดาษสาที่ขายตามท้องตลาด และกระดาษเยื่อกาบไผ่ ทำการวัดความหนาบนกระดาษตัวอย่างเฉลี่ย 10 จุด ด้วยเครื่องวัดความหนาแบบกด (Mitutoyo รุ่น 7301 ประเทศญี่ปุ่น)

ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลืองของกระดาษ วัดด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter ยี่ห้อ 3nh รุ่น NR10QC) การวัดค่าความสว่างและค่าสีใช้มาตรฐาน CIE ($L^* a^* b^*$) โดยวัดค่าเฉลี่ย 10 จุดบนกระดาษ

การกระจายตัวของสารต้านทานการดูดซึมน้ำบนเนื้อกระดาษ และการเปียกของหยดน้ำ ทำการศึกษาโดยใช้ภาพถ่ายและภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo microscope; olympus รุ่น SZ61) ที่กำลังขยาย 45 เท่า

สมบัติเชิงกล เช่น ค่าการทนต่อแรงดึง ค่ายังมอดุลัส และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของกระดาษตัวอย่างในสภาวะแห้ง ด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine; UTM, DSS-10T) มาตรฐาน ISO3781 : 1983 ตัขขนาดของกระดาษขนาด 1.5X 15 เซนติเมตร จำนวน 5 ชิ้น

ความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษ นำกระดาษตัวอย่างมาตัดให้ได้ขนาดประมาณ 2x2 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จดบันทึกผล แล้วนำมาแช่น้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำกระดาษตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักส่วนเกินออก แล้วทำการชั่งน้ำหนักหลังแช่น้ำและจดบันทึก แล้วคำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำของกระดาษ

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (2)$$

การวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ การศึกษาความสามารถในการเปียกของหยดน้ำบนผิวสัมผัสของกระดาษวัดจากค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ โดยใช้เทคนิค Contact angle โดยตัดกระดาษขนาด 55 เซนติเมตร จากนั้นหยดน้ำลงบนกระดาษ และศึกษามุมสัมผัสด้วยการวัดค่ามุมด้วยเครื่อง contact angle (contact angle ; KYOWA Interface Science รุ่น DMs-401)

การวิเคราะห์ทางสถิติ ผลของน้ำหนักเยื่อกาบไผ่ และปริมาณของสารต้านทานการดูดซึมน้ำต่อลักษณะทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษ ดำเนินการวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ ทางสถิติ SPSS เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามวิธี Duncan's mean separation

test ในการวิเคราะห์ทางสถิตินี้ดำเนินการที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha=0.05$)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ร้อยละผลผลิตเยื่อจากไม้ที่เตรียมได้

Figure 2 (a) แสดงลักษณะเส้นใยจากไม้แห้งที่เป็นวัตถุดิบ Figure 2 (b) และ (c) เส้นใยหลังจากการต้มด้วยน้ำเปล่าและแช่สารละลาย NaOH ผลการศึกษพบว่าเมื่อเส้นใยผ่านการต้มด้วยสารละลาย NaOH เส้นใยจะแตกออกเป็นไมโครไฟบริลหรือเส้นใยสั้นจำนวนมาก เกิดเนื่องจากการหลุดและการละลายออกของสารที่ช่วยยึดเส้นใยไมโครไฟบริลให้เกาะกลุ่มในเส้นใยธรรมชาติ เช่น สารเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในเส้นใยพืชที่สามารถละลายได้ในสารละลายเบส เมื่อมีการกำจัดสารดังกล่าวออกจากเส้นใย จึงทำให้เส้นใยเซลลูโลสสามารถแยกออกจากกันเป็นเส้นสั้น ๆ ได้ (Kanjana-karn *et al.*, 2015; Thandavamoorthy *et al.*, 2023) อย่างไรก็ตามหลังจากกระบวนการแช่ด้วยสารละลาย NaOH พบว่าเส้นใยจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น หลังจากนั้นนำเส้นใยที่ได้ไปกรองด้วยผ้าขาวบางล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดจนค่าพีเอชเป็นกลาง สีน้ำตาลของเส้นใยจะอ่อนลง ร้อยละผลผลิตของเยื่อจากไม้ด้วยสารละลาย NaOH ที่ไม่ผ่านการฟอกมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 45.79

3.2 การประเมินความหนา และน้ำหนักของกระดาษเยื่อจากไม้

ในการผลิตกระดาษด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบทำมือ (handmade) มักนิยมใช้วิธีการดักเยื่อกระดาษ ซึ่งอาจจะทำให้ความหนาของเยื่อกระดาษไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยส่วนนี้ได้ศึกษาปริมาณของเยื่อจากไม้ไม่ฟอกขาวที่เหมาะสมสำหรับใช้ขึ้นกระดาษด้วยวิธีการกำหนดน้ำหนักและกระจายเยื่อในแม่พิมพ์กระดาษแทนการดักกระดาษ โดยประเมินสภาวะที่เหมาะสมจากความสามารถในการกระจายของเยื่อได้เต็มแผ่น และลักษณะทางกายภาพ เช่น การโก่งงอ หรือการหดตัวของกระดาษ และมีการศึกษาเปรียบเทียบกับน้ำหนักและความหนาของกระดาษสาทางการค้าที่ขายในท้องตลาด

Table 1 แสดงลักษณะทางกายภาพ ความหนา และน้ำหนักของกระดาษจากเยื่อไม้ จากการศึกษาพบว่าน้ำหนักเยื่อเปียกที่ปริมาณ 10-20 กรัม ไม่สามารถเกลี่ยให้เยื่อกระดาษเต็มแม่พิมพ์ได้ อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีกำหนดน้ำหนักของเยื่อจากไม้และการเกลี่ยเยื่อในแม่พิมพ์แทนวิธีการดักกระดาษ ทำให้กระดาษที่เตรียมได้น้ำหนักสูงกว่ากระดาษสาทางการค้าจากการสังเกต พบว่าปริมาณเยื่อจากไม้ไม่ฟอกขาวที่เหมาะสมในการขึ้นรูป คือ 40 กรัมซึ่งมีความหนาและน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 0.53 ± 0.9 มิลลิเมตร และ 245.94 ± 32.74 กรัมต่อตารางเมตร (g/m^2) ที่ปริมาณเยื่อ 40 กรัม ทำให้กระดาษที่เตรียมได้โก่งและหดตัวน้อยที่สุดและมีความแข็งแรงสามารถพับและรีดได้ โดยที่กระดาษไม่ขาดออกจากกัน เมื่อเทียบกับกระดาษที่ขึ้นรูปจากน้ำหนักเยื่ออื่น ๆ ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมของเยื่อจากไม้หมากที่ใช้ขึ้นรูปกระดาษ คือ 40 กรัม จะถูกนำไปใช้ในการเตรียมกระดาษสาต้านทานการดูดซึมน้ำในขั้นต่อไป

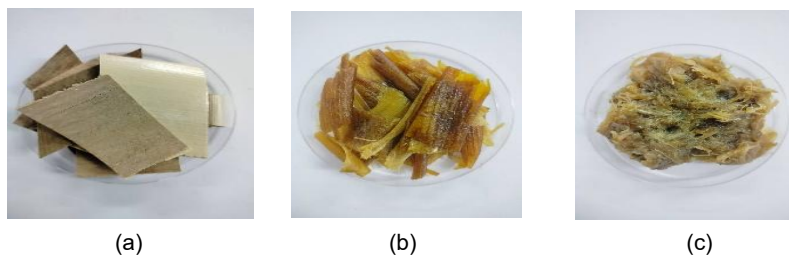
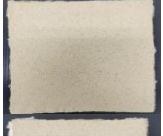
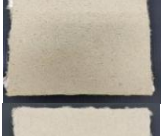
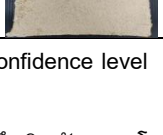


Figure 2 Physical appearance of (a) bamboo sulm sheath (b) pulp after soaking in NaOH solution for 24 hours (c) pulp after heating in NaOH solution for 4 hours

Table 1 Physical appearance, thickness and weight of handmade paper from bamboo Culm Sheath without bleaching

Formular (gram)	Thickness (mm)	weight (g/m ²)	Handmade paper
Commercial handmade paper	0.68 ^a ±0.12	117.57 ^a ±6.75	
30	0.48 ^b ±0.10	191.35 ^{ab} ±32.74	
40	0.53 ^b ±0.09	245.94 ^b ±32.74	
50	0.59 ^b ±0.10	350.63 ^c ±48.11	
60	0.59 ^b ±0.2	411.37 ^{cd} ±62.15	
70	0.642 ^b ±0.18	504.20 ^d ±23.11	
80	0.66 ^b ±0.18	605.60 ^e ±70.90	
90	0.67 ^b ±0.16	875.68 ^f ±96.57	
100	0.70 ^a ±0.15	966.86 ^f ±63.12	

Mean of the same column with different superscripts indicating significantly differences at 95% confidence level

3.2 ผลการทดสอบสมบัติของกระดาษเยื่อจากไผ่

3.2.1 น้ำหนักและความหนาของกระดาษ

Table 2 แสดงน้ำหนักและความหนาของกระดาษเยื่อจากไผ่ที่มีการเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักและความหนาของกระดาษที่เติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 248.18-912.54 g/m² และ 0.78-1.92 mm ตามลำดับ การเติมชั้นสนน้ำยางพาราและไขถั่วเหลืองส่งผลให้น้ำหนักของกระดาษเพิ่มสูงขึ้น ชั้นสนกับสารส้มทำให้น้ำหนักของกระดาษสูงกว่าสารต้านทานการดูดซึมน้ำชนิดอื่น ๆ เนื่องจากการเติมสารโพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม เพื่อเกิดพันธะทางเคมีระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ และการมีอยู่ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มี

น้ำหนักโมเลกุลสูงในโครงสร้างที่ยึดติดกับเซลลูโลส อาจเป็นผลให้น้ำหนักของกระดาษเพิ่มขึ้น (Gess, 1996) ในขณะที่สาร AKD และโคโตซานทำให้น้ำหนักของกระดาษไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ความหนาของกระดาษต้านทานการดูดซึมน้ำจากเยื่อจากไผ่มีค่าอยู่ในช่วง 0.78-1.92 มิลลิเมตร การเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำทำให้กระดาษเยื่อจากไผ่มีความหนาเพิ่มขึ้น ความหนาของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารต้านทานการดูดซึมน้ำจากร้อยละ 1 ถึง 4 โดยน้ำหนัก ยกเว้นน้ำยางพารา เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 ถึง 4 โดยน้ำหนักทำให้ความหนาของกระดาษไม่แตกต่างกันมาก การเติมไขถั่วเหลืองที่ปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักส่งผลให้กระดาษมีความหนาสูงที่สุด

3.2.2 ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเขียวแดง และค่าความเป็นสีน้ำเงินเหลือง

Table 2 แสดงค่าสี L* a* b* ของกระดาษเยื่อจากไผ่ที่มีการเติมสารต้านทานการดูดซึม น้ำ โดยความหมายของค่า L* เป็นบวก คือ ค่าความสว่าง ผลการศึกษาพบว่า การเติม AKD ส่งผลให้กระดาษมีค่าความสว่างสูงกว่ากระดาษที่การเติมสารต้านทานการดูดซึม น้ำชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ การเติม AKD ที่ร้อยละ 4 ทำให้กระดาษมีค่าความสว่างสูงสุด ($P \leq 0.05$) เท่ากับ 83.12 ± 0.74 แต่เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะกระดาษที่เติมสาร AKD พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ AKD จากร้อยละ 1-4 โดยน้ำหนักส่งผลให้ค่าความสว่างของกระดาษไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การเติมชันสนกับสารส้ม ไคโตซาน ยางพารา และไขถั่วเหลือง ไม่ส่งผลต่อค่าความสว่างของกระดาษ

เมื่อพิจารณาค่าสี a* และ b* พบว่าค่า a* เป็นบวก คือ ค่าสีแดงและค่า b* เป็นบวก คือค่าสีเหลือง จาก

ตารางที่ 2 พบว่า การเติมน้ำยางพาราส่งผลให้กระดาษมีค่าสีแดงและค่าสีเหลืองสูงกว่าการเติมสารต้านทานการดูดซึม น้ำชนิดอื่น ๆ การเติมน้ำยางพาราที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ทำให้กระดาษมีค่าสีแดงและสีเหลืองสูงที่สุด ($P \leq 0.05$) เท่ากับ 6.34 ± 0.85 และ 19.73 ± 1.27 ตามลำดับ ในขณะที่การเติม AKD และไคโตซาน ส่งผลให้ค่าสีแดงและสีเหลืองของกระดาษเยื่อจากไผ่ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานและAKDจากร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก ไม่ทำให้ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองของกระดาษแตกต่างกันมากนัก แต่การเติมไคโตซานที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักทำให้ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองกระดาษเพิ่มขึ้น การเติม AKD ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักทำให้กระดาษมีค่าสีแดงและสีเหลืองน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมสารชนิดอื่น ๆ ($P \leq 0.05$) คือ 2.93 ± 0.08 และ 9.96 ± 0.12 ตามลำดับ ค่าสีแดงและสีเหลืองของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของชันสนกับสารส้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมไขถั่วเหลืองไม่ส่งผลต่อค่าสีเหลืองและค่าสีแดงของกระดาษ ($P \geq 0.05$)

Table 2 Thickness, weight and L a b color of handmade paper from bamboo Culm Sheath with water-resistant agents

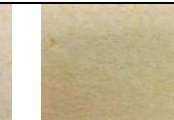
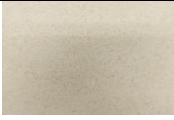
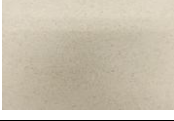
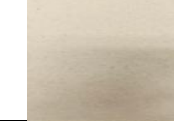
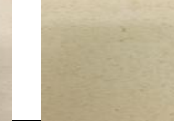
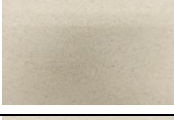
Formulation	Content (wt%)	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)	L a b color value		
				(L)	(a)	(b)
handmade paper	0	0.53 ^a ±0.09	245.94 ^a ±32.74	77.86 ^{bcde} ±0.99	4.23 ^{ef} ±0.20	12.98 ^f ±0.13
Rosin+Alum	1	0.81 ^b ±0.08	417.78 ^c ±7.56	79.68 ^{gh} ±1.43	4.65 ^{gh} ±0.39	13.84 ^g ±0.85
	2	0.96 ^{de} ±0.12	640.96 ^e ±11.75	78.18 ^{cdef} ±1.55	5.33 ^j ±0.41	15.68 ^h ±0.80
	3	1.00 ^e ±0.14	728.76 ^f ±22.24	77.12 ^{bcd} ±2.04	4.39 ^{fg} ±0.53	15.91 ^f ±0.87
	4	1.15 ^f ±0.18	912.54 ^g ±41.55	73.78 ^a ±1.75	5.89 ^k ±0.21	16.57 ⁱ ±0.59
AKD	1	0.83 ^{bc} ±0.08	255.36 ^a ±2.03	81.89 ⁱ ±0.53	2.93 ^a ±0.08	9.96 ^a ±0.12
	2	0.78 ^b ±0.09	261.59 ^a ±42.50	80.96 ^{hi} ±1.07	3.50 ^{bc} ±0.15	11.02 ^{bc} ±0.34
	3	0.86 ^{bc} ±0.12	278.17 ^a ±12.76	81.15 ⁱ ±1.15	3.17 ^{ab} ±0.18	10.40 ^{ab} ±0.33
	4	1.00 ^e ±0.15	277.79 ^{ab} ±18.35	83.12 ^j ±0.74	3.12 ^{ab} ±0.18	10.99 ^{bc} ±0.44
Chitosan	1	0.92 ^{cde} ±0.08	248.18 ^a ±3.94	77.52 ^{bcd} ±0.60	3.61 ^c ±0.11	11.59 ^{cd} ±0.28
	2	0.91 ^{cde} ±0.07	250.60 ^a ±7.84	78.31 ^{defg} ±1.57	3.85 ^{cde} ±0.14	11.96 ^{de} ±0.36
	3	0.89 ^{bcd} ±0.06	255.21 ^a ±35.57	79.40 ^{fg} ±0.65	3.74 ^{cd} ±0.15	11.52 ^{cd} ±0.34
	4	1.00 ^e ±0.14	260.05 ^a ±11.52	77.96 ^{bcd} ±0.53	5.24 ^{ij} ±0.23	15.76 ^h ±0.46
Para rubber	1	1.47 ^g ±0.12	383.39 ^b ±15.12	79.15 ^{efg} ±1.02	4.79 ^{cde} ±0.45	15.31 ^h ±1.21
	2	1.54 ^g ±0.19	523.77 ^d ±21.85	76.86 ^{bcd} ±1.47	4.89 ^{hi} ±0.23	15.59 ^h ±0.85
	3	1.43 ^g ±0.18	539.08 ^d ±21.85	78.25 ^{cdefg} ±2.57	5.84 ^k ±1.15	18.13 ⁱ ±1.46
	4	1.46 ^g ±0.16	542.64 ^d ±45.94	76.74 ^{bc} ±1.26	6.34 ^l ±0.85	19.73 ^k ±1.27

Table 2 (Continuous)

Formulation	Content (wt%)	Thickness (mm)	Weight (g/m ²)	L a b color value		
				(L)	(a)	(b)
Soy wax	1	1.55 ^g ±0.12	245.19 ^c ±0.19	77.97 ^{cd} ±1.79b	4.66 ^{gh} ±0.29	13.84 ^g ±0.80
	2	1.77 ^g ±0.10	431.75 ^e ±14.61	76.55 ^b ±1.32	4.37 ^{fg} ±0.60	12.56 ^{ef} ±0.99
	3	1.80 ^h ±0.09	543.75 ^f ±49.16	79.09 ^{efg} ±1.93	4.14 ^{def} ±0.39	13.19 ^{fg} ±1.02
	4	1.92 ⁱ ±0.08	633.31 ^f ±25.73	76.49 ^b ±2.23	4.20 ^{ef} ±0.46	13.18 ^{fg} ±0.73

*Mean values with the same lowercase letters are not significantly different at 95% confidence level

Table 3 Physical appearance of handmade paper from bamboo Culm Sheath with water-resistant agents

Type	water-resistant agent content (wt%)				
	0	1	2	3	4
Rosin+ Alum					
AKD					
Chitosan					
Para rubber					
Soywax					

3.2.3 ทศนศาสตร์ของกระดาษ

Table 3 แสดงภาพถ่ายของกระดาษเยื่อทาบไม้ที่เติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำชนิดและปริมาณต่าง ๆ เพื่อศึกษาสีของกระดาษด้วยตาเปล่า จากตารางพบว่า การเติมชั้นสนกับสารส้มและน้ำยางพาราส่งผลให้กระดาษมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่การกระจายตัวของสีกระดาษไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของชั้นสนกับสารส้ม และน้ำยางพาราในเนื้อกระดาษ ที่ปริมาณการเติมสารเติมแต่งความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก) สามารถสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มกันของชั้นสนและยางพาราที่ผิวของกระดาษ ในขณะที่การเติม AKD เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระดาษมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น แต่สีเหลืองของกระดาษลดลง จากการสังเกตพบว่า AKD สามารถกระจาย

ตัวได้ดีในเนื้อกระดาษ เนื่องจากไม่พบการเกาะกลุ่มกันของ AKD และสีของกระดาษมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ Bildik *et al.* (2016) ได้รายงานว่าการเติมสาร AKD ที่มีการกระจายตัวในเนื้อกระดาษที่ดีช่วยให้ค่าความสว่างของกระดาษเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อสังเกตสีกระดาษด้วยตาเปล่าพบว่า การเติมโคโตซานที่ร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักทำให้สีของกระดาษไม่แตกต่างจากสีกระดาษที่ไม่มีการเติมสารโคโตซานมากนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณโคโตซานที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ทำให้กระดาษจะมีสีเหลืองมากขึ้น และมีการกระจายของสีที่ไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่การเติมไขถั่วเหลืองไม่เปลี่ยนแปลงสีของกระดาษมากนัก แต่การกระจายตัวของสีกระดาษที่ไม่สม่ำเสมอ และยังพบการเกาะกลุ่มของไขถั่วเหลืองบนผิวกระดาษ

Table 4 Physical appearance of handmade paper from bamboo Culm Sheath with water-resistant agents by using stereo microscope at 45x magnification

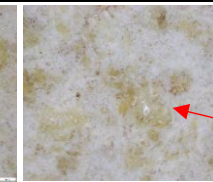
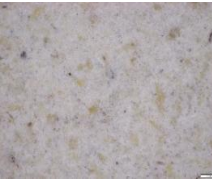
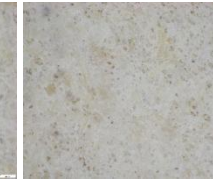
Type	water-resistant agent content (wt%)				
	0	1	2	3	4
Rosin+ Alum					
AKD					
Chitosan					
Para rubber					
Soywax					

Table 4 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษที่เติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ ด้วยกลีโกลจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 45 เท่า จากตารางแสดงให้เห็นการกระจายตัวของสารต้านทานการดูดซึมน้ำในเนื้อกระดาษได้ การเติมชั้นสนกับสารส้ม และน้ำยางพารา ทำให้กระดาษมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติม AKD ไคโตซาน และไขถั่วเหลืองทำให้ลักษณะสีและพื้นผิวของกระดาษไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดย AKD และไคโตซานสามารถกระจายตัวในเนื้อกระดาษได้ดี (Kongtut *et al.*, 2012; Varshoei *et al.*, 2013) อย่างไรก็ตามพบการเกาะกลุ่มกันของไคโตซานที่ปริมาณสูง (ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก) ในขณะที่การเติมชั้นสนกับสารส้ม น้ำยางพารา และไขถั่วเหลืองกระจายตัวในเนื้อกระดาษได้ต่ำกว่า AKD และไคโตซาน เนื่องจากสามารถสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มกันของสารเติมแต่งได้ที่ปริมาณร้อยละ 1-4 โดยน้ำหนัก

3.2.4 สมบัติเชิงกล

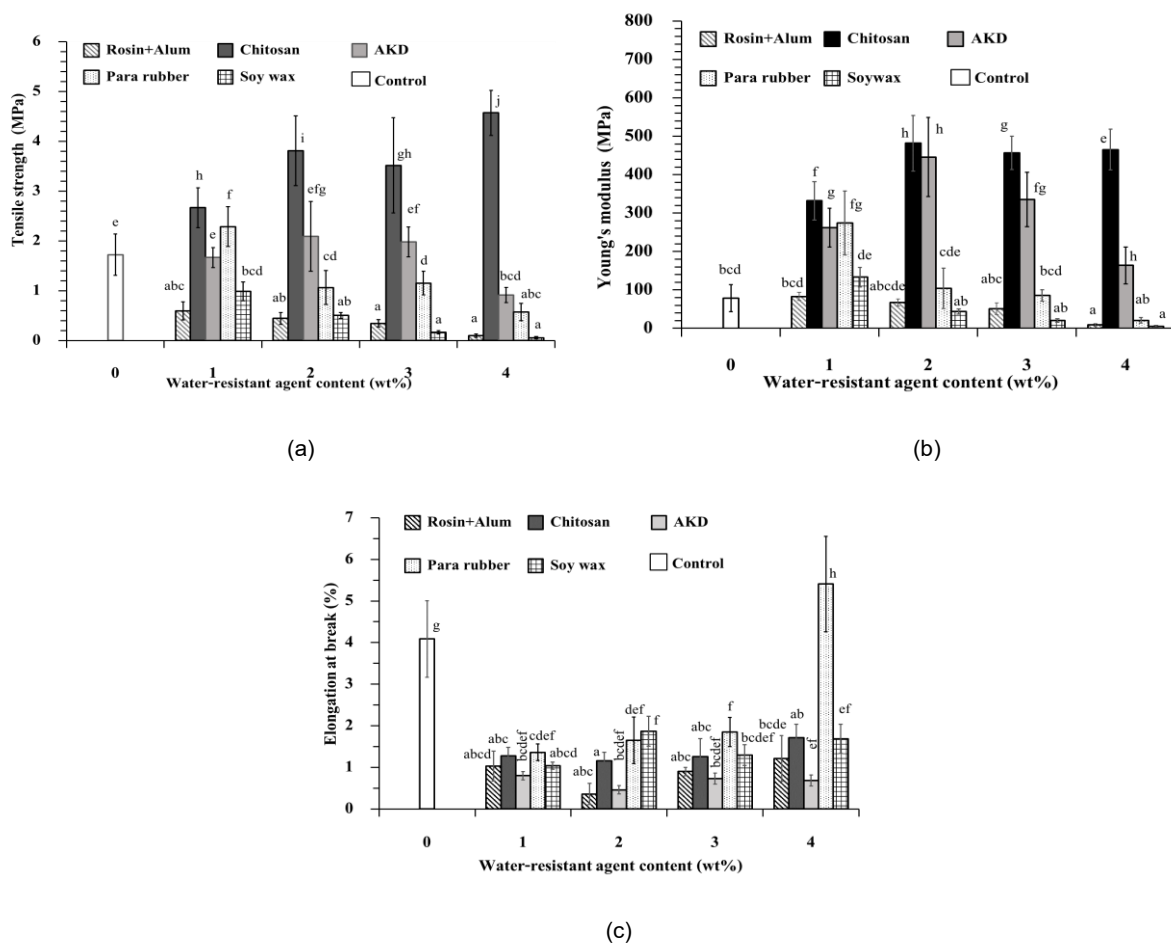
สมบัติเชิงกลของกระดาษเยื่อจากใบที่มีการเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ ประเมินจากการทดสอบแรงดึง (tensile properties) ของกระดาษ Figure 3 แสดง (a) ค่าการทนต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) และ (c) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของกระดาษที่มีการเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าค่าการทนต่อแรงดึง ค่ายังมอดุลัส และค่าร้อยละการยืดตัวของกระดาษมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารต้านทานการดูดซึมน้ำ โดยพบว่าการเติมไคโตซานที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึงและค่ายังมอดุลัสของกระดาษมีค่าสูงที่สุด ($P \leq 0.05$) คือ 3.81 ± 0.70 และ 482.02 ± 72.40 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่การเติม AKD ส่งผลให้ค่ายังมอดุลัสของกระดาษเยื่อจากใบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นรองจากไคโตซาน แต่การเติม AKD ไม่ส่งผลต่อค่าการทนต่อแรงดึงของกระดาษ สาเหตุที่ไคโตซานและ

AKD ช่วยปรับปรุงสมบัติค่ายังมอดูลัสของกระดาษ เนื่องจากสารทั้งสองชนิดสามารถเกิดพันธะและยึดติดกับเส้นใยกระดาษได้ และสามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อกระดาษ (Gülsoy and Uysal, 2020) ได้กล่าวว่าการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงค่าการทนต่อแรงดึงและค่ายังมอดูลัสของกระดาษ สารนั้นต้องเกิดการเชื่อมกันกับเส้นใยกระดาษ หรือเติมเต็มช่องว่างของกระดาษได้ มีความเข้ากันกับกระดาษและกระจายตัวได้ดีในเนื้อกระดาษ Bhardwaj *et al.* (2020) ได้รายงานว่ไคโตซานสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยและหมู่อะมิโนของไคโตซาน และยังพบว่าไคโตซานสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย Bildik *et al.* (2016) ได้รายงานว่ AKD สามารถเกิดพันธะเบต้าคีโตเอสเทอร์ (beta-keto ester bond) เชื่อมกันกับเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษได้

การเติมชั้นสนกับสารส้ม และไขถั่วเหลือง ส่งผลให้สมบัติการทนต่อแรงดึงของกระดาษมีแนวโน้มลดลง

เนื่องจากสารทั้งสองชนิดกระจายตัวในเนื้อกระดาษได้ต่ำ ในขณะที่การเติมน้ำยางพาราที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงและค่ายังมอดูลัสของกระดาษเยื่อทาบไผ่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากน้ำยางพาราเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวสามารถยึดติดกับเส้นใยของเซลลูโลสได้ด้วยการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) (Khongtong and Patjun, 2013)

เมื่อพิจารณาร้อยละการยึดตัวของกระดาษพบว่า การผสมเยื่อกระดาษกับน้ำยางพาราที่ร้อยละ 4 ส่งผลให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด ของกระดาษเพิ่มขึ้น 32% เนื่องจากน้ำยางพารามีสมบัติความยืดหยุ่นสูง แต่การผสมเยื่อกระดาษกับชั้นสนกับสารส้ม AKD ไคโตซาน ไขถั่วเหลือง ส่งผลให้กระดาษยึดตัวได้น้อยกว่ากระดาษเยื่อทาบไผ่



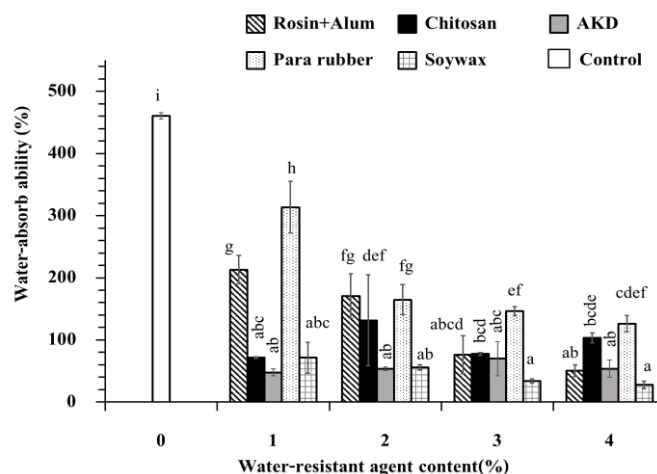
*Mean values with the same lowercase letters in each picture are not significantly different at 95% confidence level

Figure 3 (a) Tensile strength (b) Young's modulus and (c) elongation at break of handmade paper from bamboo Culm Sheath with water-resistant agents (control as paper from bamboo culm sheath without water resistant agent)

3.2.5 ความสามารถในการดูดซึม้ำ

Figure 4 แสดงความสามารถในการดูดซึม้ำของกระดาษเยื่อจากไผ่ที่มีการเติมสารต้านทานการดูดซึม้ำ ผลการทดลองพบว่า กระดาษเยื่อจากไผ่มีค่าการดูดซึม้ำที่ประมาณ 460.55% และการเติมสารต้านทานการดูดซึม้ำทำให้กระดาษมีความสามารถในการต้านทานการดูดซึม้ำสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มปริมาณสารต้านทานการดูดซึม้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึม้ำของกระดาษลดลง โดยกระดาษที่เติมสารเติมแต่งมีค่าการดูดซึม้ำอยู่ในช่วง 27.68-313.61% เมื่อพิจารณาผลของชนิดสารต้านทานการดูดซึม้ำ พบว่าความสามารถในการต้านทานการดูดซึม้ำของกระดาษเยื่อจากไผ่ขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารต้านทานการดูดซึม้ำ การเติมไขถั่วเหลืองที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการดูดซึม้ำของกระดาษเยื่อจากไผ่ได้สูงที่สุด ($P \leq 0.05$) ประมาณ 93.98% เนื่องจากไขถั่วเหลืองเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันที่มีคาร์บอนที่เป็นสายยาว (C16 และ C18) มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ไขถั่วเหลืองที่มีอนุภาคขนาดใหญ่สามารถเคลือบติดบนผิว

เส้นใยและปิดช่องว่างภายในเนื้อกระดาษ จึงช่วยให้กระดาษมีความสามารถในการต้านทานการดูดซึม้ำได้ (Shen *et al.*, 2020) สารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการดูดซึม้ำอันดับรองลงมา คือ AKD ที่ร้อยละ 1 ไคโตซาน ที่ร้อยละ 1 และชันสนกับสารส้มที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยพบว่า AKD และ ชันสนกับสารส้มเมื่อเกิดพันธะกับเส้นใยจะเกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ (Varshoei *et al.*, 2013) ในขณะที่ไคโตซานสามารถยึดเกาะกับเส้นใยและเติมเต็มช่องว่างของกระดาษ อีกทั้งไคโตซานไม่สามารถละลายได้ในน้ำ จึงช่วยให้กระดาษมีความต้านทานการดูดซึม้ำเพิ่มขึ้น ในกรณีของน้ำยางพาราเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำเมื่อเคลือบติดบนเส้นใยของกระดาษ จึงช่วยให้กระดาษมีความสามารถในการต้านทานการดูดซึม้ำได้ (Khongtong and Patjun, 2013) อย่างไรก็ตาม การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษ พบว่าชันสนกับสารส้ม และยางพารากระจายตัวในเนื้อกระดาษไม่สม่ำเสมอ มีการเกาะกลุ่มกัน จึงเป็นสาเหตุให้มีความสามารถในการต้านทานน้ำต่ำกว่าสารชนิดอื่น ๆ ยกเว้นการเติมชันสนกับสารส้มที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก



*Mean values with the same lowercase letters are not significantly different at 95% confidence level

Figure 4 Water absorption ability of handmade paper from bamboo Culm Sheath with water-resistant agents

(control as paper from bamboo culm sheath without water resistant agent)

3.2.6 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact angle test) และการเปียกบนพื้นผิว

จาก Table 5 แสดงภาพถ่ายลักษณะการเปียกของหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษเยื่อจากไฟที่มีการเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ และ จาก Table 6 แสดงค่ามุมสัมผัส (contact angle) ของหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษที่มีการเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำ ผลการศึกษาพบว่า หยดน้ำสามารถเปียกและซึมลงกระดาษเยื่อจากไฟได้ดี และมุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวกระดาษมีค่า 19.8° บ่งบอกว่ากระดาษสามารถการดูดซึมน้ำได้ดี เมื่อเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำส่งผลให้มุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิว

กระดาษมีค่าสูงขึ้น บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษเพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับชนิดของสารที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าสูงจากมากไปน้อย คือ AKD ไชถั่วเหลือง โคโตซาน ชันสน กับสารส้ม และน้ำยางพารา โดยปริมาณที่เหมาะสมทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าสูงที่สุดขึ้นกับชนิดของสารต้านทานการดูดซึมน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม AKD ที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและผิวกระดาษมีค่าสูงที่สุด คือ 137° ซึ่งสูงกว่าการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ

Table 5 Wetting characteristics of water droplets on the surfaces of unbleached handmade paper with water-resistant agents

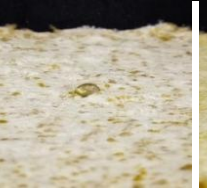
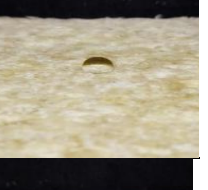
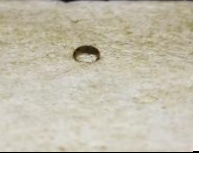
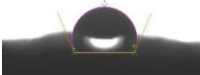
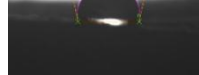
Type	water-resistant agent content (wt%)				
	0	1	2	3	4
Rosin+Alum					
AKD					
Chitosan					
Para rubber					
Soy wax					

Table 6 Contact angle of water droplet on surfaces of unbleached handmade paper with water-resistant agents

Type	water-resistant agent content (wt%)				
	0	1	2	3	4
Rosin+Alum	 19.8 deg	 50.6 deg	 56.8 deg	 94.6 deg	 123.8 deg
AKD	 19.8 deg	 137.1 deg	 133.2 deg	 115.5 deg	 109.0 deg
Chitosan	 19.8 deg	 91.9 deg	 112.6 deg	 117.6 deg	 105.3 deg
Para rubber	 19.8 deg	 72.7 deg	 107.4 deg	 102.1 deg	 100.2 deg
Soy wax	 19.8 deg	 127.3 deg	 116.9 deg	 124.1 deg	 131.6 deg

4. สรุป

ปริมาณที่เหมาะสมของเยื่อกาบไผ่ไม่ฟอกขาว สำหรับการขึ้นรูปกระดาษ คือ 40 กรัม ปริมาณดังกล่าวทำให้กระดาษมีการโก่งและหดตัวน้อยที่สุด และมีความแข็งแรงสามารถพับและรีดได้ โดยที่กระดาษไม่ขาดออกจากกัน การเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำทำให้กระดาษเยื่อกาบไผ่มีน้ำหนักและความหนาเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารต้านทานการดูดซึมน้ำสามารถเกาะติดอยู่บนเส้นใยกระดาษได้ ยกเว้น AKD และไคโตซานเมื่อเติมลงในกระดาษจะทำให้น้ำหนักของกระดาษไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก AKD ส่งผลให้กระดาษมีค่าความสว่างสูงกว่ากระดาษที่การเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำชนิดอื่น ๆ ในขณะที่น้ำยางพาราส่งผลให้กระดาษมีค่าสีแดงและค่าสีเหลืองของกระดาษสูงที่สุด จากการศึกษาฐานวิทยาศาสตร์ AKD และไคโตซานมีการกระจายตัวสม่ำเสมอในเนื้อกระดาษ ชันสนกับสารส้ม น้ำยางพารา และไข่ขาวเหลืองกระจายตัวในเนื้อกระดาษได้ต่ำกว่า AKD และไคโตซาน ค่าการทนต่อแรงดึง

ค่ายังมอดุลัส และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของกระดาษมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารต้านทานการดูดซึมน้ำ การเติมสารไคโตซาน AKD และน้ำยางพาราช่วยเพิ่มค่ายังมอดุลัสของกระดาษ และการเติมไคโตซานที่ร้อยละ 2 ส่งผลให้กระดาษมีค่าการทนต่อแรงดึงและค่ายังมอดุลัสสูงที่สุด ในขณะที่ชันสนกับสารส้มและไข่ขาวเหลืองทำให้กระดาษมีค่าการทนต่อแรงดึงและค่ายังมอดุลัสลดลง กระดาษที่ผสมชันสนกับสารส้ม AKD ไคโตซาน ไข่ขาวเหลือง มีการยืดตัวต่ำกว่ากระดาษเยื่อกาบไผ่ แต่การเติมยางพาราที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของกระดาษเยื่อกาบไผ่ได้ การเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษเยื่อกาบไผ่ เมื่อเพิ่มปริมาณสารต้านทานการดูดซึมน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การเติมไข่ขาวเหลืองที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ทำให้กระดาษมีความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำได้สูงที่สุดอันดับรองลงมา คือ AKD ไคโตซาน ชันสนกับสารส้ม และ

น้ำยางพารา หยดน้ำสามารถเปียกและซึมลงกระดาษเยื่อ ากาไฟได้ดี แต่เมื่อเติมสารต้านทานการดูดซึมน้ำส่งผลให้ มุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวกระดาษมีค่าสูงขึ้น ซึ่งบ่ง บอถึงความสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษสา เพิ่มขึ้น สารที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าสูงจากมาก ไปน้อย คือ AKD ไโซลิว์เลื่อง โคโตซาน ชันสนกับสารส้ม และน้ำยางพารา และพบว่า การเติม AKD ที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและผิว กระดาษมีค่าสูงที่สุด จากการศึกษาสมบัติของกระดาษ ต้านทานน้ำ AKD เป็นสารต้านทานการดูดซึมน้ำที่เหมาะสม สำหรับการขึ้นรูปกระดาษจากกาบไผ่เนื่องจาก AKD ที่ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเนื่องจากช่วยปรับปรุง ความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำ การซึมผ่าน ของหยดน้ำ สมบัติเชิงกล และปรับปรุงสีของกระดาษให้มี ความสว่างขึ้นโดยที่ความหนาและน้ำหนักของกระดาษเยื่อ ากาไฟไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากกองทุน สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม (สกว.) ประจำปี พ.ศ. 2566 รหัสโครงการ 4368386 และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครสำหรับอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ ในการดำเนินการวิจัยนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไป ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, T., Mia, R., Toki, G.F.I., Jahan, J., Hasan, M.M., Tasin, M.A.S., Farsee, M.S. and Ahmed, S. 2021. Evaluation of sizing parameters on cotton using the modified sizing agent. **Cleaner Engineering and Technology** 5(21): 1-8.
- Bhardwaj, S., Bhardwaj, N.K. and Negi, Y.S. 2020. Effect of degree of deacetylation of chitosan on its performance as surface application chemical for paper-based packaging. **Cellulose** 27: 5337-5352.
- Bildik, A., Hubbe, M. and Gurboy, B. 2016. Alkyl Ketene Dimer (AKD) sizing treatment and charge interactions in recycled paper. **Appita Journal** 69: 331-338.
- Chansaeng, T. 2020. Development of Yarn From Bamboo Sheath and Its Application for Textile Products. Master of Science (Textile Innovation), Rajmangala University of Technology Krungthep.
- Department of Agricultural Extension. 2013. **Bamboo plantations, bamboo varieties and propagation**. The Agricultural Cooperative Federation of Thailand (AGTF) publisher, Bangkok.
- Gess, J.M. 1996. **The sizing of paper with rosin and alum at acid pHs: Paper Chemistry**. Springer, Dordrecht.
- Gülsoy, S. and Uysal, S. 2020. Effects of Recycled Fiber Fines on Handsheet Properties of Different Unbeaten and Beaten Pulps. **Drvna Industrija** 71: 327-337.
- Hubbe, M.A. 2007. Paper's resistance to wetting - A review of internal sizing chemicals and their effects. **BioResources** 2(1): 106-145.
- Haruthaithanasan, V., Kongtud, W., Thanapase, W., Sampoompuang, C. and Sundhrarajun, S. 2022. Leaf, Spathe, Sprout Coat, and Branch Utilization of Dendrocalamus latiflorus and Bambusa oldhamii. **Thai Journal of Forestry** 26: 93-104.
- Jablonsky, M., Šima, J. and Lelovsky, M. 2020. Considerations on factors influencing the degradation of cellulose in alum-rosin sized paper. **Carbohydrate Polymers** 245: 116534.
- Kanjanakarn, K., Rattanadilok Na Phuket, S. and Piromthamsiri, K. 2015. Characteristics of Bamboo Fibers obtained from Boilling Dendrocalamus Asper Baker Sheath in Sodium Hydroxide Solution. **Journal of Home Economics** 58(3): 41-53.
- Khongtong, S. and Patjun, O. 2013. Developing of Water Resistant Paper by the Addition of Natural Rubber. **Science Essence Journal** 29(2): 263-273.
- Köse, D.G., Güdül, H., Temiz, A., Kuştaş, S. and Aydın, İ. 2017. Effect of alkyl ketene dimer on the physical, mechanical, and biological

- durability of plywood. **BioResource** 13(1): 147-156.
- Kongtud, W., Witayakran, S., Sundhrarajun, S., Sirisansaneeyakul, S. and Changlek, P. 2012. Mechanical property improvement of Jerusalem artichoke paper by coating with chitosan, pp.406-412. *In Proceedings of 50th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*. Kasetsart University.
- Shen, T., Fan, S., Li, Y., Xu, G. and Fan, W. 2020. Preparation of Edible Non-wettable Coating with Soybean Wax for Repelling Liquid Foods with Little Residue. **Materials (Basel)** 13(15): 3308.
- Shankar, S. and Rhim, J.W. 2018. Antimicrobial wrapping paper coated with a ternary blend of carbohydrates (alginate, carboxymethyl cellulose, carrageenan) and grapefruit seed extract. **Carbohydrate Polymer** 15(196): 92-101.
- Sudchaleaw, S., Saensouk, S., Saensouk, P. and Sungkaew, S. 2023. Species diversity and traditional utilization of bamboos (*Poaceae*) on the Phu Thai Ethnic Group in northeastern Thailand. **Biodiversita** 24: 2261-2271.
- Somkeawwaan, S. and Chongkhong, S. 2014. Feasibility study of simple production of paper from fresh banana peels and residues from Ethanol fermentation. Master of Engineering (Chemical Engineering), Prince of Songkla University.
- Maneewan, S. 2007. Investigation of Physical Properties of Mulberry Paper for Evaporative Cooling. **Naresuan University Journal** 15(2): 63-72.
- Ntifafa, Y., Ji, Y. and Hart, P. 2024. Alkyl Ketene Dimer (AKD) Sized Paper Reversion Due to Oxidative Photodegradation. **TAPPI Journal** 23: 33-45.
- Thandavamoorthy, R., Devarajan, Y. and Thanappan, S. 2023. Analysis of the characterization of NaOH-treated natural cellulose fibre extracted from banyan aerial roots. **Scientific report** 13: 12579.
- Varshoei, A., Javid, E., Rahmaninia, M. and Rahmany, F. 2013. The Performance of Alkylketene Dimer (AKD) for the Internal Sizing of Recycled OCC Pulp. **Lignocellulose** 2: 316-326.
- Rui, Z., Yu, D. and Zhang, F. 2024. Novel cellulose nanocrystal/metal-organic framework composites: Transforming ASA-sized cellulose paper for innovative food packaging solutions. **Industrial Crops and Products** 207: 117771.



Research Article

การควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมอัตราการไหล
โดยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยเอซีเซอร์โวมอเตอร์

Force Control in Electro-Hydraulic System using Pump Flow Rate Control Driven
by AC Servo Motor

ทศพล แจ้งน้อย* และ พิศาล มุลอำคา

Tossapol Jangnoi* and Pisan Moonumca

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang,
Khon Kaen 40000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-02

Revised: 2024-06-10

Accepted: 2024-06-12

Keywords:

force control;

electro-hydraulic system;

pump control;

AC servo motor

This paper studies the force control in an electro-hydraulic system that controls the hydraulic oil flow rate using a gear pump whose speed is regulated by an AC servo motor. The time response performance and power consumption of the proportional valve flow control system and the pump flow control system driven by AC servo motor were compared. The proposed system comprises an AC servo driven power unit that controls motor speed, a proportional hydraulic directional and flow control valve, and a hydraulic cylinder. A computer was used to control the electro-hydraulic system. A PID controller was used to control the valve operation and the motor speed that drives the pump. Both systems were subjected to 3 types of reference force signals which are a step force signal at 2,500 N, a sinusoidal force signal ranging from 1,500 N to 3,500 N at 0.2 Hz, and a square force signal ranging from 1,500 N to 3,500 N at 0.2 Hz. This results indicate that the pump flow control system driven by AC servo motor exhibited more accurate rise time, setting time, and steady state error responses compared to the proportional valve flow control system. However, it has an overshoot that is less favorable. The power consumption of the pump flow control system driven by AC servo motor was significantly lower than the proportional valve flow control system.

© 2025 Jangnoi, T. and Moonumca, P. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: tossapol.ja@rmuti.ac.th

Cite this article as:

Jangnoi, T. and Moonumca, P. 2025. Force Control in Electro-Hydraulic System using Pump Flow Rate Control Driven by AC Servo Motor. **Recent Science and Technology** 17(2): 261694.

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกโดยการควบคุมความเร็วรอบบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาและการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกด้วยบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว โดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการศึกษารวมไปด้วย ชุดต้นกำลังไฮดรอลิกที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โว, วาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกแบบสัดส่วน และกระบอกสูบไฮดรอลิก โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมการทำงานของวาล์วแบบสัดส่วนและควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนบีบ ผลจากการทดลองการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก โดยการเปรียบเทียบ 2 ระบบคือ ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบแบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว ด้วยสัญญาณแรงอ้างอิง 3 แบบคือ สัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันไดที่ 2,500 นิวตัน สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ที่ย่าน 1,500 ถึง 3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิร์ต และสัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมย่าน 1,500 ถึง 3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิร์ต ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบแบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวมีเวลาขาขึ้น เวลาอยู่ตัว และค่าความผิดพลาดดีกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน แต่ยังมีส่วนพุงเกินที่น้อยกว่า ส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว จะประหยัดกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน

คำสำคัญ: การควบคุมแรง, ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก, การควบคุมบีบ, เอซีเซอร์โวมอเตอร์

1. บทนำ

ระบบไฮดรอลิกได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากระบบไฮดรอลิกเป็นระบบที่มีการส่งถ่ายกำลังที่สูง เมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ โดยระบบไฮดรอลิกจะทำการเปลี่ยนพลังงานของไหลให้เป็นพลังงานทางกลโดยผ่านอุปกรณ์ทำงาน เช่น กระบอกสูบไฮดรอลิก หรือมอเตอร์ไฮดรอลิก เป็นต้น การควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิกสามารถทำได้หลายกรณี เช่น ควบคุมการทำงานด้วยกลไก ควบคุมการทำงานด้วยระบบไฟฟ้า และควบคุมผ่านตัวควบคุมที่โปรแกรมได้ เป็นต้น แล้วแต่การประยุกต์ใช้งาน

สำหรับการควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิกที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า จะถูกเรียกว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก โดยทั่วไปการควบคุมระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกสามารถควบคุมได้หลายกรณีตามการประยุกต์ใช้งาน เช่น การควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว หรือแรง ของอุปกรณ์ทำงาน โดยการควบคุมระบบจะเป็นการควบคุมความดันใช้งานหรืออัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก ซึ่งโดยปกติการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกสามารถควบคุมได้ 2 ลักษณะคือ การควบคุมอัตราการไหลที่วาล์ว การควบคุมที่บีบที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ หรือควบคุมทั้งสองอุปกรณ์พร้อมกัน ระบบการควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วจะเป็นการควบคุมการเปิดพื้นที่ของรูน้ำมันที่น้ำมันไหลผ่านของวาล์ว

ควบคุมอัตราการไหลตามสัญญาณควบคุมที่ส่งมาจากชุดควบคุมหรืออุปกรณ์สั่งงาน ขณะที่ระบบการควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบจะเป็นการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันที่ออกจากบีบซึ่งบีบที่ใช้จะต้องเป็นชนิดที่ปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้ โดยวาล์วที่ติดตั้งในระบบจะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกไปที่อุปกรณ์ทำงานเพียงอย่างเดียว หรือควบคุมทั้งสองก็ได้ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วจะมีผลการตอบสนองที่เร็วกว่า และมีความแม่นยำค่อนข้างสูง แต่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับระบบการควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบที่ปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้ หรือบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (Induction Motor) (Sinthipsomboon *et al.*, 2011; Sangpet and Kuntanapreeda, 2013; Ming *et al.*, 2013; Jangnoi and Pinsopon, 2014) สำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบที่สามารถปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้ บีบที่สามารถปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้มีการลงทุนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้บีบที่มีปริมาตรการจ่ายน้ำมันคงที่ และมีระบบควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกได้มีการศึกษาโดยนักวิจัยดังต่อไปนี้ Sinthipsomboon *et al.* (2011); Sangpet and Kuntanapreeda (2013); Jangnoi and Pinsopon (2014) ศึกษาการควบคุมแรงของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน

ไฮดรอลิกส์ด้วยวาล์วแบบสัดส่วน สำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มมีการศึกษาโดย Truong and Ahn (2009); Truong and Ahn (2011) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับปั๊มที่สามารถปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันไฮดรอลิกส์ได้ ทำให้น้ำมันไฮดรอลิกส์มีอัตราการไหลเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามภาระโหลดจริง และ Ming *et al.* (2013) ทำการทดลองการควบคุมความเร็วของกระบอกสูบที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มแบบเฟืองที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับความเร็วรอบได้ Pratumswan and Junchangpood (2013) ได้ศึกษาการควบคุมแรงและตำแหน่งที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มแบบเฟืองที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับความเร็วรอบได้ Ketelsen *et al.* (2019) ได้ทำการศึกษากการควบคุมอัตราการไหลโดยใช้ปั๊มเพื่อการประหยัดพลังงานในระบบ Ho and Le (2021) ศึกษาการประหยัดพลังงานในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์โดยใช้มอเตอร์ชนิดเอซีเซอร์โวเป็นต้นกำลังของชุดต้นกำลัง Lyu *et al.* (2021) ได้ทำการศึกษากการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันด้วยปั๊มและวาล์วที่ใช้ร่วมกันเพื่อหาการทำงานที่เหมาะสมตามภาระโหลดจริง Liu *et al.* (2023) ทำการศึกษาชุดต้นกำลังที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว โดยใช้ตัวควบคุมแบบแบบไม่เชิงเส้นเพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว เพื่อควบคุมความดันใช้งานในระบบ Ba *et al.* (2024) ได้นำชุดต้นกำลังที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแขนของหุ่นยนต์ด้วยกระบวนการควบคุมแรง

บทความนี้จะนำเสนอการทดลองการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มไฮดรอลิกส์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาของผลตอบสนองของแรงและการใช้พลังงานไฟฟ้าเทียบกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนที่มีใช้กันในปัจจุบัน โดยระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรที่ระบบไฮดรอลิกส์ไม่ต้อง

ทำงานตลอดเวลา เช่น เครื่องฉีดพลาสติก เครื่องกดอัด เป็นต้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ประกอบไปด้วย ชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โวในการขับเคลื่อนปั๊มไฮดรอลิกส์ในการสร้างอัตราการไหล วาล์วแบบสัดส่วนที่ใช้ควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ กระบอกสูบไฮดรอลิกส์ทำงานแบบสองทิศทาง เซอร์โวล์วตัวตรวจวัดแรง (โหลดเซลล์) พร้อมชุดขยายสัญญาณ และคอมพิวเตอร์ควบคุมดังแสดงวงจรใน Figure 1 โดยการทำงานของระบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์เริ่มจากคอมพิวเตอร์ควบคุมจะส่งสัญญาณควบคุมผ่านการติดต่อสื่อสารไปยังชุดต้นกำลังและวาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหล กระบอกสูบเคลื่อนที่ออกไปกดสปริงเป็นเสมือนแรงต้านจำลอง แรงที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดโดยโหลดเซลล์ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างตรงปลายก้านสูบและสปริง จากนั้นส่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าผ่านชุดขยายสัญญาณ และส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อประมวลผล Figure 2 แสดงชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการศึกษานี้ และ Table 1 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบ

การทำงานของระบบแบ่งออกได้ 2 กรณี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ปั๊มจะทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ และใช้วาล์วแบบสัดส่วนในการควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์

กรณีที่ 2 ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว มอเตอร์ไฟฟ้าจะสามารถปรับความเร็วรอบได้เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ไหลออกจากปั๊ม โดยวาล์วทำหน้าที่ควบคุมทิศทางอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์เพียงอย่างเดียว

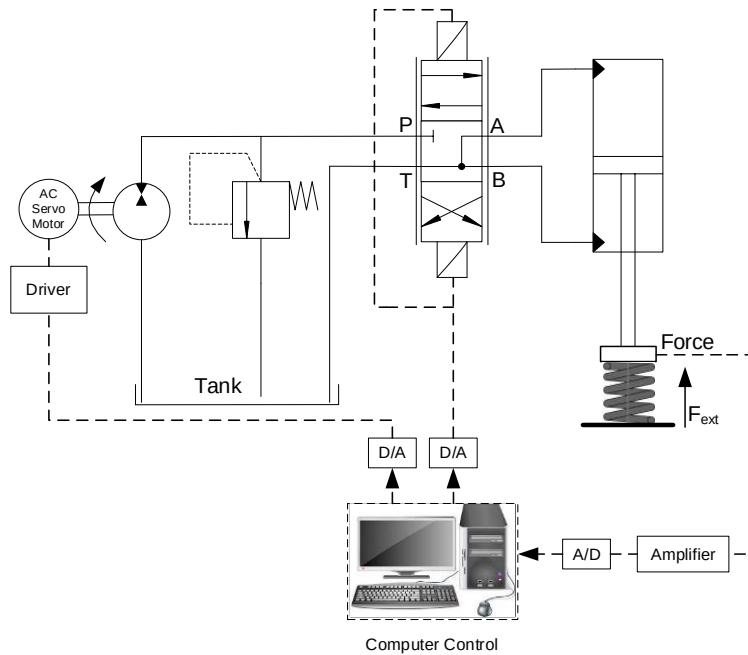


Figure 1 Schematic of Electro-Hydraulic System

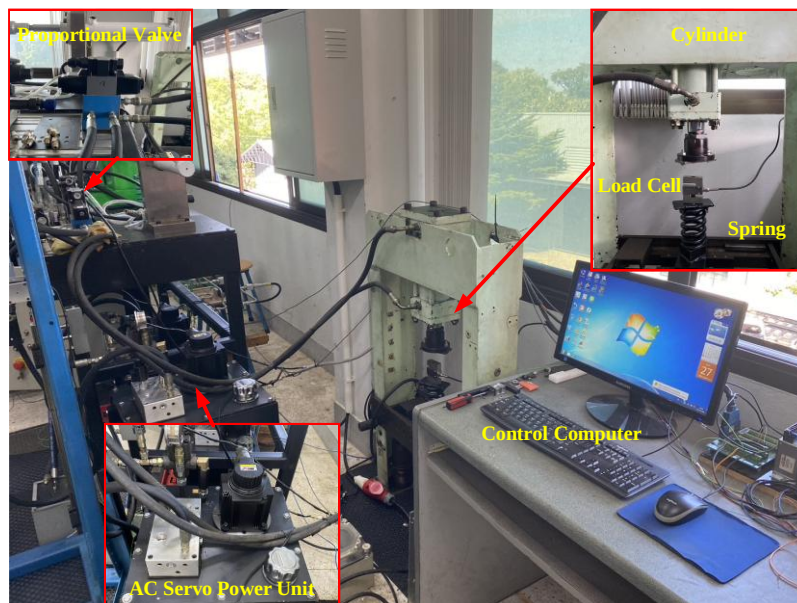


Figure 2 Electro-Hydraulic System Apparatus

จาก Figure 1 แสดงวงจรการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการศึกษานี้ การควบคุมระบบจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ควบคุมที่ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมเพื่อรับ-ส่งสัญญาณไปหาอุปกรณ์ทำงานและอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ โดยการติดต่อสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุมและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะใช้การ์ดติดต่อสื่อสาร PCI-6221 ของบริษัท National Instruments ที่มีการสุ่มข้อมูลที 0.01 วินาที สัญญาณที่ส่งไปที่วาล์ว

ควบคุมและแอซีเซอร์โวมอเตอร์จะเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดแรงดัน ช่วงระหว่าง -10 ถึง 10 โวลต์ และ ช่วงระหว่าง 0-10 โวลต์ ตามลำดับ ส่วนสัญญาณจากโหลดเซลล์ ที่ใช้ตรวจวัดแรงจะเป็นสัญญาณอนาล็อกที่ผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณของบริษัท Kyowa รุ่น WGA-100B-10 ที่ขยายแรงดันให้มีขนาด 0-10 โวลต์ เพื่อส่งสัญญาณไปที่การ์ดติดต่อสื่อสาร

Table 1 The specifications of the electro-hydraulic system components

Hydraulic gear pump	
Manufacturer:	Honor 2GG1U11R
Volumetric displacement:	11 cc/rev
Ac servo motor	
Manufacturer:	Delta
Model:	ECMA-E2135RS
Output:	2,000 rpm 7.16 Nm 1.5 Kw
Directional control valve	
Manufacturer:	Tokimec COM-3-33C-30-AN-11
Type:	4/3 Proportional
Double acting cylinder	
Bore / Rod:	40 cm / 28 cm
Stroke:	50 cm
Load cell	
Manufacturer:	Zega
Type:	S-type, 500 kg

2.2 การออกแบบตัวควบคุม

ตัวควบคุมแบบพีไอดีถูกใช้ในการออกแบบเพื่อควบคุมระบบในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิง สำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตัวควบคุมจะถูกคำนวณสัญญาณควบคุมจากค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนองของระบบ การคำนวณสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอดีแสดงในสมการที่ 1

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

โดยที่ $u_{PID}(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือความผิดพลาดในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิง การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมจะใช้วิธีการของ Ziegler-Nichols ในการหาตัวควบคุมแบบพีไอดี สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอดีจะไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โว และวาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์แบบสัดส่วน การศึกษาในครั้งนี้จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี เพราะเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้อุตสาหกรรมหรือระบบทั่ว ๆ ไป ซึ่งจุดเด่นคือมีโครงสร้างที่ง่าย มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญมีการปรับค่าเกณฑ์ง่าย การออกแบบค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมทั้ง 2 ระบบจะมีการใช้ค่าเกณฑ์ที่แตกต่างกันเพราะทั้ง 2 ระบบมีการถ่ายโอนไม่เหมือนกัน (สมการถ่ายโอนไม่ได้อธิบายในบทความนี้) แต่การออกแบบค่าเกณฑ์จะดูที่ผลตอบสนองของระบบที่ดีที่สุด สำหรับการหาค่าเกณฑ์ด้วยวิธีการของ

Ziegler-Nichols จะทำการปรับค่าให้ค่าเกณฑ์ตัวควบคุมแบบสัดส่วนให้ระบบมีผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงแบบสม่ำเสมอที่สัญญาณอ้างอิง จากนั้นนำค่าเกณฑ์ไปหาตัวควบคุมตามหลักการของ Ziegler-Nichols

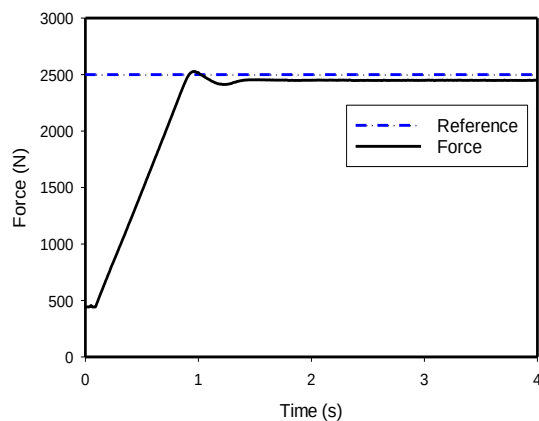
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลตอบสนองของระบบจากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับสมรรถนะผลตอบสนองเชิงเวลาในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิง และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์แบบเอซีเซอร์โว การทดลองแต่ละกรณีที่กำลังกล่าวมาข้างต้นจะใช้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่แตกต่างกัน เพราะระบบมีการควบคุมอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน ผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

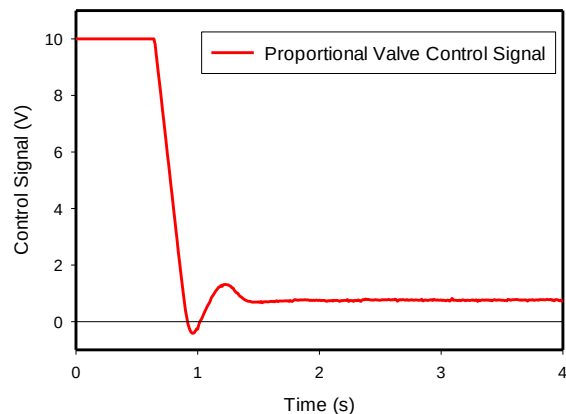
3.1 สัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันได

การติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันไดจะกำหนดให้แรงอ้างอิงมีขนาด 2,500 นิวตัน โดยรายละเอียดของผลการทดลองของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โวมียังดังต่อไปนี้

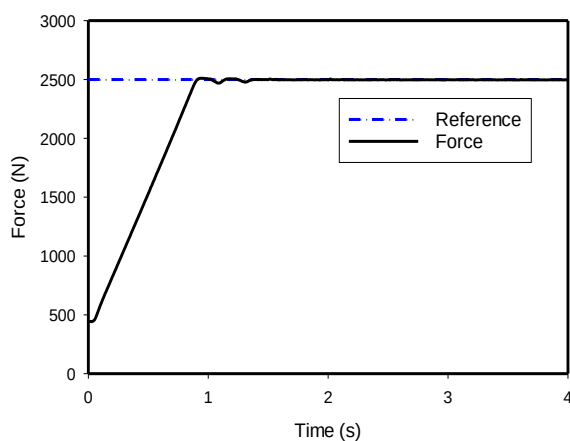
Figure 3 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงแบบขั้นบันไดสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p=0.15$ $K_i=0.001$ และ $K_d=0.00015$ ผลตอบสนองของแรงเชิงเวลาที่มีค่าเวลาขาขึ้น (Rise Time) 0.63 วินาที มีค่าเวลาอยู่ตัว (Setting Time) 0.92 วินาที และมีค่าความผิดพลาดผลตอบสนองของแรงที่สภาวะคงตัว (Steady State Error) ประมาณ 50.22 นิวตัน หรือประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ผลตอบสนองมีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว เพราะวาล์วควบคุมที่ควบคุมการเลื่อนของแกนวาล์ว เพื่อเปิดรูน้ำมัน ไม่สามารถเลื่อนแกนวาล์วจากย่านที่วาล์วไม่สามารถทำงานได้ (Dead Band Zone) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Jangnoi and Pinsopon (2018) จึงทำให้ไม่มีอัตราการไหลของน้ำมันไปที่กระบอกสูบ ถึงแม้ว่าสัญญาณควบคุมจะส่งมาที่วาล์วก็ตามดังแสดงใน Figure 3 (b) โดยสัญญาณควบคุมที่ช่วงสภาวะชั่วครู่มีค่าสูงสุดที่ 10 โวลต์



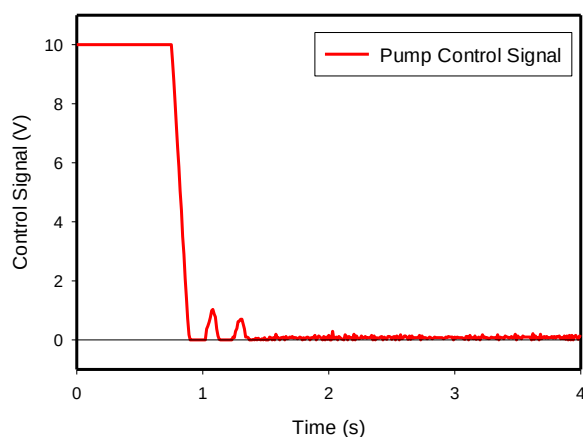
(a) Force Response



(b) Control Signal

Figure 3 Output response of step reference for valve flow control system

(a) Force Response



(b) Control Signal

Figure 4 Output response of step reference for pump flow control system

Figure 4 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงแบบขั้นบันไดสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊ม โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีค่า $K_p=0.3$ $K_i=0.05$ และ $K_d=0.002$ ผลตอบสนองของแรงมีค่าเวลาขาขึ้น 0.6 วินาที มีค่าเวลาอยู่ตัว 0.9 วินาที และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวประมาณ 4.69 นิวตัน หรือประมาณ 0.18 เปอร์เซ็นต์ ผลตอบสนองมีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน เพราะวาระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มไม่มีย่านที่วาล์วไม่มีอัตราการไหล เนื่องจากวาล์วจะเปิดพื้นที่ให้น้ำมันไหลผ่านมากที่สุดตลอดเวลา โดยอัตราการไหลจะถูกควบคุมที่ความเร็วรอบของปั๊ม โดยสัญญาณควบคุมดังแสดงใน Figure 4 (b) มีลักษณะคล้ายกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน (Figure 3 (b))

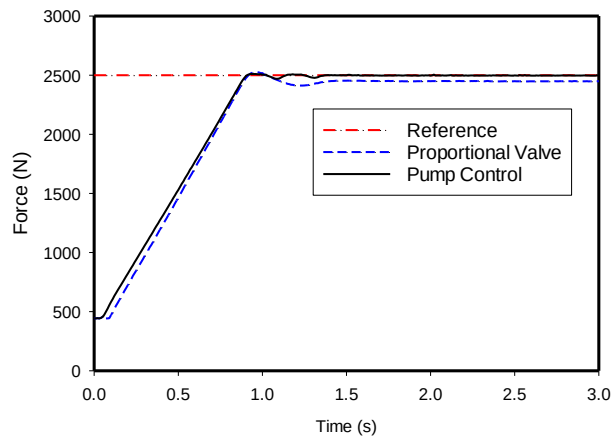
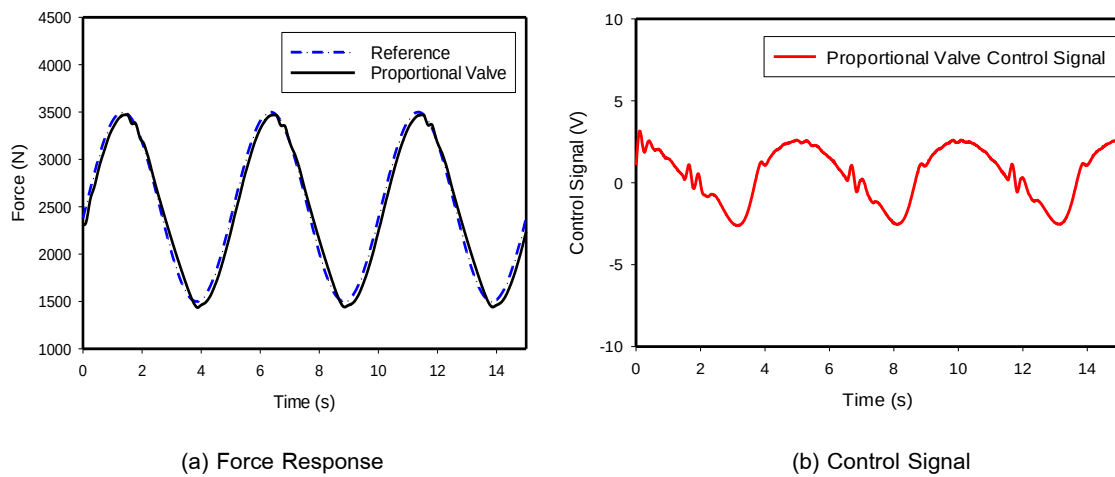


Figure 5 Output response of step reference of valve and pump flow control system



(a) Force Response

(b) Control Signal

Figure 6 Output response of sine reference for valve flow control system

Figure 5 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงแบบขั้นบันไดของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ได้อธิบายผลที่ผ่านมา

3.2 สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์

การทดลองควบคุมระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอชไอซีอาร์ไอที่สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ที่มีขนาดระหว่าง 1,500-3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิรตซ์

Figure 6 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์สำหรับระบบ

ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน โดยค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้ในการควบคุมระบบมีค่า $K_p=0.198$ $K_i=0.00015$ และ $K_D=0.001$ ผลตอบสนองของแรงในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงมีการสั่นในขณะสัญญาณอ้างอิงลดลงมากกว่าการควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ผลตอบสนองของระบบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error) ที่สภาวะคงตัวประมาณ 96.90 นิวตัน Figure 6 (b) แสดงสัญญาณควบคุมที่ควบคุมวาล์วมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอ้างอิงโดยมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ +5 ถึง -5 โวลต์

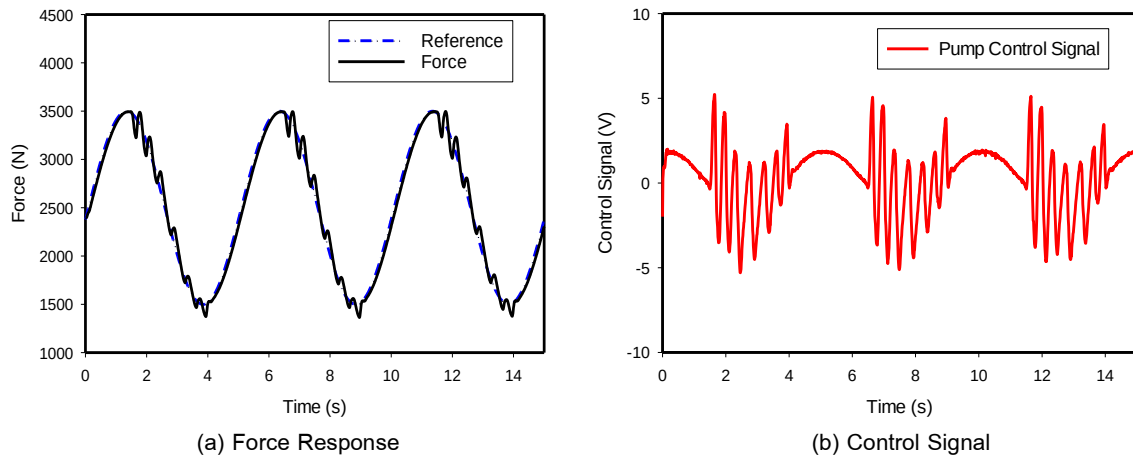


Figure 7 Output response of sine reference for pump flow control system

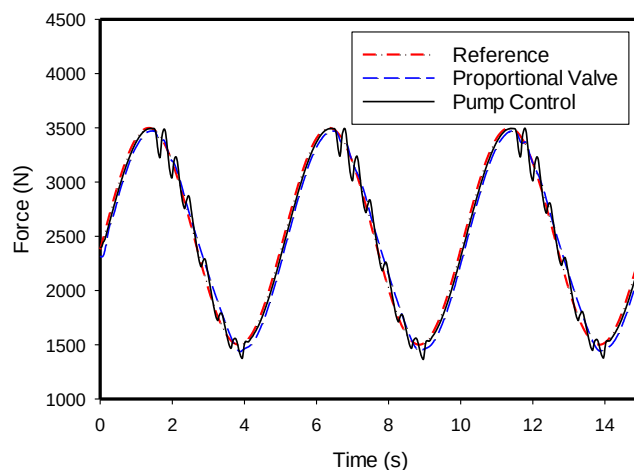


Figure 8 Output response of sine reference of valve and pump flow control system

Figure 7 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊ม โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p=0.25$ $K_i=0.009$ และ $K_d=0.003$ และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่สภาวะคงตัวประมาณ 77.48 นิวตัน จากผลการทดลองจะมีการสั่นของผลตอบสนองช่วงสัญญาณแรงอ้างอิงด้านข้างเนื่องจากมีแรงปฏิกิริยาจากการยืดกลับของสปริงที่ใช้เป็นโหลดจำลอง Figure 7 (b) แสดงสัญญาณควบคุมที่ควบคุมวาล์วมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอ้างอิงโดยมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ +5 ถึง -5 โวลต์ คล้ายกับการควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว แต่จะมีสัญญาณตอนก้านสูบเลื่อนเข้าจะมีการสั่นของสัญญาณมากกว่า

การเปรียบเทียบผลตอบสนองในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มแสดงดัง Figure 8

3.3 สัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยม

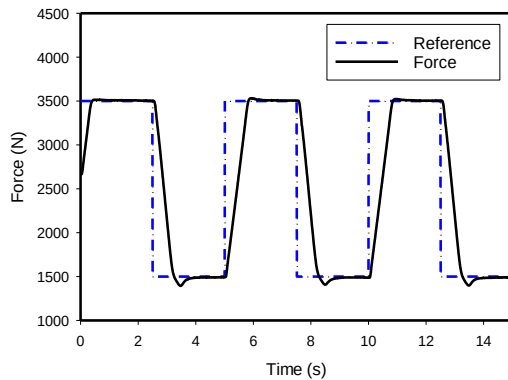
สัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมมีขนาดระหว่าง 1,500-3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิรตซ์ การทดลองควบคุมระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โว

Figure 9 (a) แสดงผลตอบสนองของแรงแบบสี่เหลี่ยมสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ซึ่งค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้ในการควบคุมระบบคือ $K_p=0.050$ $K_i=0.020$ และ $K_d=0.001$ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองประมาณ 639.78 นิวตัน แรงปฏิกิริยาจากการยืดกลับของสปริงช่วยทำให้เกิดส่วนพุงเกินขณะกระบอกสูบเลื่อนเข้า ซึ่งมีค่าส่วนพุงเกินประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ สัญญาณควบคุมมีค่าแรงดันคล้ายกับการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์บันได และมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคล้ายกับการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบไซน์ดังแสดงใน Figure 9 (b)

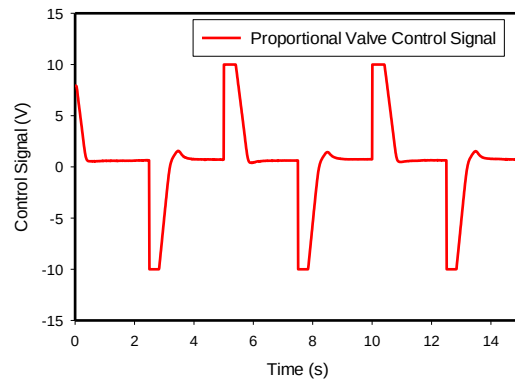
Figure 10 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงแบบสี่เหลี่ยมสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซิอร์โว โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุม $K_p=0.030$ $K_i=0.055$ และ $K_d=0.001$ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองประมาณ 485.20 นิวตัน ส่วนพุงเกินของระบบมีลักษณะคล้ายกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ซึ่งมีค่า

เปอร์เซ็นต์ส่วนพุงเกินประมาณ 14.4 เปอร์เซ็นต์ โดยผลตอบสนองเวลาชั่วครู่ดีกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน

Figure 11 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงด้วยสัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมของระบบควบคุมอัตราการไหลทั้ง 2 ระบบที่ทำการศึกษาในครั้งนี้

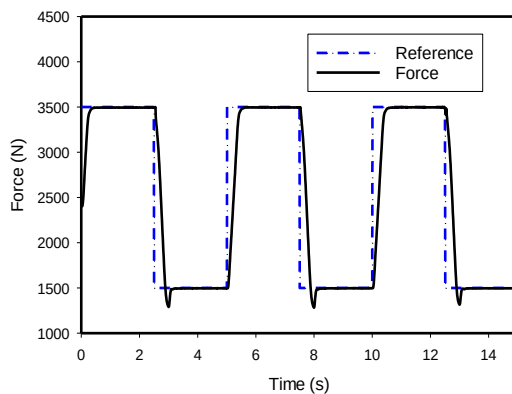


(a) Force Response

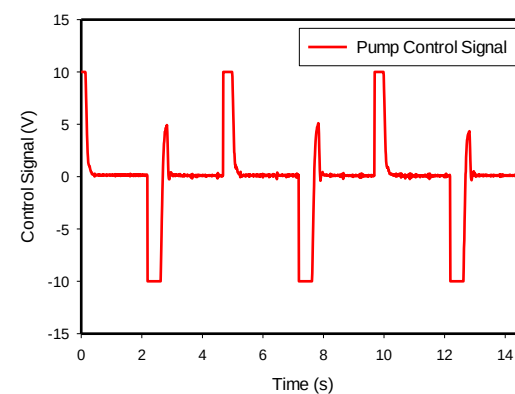


(b) Control Signal

Figure 9 Output response of square reference for valve flow control system



(a) Force Response



(b) Control Signal

Figure 10 Output response of square reference for pump flow control system

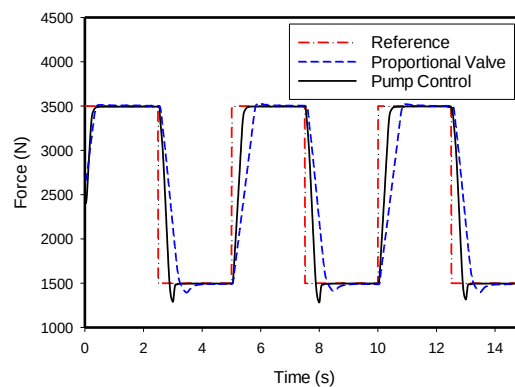


Figure 11 Output response of square reference of valve and pump flow control system

Table 2 Power Consumption

	Step		Sine		Square	
	Valve	Pump	Valve	Pump	Valve	Pump
Power (KWh)	0.024	0.011	0.023	0.005	0.019	0.008

3.4 การใช้พลังงานไฟฟ้า

ผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอชี่เซอร์โว การเก็บผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในการศึกษาในครั้งนี้ จะไม่สามารถนำสัญญาณการวัดออกมาเครื่องมีวัดได้ แต่ตัวอุปกรณ์สามารถเก็บผลการทดลองตลอดการทดลองและแสดงค่าเฉลี่ยออกมาเพียงอย่างเดียว ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าแต่ละการทดลองแสดงดัง Table 2 สำหรับการทดลองจะตั้งค่าความดันใช้งานของระบบที่ 40 บาร์ทั้ง 2 กรณี เพราะเป็นความดันที่ระบบสามารถทำงานได้

จาก Table 2 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอชี่เซอร์โวทุกกรณี จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าพบว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอชี่เซอร์โวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Xu *et al.* (2010); Ming *et al.* (2013); Pratumswan and Junchangpood (2013) โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอชี่เซอร์โวเทียบกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ที่สัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันไดลดลงประมาณ 54.17 เปอร์เซ็นต์ สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ลดลงประมาณ 78.26 เปอร์เซ็นต์ และสัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมลดลงประมาณ 57.89 เปอร์เซ็นต์ ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วน้ำมันที่ไหลออกจากปั๊มไม่ได้นำไปใช้งานทั้งหมด มีส่วนหนึ่งไหลกลับถึงผ่านวาล์วระบายความดัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เพราะมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มมีการทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ตลอดเวลา ส่วนการควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่นำเสนอในการศึกษาในครั้งนี้อัตราการไหลออกจากปั๊มจะถูกควบคุมด้วยมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนที่เปลี่ยนความเร็วรอบตามภาระไหล จึงทำให้มีการพลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว

4. สรุป

การศึกษาในครั้งนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอชี่เซอร์โว โดยทดลองการทำงานด้วยการควบคุมความเร็วรอบเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบ ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มอย่างง่ายสามารถที่จะสร้างขึ้นได้โดยใช้ปั๊มแบบเฟืองที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยการควบคุมอัตราการไหลใช้การควบคุมความเร็วรอบของปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งระบบที่สร้างขึ้นจะมีการควบคุมที่ง่ายกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ปรับอัตราการไหลได้

2. ระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอชี่เซอร์โวมียสมรรถนะของผลตอบสนองเชิงเวลา ค่าเวลาขาขึ้น ค่าเวลาอยู่ตัว และมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวดีกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยวาล์วแบบสัดส่วน แต่ยังมีส่วนพุงเกินของผลตอบสนองที่ยังมากกว่า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาที่ดีเพราะอัตราการไหลของน้ำมันไหลไหลออกจากปั๊มจะไปที่อุปกรณ์ทำงานทั้งหมด และมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอชี่เซอร์โวที่ควบคุมอัตราการไหลสามารถสร้างอัตราการไหลได้ทุกย่านสัญญาณควบคุม

3. ระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอชี่เซอร์โวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยวาล์วแบบสัดส่วนในทุกกรณีเช่นกัน เนื่องจากระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอชี่เซอร์โวมียความเร็วรอบที่ไม่คงที่ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามสภาวะการทำงานจริง จึงทำให้ไม่มีน้ำมันส่วนเกินไหลกลับถึงผ่านวาล์วระบายความดัน จึงทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าประหยัดพลังงานไฟฟ้า

4. การศึกษาระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอชี่เซอร์โวที่ใช้ตัวควบคุมที่มีค่าเกนคงที่ได้ทดสอบสมรรถนะเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นการศึกษาดังกล่าว

ที่สามารถปรับค่าเกณฑ์ได้ตามภาระโหลดจริงควรจะมีการศึกษาต่อไป เพื่อเทียบกับตัวควบคุมที่มีค่าเกณฑ์ที่

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เพราะได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ทางผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

- Ba, K., Wang, Y., He, X., Wang, C., Yu, B., Liu, Y. and Kong, X. 2024. Force Compensation Control for Electro-Hydraulic Servo System with Pump Valve Compound Drive via QFT-DTOC. **Chinese Journal of Mechanical Engineering** 37(27):1-19.
- Ho, T. H. and Le, T. D. 2021. Development and Evaluation of Energy-Saving Electro-Hydraulic Actuator. **Actuators** 10(302): 1-27.
- Jangnoi, T. and Pinsopon, U. 2014. Electro-Hydraulic Force Control using Fuzzy Self-Tuning PID Controller, pp. 109. *In The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering*. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok.
- Jangnoi, T. and Pinsopon, U. 2018. Velocity Control of Electro-Hydraulic Pump Control System using Gear Pump. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control** 14(6): 2307-2323.
- Ketelsen, S., Padovani, D., Andersen, T.O., Ebbesen, M.K. and Schmidt, L. 2019. Classification and Review of Pump-Controlled Differential Cylinder Drives. **Energies** 12(1293): 1-27.
- Liu, R., Wang, Z., Jia, P., Yan, G., Zhang, T., Jia, C. and Chen, G. 2023. Research on Pressure Control of an Electro-Hydraulic Servo System Based on Sliding-Mode Variable-Structure Direct Torque Control. **Processes** 11(92):1-27.
- Lyu, L., Chen, Z. and Yao, B. 2021. Advanced Valves and Pump Coordinated Hydraulic Control Design to Simultaneously Achieve High Accuracy and High Efficiency. **IEEE Transactions on Control Systems Technology** 29(1): 236-248.
- Ming, X., Bo, J., Guojin, C. and Jing, N. 2013. Speed-Control of Energy Regulation Based Variable-Speed Electro-hydraulic Drive. **Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering** 59(7-8): 433-442.
- Pratumsuwan, P. and Junchangpood, A. 2013. Force and Position Control in the Electro-Hydraulic System by using a MIMO Fuzzy Controller, pp. 1462-1467. *In 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, Melbourne, Australia.
- Sangpet, T. and Kuntanapreeda, S. 2013. Force control of an electrohydraulic actuator using a fraction order controller. **Asian Journal of Control** 15(4): 1-9.
- Sinthipsomboon, K., Hunsacharoonroj, I., Khedari, J., Po-ngaen, W. and Pratumsuwan, P. 2011. A Hybrid of Fuzzy and Fuzzy self-tuning PID Controller for Servo Electro-Hydraulic System, pp. 220-225. *In 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, Beijing, China.
- Truong, D.Q. and Ahn, K.K. 2009. Force control for hydraulic load simulator using self-tuning grey predictor-fuzzy PID. **Mechatronic** 19: 233-246.
- Truong, D.Q. and Ahn, K.K. 2011. Force control for press machines using an online smart tuning fuzzy PID based on a robust extend Kalman filter. **Expert System with Applications** 38: 5879-5894.
- Xu, M., Jin, B., Yu, Y., Shen, H. and LI, W. 2010. Using Artificial Neural Networks for Energy Regulation Based Variable-speed Electrohydraulic Drive. **Chinese Journal of Mechanical Engineering** 23(3): 327-335.



Research Article

เครื่องฟังเสียงหัวใจแบบพกพา ที่สามารถแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันไลน์

Displayable Portable Doppler Device Via the Line Application

ศิริวรรณ โชคดี^a สุขเกษม วัชรชัยสกุล^a ธนศักดิ์ ทรงบัณฑิตย์^a รัชชานนท์ อาทิตย์^a กัลยาณี ศรีนาเมือง^aเศรษฐวิทย์ ภูฉายา^b จันทกานต์ กาญจนเวทัง^c และ กมลวรรณ ทิพย์ประเสริฐ^{d*}Siriwan Chokkha^a, Sukasem Watcharamaisakul^a, Thanasak Songbandhit^a, Ratchanon Arthit^aKunlayanee Srinamueang^a, Settawit Poochaya^b, Jantakan Kanjanawetang^c and Kamonwan Thipprasert^{d*}^a สาขาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000^a School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.^b สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000^b School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.^c วิชาการพยาบาลครอบครัวและการผดุงครรภ์ สำนักพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000^c School of Family Health and Midwifery Nursing, Institute of Nursing, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.^d สาขานวัตกรรม วิศวกรรมแพทย์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000^d Biomedical Innovation Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-12-31

Revised: 2024-04-25

Accepted: 2024-05-02

Keywords:

heart rate (HR);

mortality rate;

microphone sensor;

Arduino

The innovation in crafting home fetal heart rate monitors is driven by the crucial role of heart rate measurement in assessing initial health. The KY 037 sensor, known for its proficiency in collecting heart sound data, is meticulously chosen for reliable data acquisition. Following collection, the data undergoes thorough pre-processing before being transmitted to the Arduino Uno R3 (NodeMCU ESP8266 v2) microcontroller. A sophisticated algorithm enables seamless data transmission, resulting in a coherent signal readout on a computer, real-time display on an LCD screen, and simultaneous representation on the Line application. The developed prototype, calibrated using the standard LifeDop-250 model commonly used in hospitals, showed a notable 1.62% reduction in measurement error after thorough calibration and the implementation of a newly replicated setting. This achievement surpasses the typical 3-5% errors range observed in medical devices, showcasing prototype 's precision in heart rate measurement. The prototype's efficiency is highlighted by its 96% lower cost compared to standard instruments, making it not only economically viable but also a cost-effective alternative for broader accessibility. Preliminary tests indicate the potential for the prototype to evolve into a home fetal heart rate monitor, offering a promising contribution to reducing fetal mortality rates and advancing local healthcare technology.

* Corresponding author.

E-mail address: Kanomwann30@gmail.com

Cite this article as:

Chokkha, S., Watcharamaisakul, S., Songbandhit, T., Arthit, R., Srinamueang, K., Poochaya, S., Kanjanawetang, J. and Thipprasert, K. 2025. Displayable Portable Doppler Device Through The Line Application. *Recent Science and Technology* 17(2): 261691.

บทคัดย่อ

การวัดอัตราการเต้นของหัวใจมีบทบาทสำคัญในการประเมินสุขภาพเบื้องต้นและเป็นจุดเริ่มต้นในการนำไปสร้างนวัตกรรมเครื่องวัดอัตราการเต้นของหัวใจของทารกในครรภ์ที่ใช้ในบ้าน เช่น เซอร์ KY 037 ถูกนำมาใช้ในการนำมาเก็บผลสัญญาณชีพ หลังจากนั้นข้อมูลจะได้รับการประมวลผลอย่างละเอียดก่อนจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 (NodeMCU ESP8266 v2) นอกจากนี้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนที่เขียนขึ้นจะสามารถรับส่งข้อมูลได้ถูกต้องก่อนจะส่งสัญญาณที่สอดคล้องไปที่ระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ค่าอัตราการเต้นของหัวใจจะถูกแสดงผลแบบเรียลไทม์บนหน้าจอ LCD พร้อมกับการส่งข้อมูลไปที่ไลน์แอปพลิเคชัน เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะทำการเปรียบเทียบโดยเครื่องวัดอัตราการเต้นของหัวใจแบบมาตรฐานทางการแพทย์ รุ่น LifeDop-250 ซึ่งเป็นเครื่องมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไปในโรงพยาบาล พบว่าข้อผิดพลาดของเครื่องต้นแบบมีค่าต่ำอย่างเห็นได้ชัดเท่าซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 1.62% แสดงถึงความผิดพลาดของเครื่องต้นแบบมีค่าต่ำกว่าช่วงความผิดพลาดของอุปกรณ์การแพทย์ทั่วไปที่มีค่ากำหนดไว้เท่ากับ 3-5% บ่งบอกถึงความแม่นยำของต้นแบบที่สร้างขึ้นประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของต้นแบบถูกยืนยันด้วยต้นทุนที่มีราคาต่ำกว่าเครื่องมือมาตรฐานทางการแพทย์ถึง 96% สิ่งเหล่านี้ไม่เพียงแต่มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจ แต่ยังเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าสำหรับการเข้าถึงซึ่งการใช้งานเครื่องมือทางการแพทย์อีกด้วย การทดสอบเบื้องต้นดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพของเครื่องต้นแบบ ซึ่งมีแนวโน้มในการนำไปเป็นจุดเริ่มต้นแห่งการพัฒนาเป็นเครื่องวัดอัตราการเต้นของหัวใจทารกในครรภ์แบบพกพา ซึ่งจะช่วยลดอัตราการเสียชีวิตของทารกในครรภ์และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการดูแลสุขภาพในท้องถิ่นให้ก้าวหน้าได้

คำสำคัญ: อัตราการเต้นของหัวใจ, อัตราการเสียชีวิต, ไมโครโฟนเซ็นเซอร์, อาดูโน

1. บทนำ

การตั้งครรภ์ถือเป็นภาวะวิกฤติในวงจรชีวิตของสตรี (Life cycle) ซึ่งหญิงทุกคนที่มาฝากครรภ์จะได้รับการประเมินว่าอยู่ในภาวะอันตรายของการตั้งครรภ์ที่เสี่ยงสูงหรือเสี่ยงต่ำ แต่ไม่ว่าจะจัดอยู่ในกลุ่มเสี่ยงสูงหรือเสี่ยงต่ำ สตรีที่ตั้งครรภ์ทุกคนก็มีโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อสภาวะจิตใจที่รุนแรง นั่นคือ ทารกในครรภ์เสียชีวิตก่อนที่จะถึงกำหนดคลอดหรือเป็นที่รู้จักกันดีเรียกว่า สภาวะแท้งลูก (Abortion) ซึ่งเกิดได้จากสาเหตุที่หลากหลาย เช่น ความผิดปกติของทารกในครรภ์ ความผิดปกติของฮอร์โมน ภาวะแทรกซ้อนในขณะตั้งครรภ์ หรือแม้กระทั่งการเคลื่อนไหวของทารกที่ผิดปกติทางจนทำให้สายสะดือพันคอทารก เป็นต้น ซึ่งไม่ว่าจะเกิดจากสาเหตุใดแล้วแต่นำไปสู่ผลกระทบต่อจิตใจของผู้เป็นแม่ทั้งนั้น ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวและตรวจสอบการมีชีวิตอยู่ของทารกเบื้องต้น สูตินารีแพทย์มักแนะนำให้ทำการประเมินภาวะสุขภาพของทารกในครรภ์ซึ่งมารดาสามารถทำได้ด้วยตนเอง นั่นก็คือ การนับลูกดิ้นหรือการตรวจนับความเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ (Fetal movement count) ซึ่งการดิ้นของทารกในครรภ์นั้นเป็นการแสดงให้มารดาทราบว่าทารกยังมีชีวิตอยู่ การเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ถือเป็นสัญญาณชีพที่สำคัญที่สามารถบ่งบอกได้ว่าทารกกำลังเจริญเติบโตอย่างแข็งแรงและยังคงหายใจระบบในร่างกายจะค่อย ๆ พัฒนาขึ้นตามอายุครรภ์ โดยเฉพาะระบบหัวใจจัดเป็นอวัยวะที่พัฒนาขึ้นเร็วที่สุดของทารก การพัฒนาของระบบหัวใจในทารกจะมีผลในการ

ควบคุมการดิ้นและเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ โดยจะทำให้สามารถตรวจจับการดิ้นและการเคลื่อนไหวได้ในครั้งแรกหลังจากทารกมีอายุครรภ์ครบ 3 สัปดาห์ หรืออายุครรภ์ของมารดาเท่ากับ 3 สัปดาห์ (Sameni and Clifford, 2010; Chen *et al.*, 2011) ดังนั้น การวัดอัตราการเต้นของหัวใจทารกเป็นหนึ่งในวิธีที่ดีที่สุดในการติดตามอัตราการมีชีวิตอัตราการตาย หรือแม้กระทั่งสามารถประเมินความแข็งแรงของทารกในครรภ์ได้ (Chaemsaitong and Raungrommorakot, 2005; Phoodaangau, 2014; Yaisoon, 2015) ซึ่งโดยปกติสูตินารีแพทย์จะแนะนำให้มารดาที่ตั้งครรภ์เริ่มทำการตรวจสอบหรือนับการดิ้นของทารกในครรภ์เมื่อมีอายุครรภ์อยู่ระหว่างสัปดาห์ที่ 28-36 (Tangwiwat, 2022) การนับการดิ้นหรือนับการเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์มีหลายวิธี ซึ่งหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทยและสูตินารีแพทย์มักแนะนำให้ใช้ในการนับการเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ คือ Sadovsky's method โดยต้องทำการนับการเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์หลังมื้ออาหาร 3 เวลา ในเวลาเช้า เย็น และเย็น ครั้งละ 1 ชั่วโมง ในกรณีที่ทารกในครรภ์ดิ้นมากกว่า 3 ครั้งต่อเวลา หรือ 9-10 ครั้งต่อวัน จะถือว่าทารกในครรภ์มีการดิ้นและการเคลื่อนไหวปกติ แปลผลได้ว่าทารกในครรภ์ยังคงมีชีวิต แต่หากการดิ้นหรือการเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ที่นับได้น้อยกว่า 10 ครั้งต่อวัน แปลความหมายได้ว่าเกิดความผิดปกติกับทารกในครรภ์ มารดาควรรีบไปพบสูตินารีแพทย์เพื่อทำการตรวจรักษาในทันที (Chatchawet, 2019; Komwilaisak, 2022) อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบสัญญาณชีพของทารกด้วยการนับการดิ้นหรือการเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ยังมี

ข้อบกพร่องหลายประการ โดยเฉพาะความใส่ใจของมารดาที่ต้องดูแลและสังเกตการณ์เกี่ยวกับครรภ์ของตนเองอย่างใกล้ชิดตลอดเวลา เพราะสิ่งเหล่านี้จะเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่จะสามารถป้องกันการเสียชีวิตของทารกในครรภ์ได้ (Saastad *et al.*, 2011)

วิธีการตรวจจับความเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ด้วยการนับลูกดิ้นด้วยตนเองในปัจจุบันยังมีความผิดพลาดอยู่มาก ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการที่ทารกหลับเป็นเวลานาน และมารดาไม่เข้าใจวิธีการนับที่ถูกต้อง หรือไม่มีเวลาที่จะนับลูกดิ้น เนื่องมาจากสภาพสังคมและเศรษฐกิจในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก มารดาแม้ว่ากำลังตั้งครรภ์ก็ยังคงต้องทำงานเพื่อหารายได้จุนเจือครอบครัว โดยมารดาในกลุ่มที่ทำงานมักจะไม่ได้นับลูกดิ้น หรือไม่มีเวลานับลูกดิ้น เมื่อตรวจจับความผิดปกติได้ก็มักจะมาโรงพยาบาลเมื่อรู้สึกวาลูกไม่ดิ้นแล้ว นำไปสู่ความล่าช้าในการตรวจรักษาชีวิตของทารกในครรภ์ ซึ่งจบลงด้วยการเสียชีวิตของทารกตั้งแต่อยู่ในครรภ์มารดา จากสถิติของการเสียชีวิตของทารกในครรภ์ พบว่า หญิงตั้งครรภ์โดยเฉพาะในประเทศไทยจำนวนเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ยังคงใช้ชีวิตและทำงานตามปกติ (Rungaroon and Chandee, 2021) ซึ่งส่งผลให้บางครั้งหลังลืมการตรวจจับการเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ของตนเอง ปัญหาเหล่านี้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการเสียชีวิตของทารกในครรภ์ นอกจากนี้เครื่องวิเคราะห์อัตราการเต้นของหัวใจของทารกในครรภ์มีความขาดแคลน ซึ่งมีให้ใช้เฉพาะที่โรงพยาบาลเท่านั้น เนื่องจากเป็นเครื่องมือนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาแพงจนเป็นข้อจำกัดในการเข้าถึง ทำให้ราคาในการตรวจวัดแต่ละครั้งมีราคาสูงถึง 1,000-2,000 บาท ส่งผลทำให้เครื่องมือทางการแพทย์ที่มีมาตรฐานและปลอดภัยสำหรับใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนไหวของทารกหรือวัดอัตราการเต้นของหัวใจทารกขาดแคลนอย่างมากในปัจจุบัน (Kamalifard *et al.*, 2013; Ryo *et al.*, 2018) เพื่อช่วยให้ทารกมีชีวิตอย่างปลอดภัยจนกระทั่งถึงกำหนดคลอด ประกอบกับการพัฒนาทางการแพทย์และเทคโนโลยีที่ทันสมัย มีงานวิจัยและอนุสิทธิบัตรหลายฉบับเริ่มให้ความสนใจและพัฒนาเกี่ยวกับการสร้างเครื่องมือทางการแพทย์ที่ตอบสนองต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น (Thomas and Chin, 2014; Shabry *et al.*, 2017; Yuvaraj *et al.*, 2021) ดังเอกสารการจดสิทธิบัตรหลายฉบับดังนี้

อนุสิทธิบัตรประเทศไทย เลขที่คำขอ 1703001486 จดอนุสิทธิบัตรในชื่อเรื่อง “ระบบและวิธีวิเคราะห์อุณหภูมิเพื่อการแจ้งเตือนให้เปลี่ยนผ้าอ้อม” และอุปกรณ์สำหรับดำเนินการดังกล่าว ได้รับการจดทะเบียนในปี พ.ศ. 2563 การประดิษฐ์นี้เกี่ยวข้องกับระบบ

วิเคราะห์อุณหภูมิ เพื่อการแจ้งเตือนให้เปลี่ยนผ้าอ้อมที่ประกอบด้วยหน่วยตรวจวัดอุณหภูมิ หน่วยประมวลผลกลางหรือเครื่องเซิร์ฟเวอร์ โดยที่หน่วยตรวจวัดอุณหภูมิที่ประกอบด้วย กลุ่มของเซ็นเซอร์อย่างน้อยสามชุดที่เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ในแผ่นซับของผ้าอ้อมเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิห้องและเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิร่างกาย ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บริเวณผ้าอ้อมในแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกัน เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิในแผ่นซับของผ้าอ้อมตรวจวัดอุณหภูมิห้องและตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายของผู้ใช้งานที่อยู่ในท่านั่งหรือท่านอน โดยจะรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากกลุ่มของเซ็นเซอร์ผ่านตัวกรองซึ่งทำหน้าที่กรองอุณหภูมิดังกล่าว หากข้อมูลอุณหภูมิที่ได้รับเกินกว่ากำหนดจะทำการส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลกลางหรือเครื่องเซิร์ฟเวอร์ ซึ่งหน่วยประมวลผลกลางจะทำการประมวลผลว่าควรเปลี่ยนผ้าอ้อมหรือไม่ ควบคู่กับการวิเคราะห์ลักษณะท่าทางของผู้ใช้งาน ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวจะประกอบด้วยหน่วยตรวจวัดเกณฑ์มาตรฐานซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบผลของความน่าจะเป็นที่คำนวณได้ดังกล่าว เพื่อให้หน่วยส่งสัญญาณทำการแจ้งเตือนไปยังหน่วยรับสัญญาณของอุปกรณ์เปลี่ยนแผ่นซับเพื่อทำการเปลี่ยนผ้าอ้อมให้กับผู้ใช้งานต่อไป (Kasisopha *et al.*, 2020)

อนุสิทธิบัตรประเทศไทย เลขที่คำขอ 1603000137 จดอนุสิทธิบัตรในชื่อเรื่อง “เครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบไร้สายบันทึกในคลาวด์” และอุปกรณ์สำหรับดำเนินการดังกล่าว ได้รับการจดทะเบียนในปี พ.ศ. 2561 โดยที่เครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบไร้สายบันทึกในคลาวด์ตามการประดิษฐ์ประกอบด้วย อุปกรณ์วัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจจากผิวหนัง ส่งต่อไปยังภาคขยายสัญญาณความถี่เบื้องต้นเพื่อส่งเข้าภาคส่งและรับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจผ่านระบบสื่อสารไร้สายบลูทูธ และส่งต่อไปยังหน่วยคัดกรองสัญญาณความถี่ขั้นสุดท้าย เพื่อคัดเลือความถี่ที่ต้องการแล้วส่งไปยังหน่วยประมวลผลในคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณอ้างอิงปกติที่บันทึกไว้แล้วแสดงผลบนหน้าจอบนคอมพิวเตอร์ และส่งข้อมูลไปบันทึกลงบนสื่อบันทึกข้อมูลกลางคลาวด์ สามารถเรียกดูผลวิเคราะห์ผ่านสื่อข้อมูลออนไลน์ (Rakphongsiri *et al.*, 2016)

อนุสิทธิบัตรประเทศไทย เลขที่คำขอ 1203001314 จดอนุสิทธิบัตรในชื่อเรื่อง “เครื่องคำนวณและเฝ้าติดตามการตั้งครรภ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา” และอุปกรณ์สำหรับดำเนินการดังกล่าว ได้รับการจดทะเบียนในปี พ.ศ. 2556 การประดิษฐ์นี้แสดงถึง เครื่องคำนวณและเฝ้าติดตามการตั้งครรภ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ป้อนข้อมูลสำหรับผลิตสัญญาณที่ตอบสนองกับการที่ผู้ใช้ป้อน

ข้อมูลเข้าสู่อุปกรณ์บันทึกข้อมูลดังกล่าวโดยที่ข้อมูลประกอบด้วย วันแรกของการมีประจำเดือนและวันสุดท้ายของการมีประจำเดือน ความสูงก่อนตั้งครรภ์ น้ำหนักก่อนตั้งครรภ์ และอายุของผู้ใช้ หน่วยประมวลผลที่เชื่อมอยู่กับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลสำหรับรับสัญญาณจากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลและประมวลสัญญาณเพื่อหาข้อมูลการตั้งครรภ์ของผู้ใช้ หน่วยความจำที่เชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลสำหรับเก็บข้อมูลเกณฑ์น้ำหนักที่ควรจะเป็นระหว่างตั้งครรภ์ของผู้ใช้ ข้อมูลแคลอรีที่ควรได้รับขณะตั้งครรภ์ของผู้ใช้ นาฬิกาที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างหน่วยประมวลผลกับหน่วยความจำสำหรับให้ข้อมูลเวลา ณ ปัจจุบัน และหน้าจอแสดงผลที่เชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลสำหรับแสดงข้อมูลการตั้งครรภ์ที่ประมวลผลมาจากหน่วยประมวลผล โดยที่หน่วยประมวลผลใช้ข้อมูลวันแรกที่มีประจำเดือนครั้งสุดท้ายและเวลา ณ ปัจจุบันเพื่อหาอายุครรภ์และวันกำหนดคลอด และหน่วยประมวลผลใช้ข้อมูลความสูงก่อนตั้งครรภ์ น้ำหนักก่อนตั้งครรภ์ และอายุของผู้ใช้เพื่อหาน้ำหนักที่เหมาะสมของผู้ตั้งครรภ์และปริมาณแคลอรีที่ควรได้รับขณะตั้งครรภ์ในแต่ละสัปดาห์ (Sinthanayothin *et al.*, 2013)

อนุสิทธิบัตรประเทศไทย เลขที่คำขอ 2003000869 จดอนุสิทธิบัตรในเรื่อง “ชุดอุปกรณ์จำลองพัฒนาการทารกในครรภ์” และอุปกรณ์สำหรับดำเนินกระบวนการดังกล่าว ได้รับการจดทะเบียนในปี พ.ศ. 2565 ชุดอุปกรณ์จำลองพัฒนาการทารกในครรภ์ มีลักษณะใกล้เคียงกับพัฒนาการทารกในครรภ์ของหญิงตั้งครรภ์ ประกอบด้วย หุ่นมารดาเป็นยางซิลิโคนที่มีความยืดหยุ่นบริเวณหน้าท้องรองรับการยืดตัวจากการเปลี่ยนอายุครรภ์ของหุ่นทารกได้ทุกขนาด ภายในหุ่นมารดาติดตั้งถุงน้ำหนักรักษาท้องเพื่อเป็นเสมือนน้ำคร่ำของมารดาที่สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ขึ้นอยู่กับอายุครรภ์ และมีเซ็นเซอร์วัดแรงดันเพื่อวัดแรงดึงของหน้าท้อง (น้ำคร่ำ) ซึ่งมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละอายุครรภ์ หุ่นทารกที่มีขนาดตามอายุครรภ์ 3-9 เดือน มีการติดเสียงการเต้นของหัวใจทารกในครรภ์ เสียงการไหลเวียนของเลือดที่สายสะดือทารก เสียงการไหลเวียนเลือดที่มดลูก เสียงการไหลเวียนเลือดดำ เสียงการไหลเวียนบริเวณรก และเสียงการเคลื่อนตัวของทารกในครรภ์มารดา นอกจากนี้มีการติดเสียงกระตุ้นพัฒนาการทารกในครรภ์ตั้งแต่ 5 เดือน พร้อมทั้งการเคลื่อนไหวของทารกในครรภ์ ส่วนระบบการควบคุมการเคลื่อนตัวของหุ่นทารก มีตำแหน่งการวางตัวของหุ่นทารกในครรภ์ของมารดาทั้งหมด 7 ตำแหน่ง เรียงตามขนาดของอายุครรภ์ จะใช้มอเตอร์เป็นตัวที่หมุนหุ่นทารกไปทิศทางที่ต้องการและใช้โซลีนอยด์ทำหน้าที่ดึงหุ่นทารกเข้ามาที่จุดศูนย์กลางของหน้าท้องหุ่นมารดาและดันหุ่นทารกขึ้น

ไปสู่หน้าท้องของหุ่นมารดาเพื่อให้มีลักษณะเหมือนการตั้งครรภ์ของมารดา ซึ่งการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยกล่องควบคุมการทำงานที่จะมีปุ่มให้เลือกอายุครรภ์หรือขนาดของทารก และปุ่มเลือกการกลับทิศของหุ่นทารกตามที่ต้องการศึกษา เพื่อพัฒนาเป็นสื่อการเรียนการสอนแก่นักศึกษาพยาบาล นักศึกษาแพทย์ และบุคลากรสาธารณสุขในการให้ความรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางร่างกายของหญิงตั้งครรภ์และพัฒนาการทารกในครรภ์ พร้อมทั้งฝึกทักษะการตรวจครรภ์ ตั้งแต่อายุครรภ์ 1-9 เดือนได้อย่างมีประสิทธิภาพและครบถ้วน (Yimman *et al.*, 2022)

จากงานวิจัยและนวัตกรรมข้างต้นพบว่านักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาทดลอง วิจัย และพัฒนาอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่นำมาทำเป็นเครื่องมือทางการแพทย์เพื่อใช้ในการตอบสนองต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ แต่ไม่พบงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องฟังเสียงหัวใจทารกแบบพกพา (The portable heart sound device) ที่ตรวจจับสัญญาณชีพและสามารถรายงานผลแบบระบบเรียลไทม์ (Real-time system) ไปยังสูติแพทย์โดยตรงผ่านการแจ้งเตือนด้วยแอปพลิเคชันไลน์ (Line application) ข้อดีของงานวิจัยนี้คือ หญิงตั้งครรภ์จะสามารถเข้าถึงซึ่งเครื่องวัดสัญญาณชีพของทารก สามารถใช้อุปกรณ์วัดอัตราการเต้นของหัวใจทารกในครรภ์ได้ในขณะทำงาน ลดการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กพกพาสะดวกและมีราคาถูกกว่าท้องตลาด อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดอัตราการเสียชีวิตของทารกในครรภ์อีกด้วย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องฟังเสียงหัวใจแบบพกพาที่รายงานผลแบบระบบเรียลไทม์ (Real-time system) แสดงผลผ่านแอปพลิเคชันไลน์ (Line application) จะประกอบด้วยระบบปฏิบัติการที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกายภาพหรือสัญญาณชีพ แผนภาพวงจรควบคุมการทำงานและวงจรประมวลผลเริ่มต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์และการเขียนโค้ดคำสั่งที่แสดงผลผ่านหน้าจอแบบเรียลไทม์ คำสั่งการและแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฟังเสียงหัวใจและรายละเอียดการทำงานในแต่ละส่วนอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกายภาพหรือสัญญาณชีพ

ระบบปฏิบัติการส่วนแรกประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณชีพชนิดไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ (KY-037 microphone condenser) ซึ่งจะทำการตรวจจับ ขยาย

สัญญาณ ก่อนส่งผ่านไปส่วนที่สองคือวงจรควบคุมการทำงาน ไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ชนิด KY-037 ไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ (KY-037 microphone condenser) ใช้ sampling rate การเก็บข้อมูลเท่าไร คิดคำนวณ ค่า sampling rate เพียงพอต่อการวัดอัตราการเต้นหัวใจ ดังนี้ Maximum Heart Rate คืออัตราการเต้นหัวใจสูงสุดของบุคคลนั้น ๆ ที่เราต้องการวัดในหน่วย Hz Maximum Heart Rate ของทารก สามารถหาได้จาก $MHR = 220 - \text{Age} = 220 - 0 = 220$ bpm สามารถหา Sampling Rate ได้จาก $\text{Sampling rate} = 2 \times \text{Maximum Heart Rate} = 2 \times 220 = 440$ Hz หรือประมาณ 500Hz

ไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ชนิด KY-037 เป็นอุปกรณ์ระบบดิจิทัลที่ประกอบด้วยส่วนหลักสามส่วน แสดงดังภาพที่ 1 ส่วนแรกคือเซ็นเซอร์ที่ถูกติดตั้งด้านหน้าของโมดูล ทำหน้าที่วัดและตรวจจับการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ สัญญาณที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ในช่วงแรกจะเป็นสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine wave) แสดงข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณตลอดเวลาแบบค่อยเป็นค่อยไป หลังจากเซ็นเซอร์ตรวจจับสัญญาณอนาล็อกเข้ามาที่ตัววัดแล้วก็จะทำการส่งผ่านสัญญาณ

อนาล็อกเข้าไปในส่วนที่สอง ส่วนที่สองของอุปกรณ์ ไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ชนิด KY-037 จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ขยายเสียงสัญญาณที่ได้จากการรับค่าในส่วนแรกผ่านเซ็นเซอร์ตรวจจับ ซึ่งจะขยายสัญญาณตามค่าความต้านทานของโพเทนซีโอเมเตอร์ (Resistance value of the potentiometer) และส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์แสดงผลพีซี ในส่วนที่สาม สัญญาณที่ผ่านการขยายตามค่าความต้านทานจะถูกส่งเข้ามาที่ส่วนที่สามซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายของระบบไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ชนิด KY-037 ซึ่งในส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อความสะดวกและเหมาะสมในการแสดงผลสำหรับหน้าจอดิจิทัล (LCD digital display) แต่หากเซ็นเซอร์รับสัญญาณที่มีค่าความถี่ต่ำก็จะสามารถปรับหมุนโพเทนซีโอเมเตอร์ให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับวงจรและเหมาะสมในการเขียนโค้ดคำสั่งสำหรับ Arduino board ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนไหวหรือการเต้นของหัวใจเป็นเสียงที่เบามาก ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยินหรือมีความยากต่อการได้ยิน ดังนั้น ไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ชนิด KY-037 จึงถือเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณทางกายภาพที่สำคัญนอกจากจะมีความปลอดภัยแล้วยังสามารถทำการวินิจฉัยความผิดปกติได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

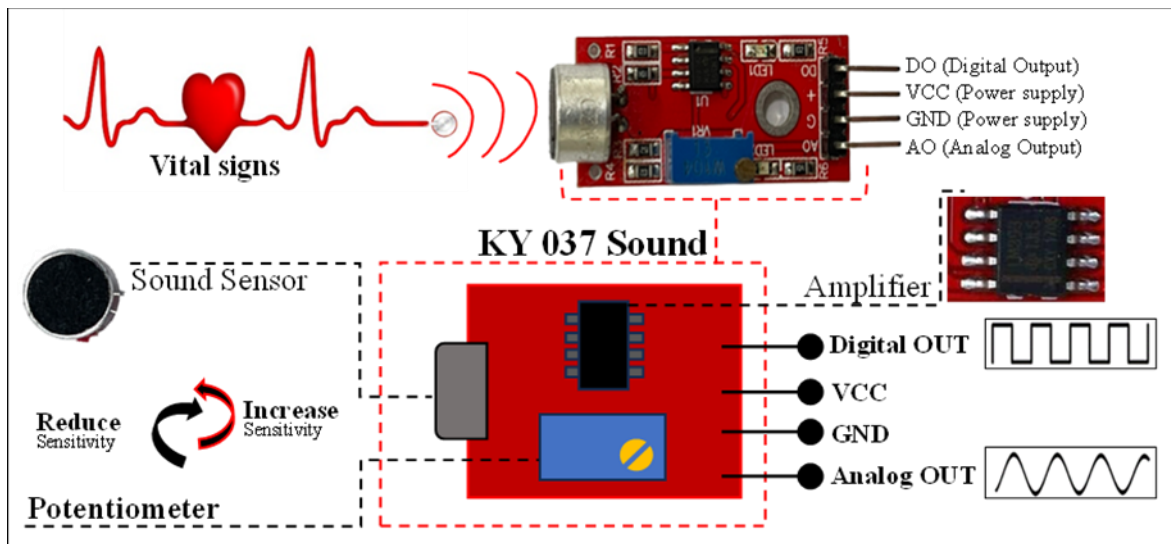


Figure 1 Detecting device for vital signs

ส่วนที่ 2 แผนภาพวงจรควบคุมการทำงานและวงจรประมวลผลเริ่มต้น

แผนภาพวงจรควบคุมการทำงานประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าสองส่วนที่สำคัญ คือ วงจรพรีแอมพลิไฟเออร์ (Pre-amplifier) และวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth filter) ดังแสดงในภาพที่ 2 ได้รับการพัฒนาและออกแบบให้ทำงานร่วมกัน สำหรับวงจรพรีแอมพลิไฟเออร์เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณกายภาพที่มีความถี่ต่ำยากต่อการได้ยินซึ่งมีความเข้มของสัญญาณต่ำที่ได้รับจากไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ชนิด KY-037 ให้เป็นสัญญาณที่แข็งแกร่งหรือมีความถี่สูงขึ้น ในวงจรนี้ใช้ไอซีออปแอมป์ (IC op-amp) ชนิด NE5532

ใช้อัตราขยายประมาณ 100 เท่า (หรือ 40 dB) ในสภาวะการทำงานปกติ นั้นหมายความว่าหากคุณใส่สัญญาณขาเข้า 1 mV (millivolt) เข้าไปที่อุปกรณ์ NE5532 จะได้สัญญาณเอาต์พุตประมาณ 100 mV (millivolt) โดยมีการขยายความสัมพันธ์ในช่วงความถี่ต่อเนื่องที่กว้าง ซึ่งอัตราการขยายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามโหลดและเงื่อนไขการทำงานของวงจร

สมการประกอบสำหรับอัตราการขยายทั้งหมดของ NE5532 ไม่ได้ถูกตั้งไว้เป็นสมการเดียวกัน เนื่องจากมันขึ้นอยู่กับโหลดและเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ อย่างไรก็ตามสมการประกอบที่ใช้คำนวณอัตราการขยายสามารถแสดงได้ดังนี้:

$$\text{อัตราขยาย} = A_v = \frac{V_{\text{เอาต์พุต}}}{V_{\text{ขาเข้า}}}$$

โดยที่:

A_v คือ อัตราการขยาย (Voltage Gain)

$V_{\text{เอาต์พุต}}$ คือ ค่าโวลต์เอาต์พุต (Output Voltage)

$V_{\text{ขาเข้า}}$ คือ ค่าโวลต์ขาเข้า (Input Voltage)

เพื่อขยายสัญญาณให้มีกำลังที่สูงขึ้นรวมถึงประมวลผลเพิ่มเติมก่อนส่งข้อมูลไปยังวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทซึ่งจะใช้ไอซีออปแอมป์ชนิด LM741 ทำหน้าที่กรองและลดระดับเสียงรบกวน

LM741 หน้าที่กรองและลดระดับเสียงรบกวนสามารถทำได้โดยการใช้งานวงจรออปแอมป์ในโหมดกรอง (filtering mode) โดยอัตราการกรองและช่วงความถี่ขึ้นอยู่กับวงจรที่ออกแบบขึ้นมาใช้งานร่วมกับ LM741 โดยทั่วไปอัตราการกรองของออปแอมป์แบบนี้สามารถแสดงในรูปแบบของค่ารับแอตตenuation (attenuation) ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการกรองของออปแอมป์นั้นมีหลายรูปแบบ แต่สมการที่ง่ายและได้ผลในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกรองและความถี่คือสมการของโพลีเตอร์ลอจิก (low-pass filter) ซึ่งสามารถแสดงได้เป็นสมการต่อไปนี้:

$$A(f) = \frac{1}{1 + \frac{f}{f_c}}$$

$A(f)$ คืออัตราการกรองที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ (f)

f_c คือความถี่ตัด (-3db)หรือช่วงความถี่ที่อนุพันธ์ลดลงไปที่ 70.7%ของสัญญาณ (cutoff frequency)

หลังจากนั้นสัญญาณที่ผ่านการขยายและกรองเพื่อลดระดับเสียงรบกวนแล้วจากการควบคุมของวงจรทั้งสองจะถูกส่งไปยังบอร์ดอาดูโน (Arduino Uno) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเป็นตัวเลขและตัวอักษรก่อนที่จะถูกแสดงบนหน้าจอ LCD และแอปพลิเคชันไลน์ต่อไป

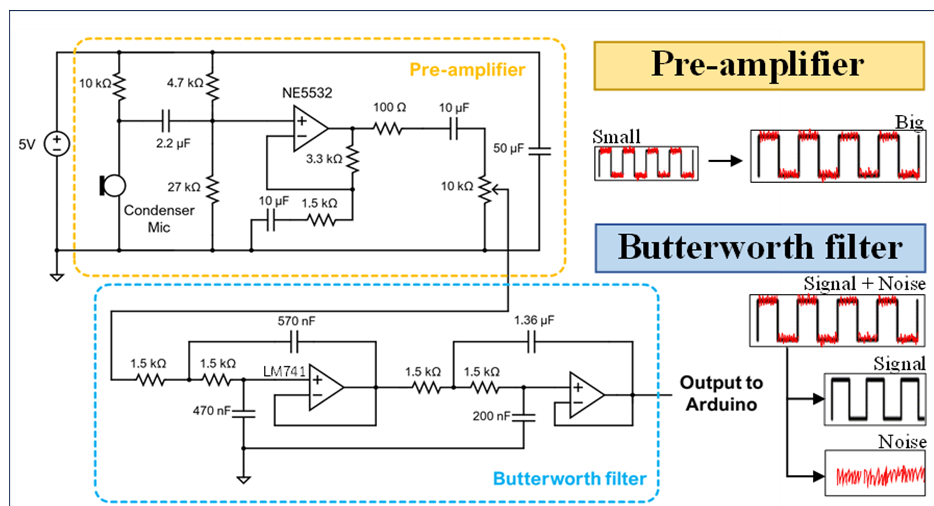


Figure 2 Pre-amplifier and Butterworth filter circuit

ส่วนที่ 3 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการเขียนโค้ดคำสั่งที่แสดงผลผ่านหน้าจอแบบเรียลไทม์

บอร์ดอาดูโน เป็นอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กที่เปรียบเสมือนระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น NodeMCU ESP8266 v2 อยู่ภายใน ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลหรือสัญญาณที่ได้รับมาจากวงจรควบคุมการทำงานและวงจรประมวลผลเริ่มต้นสัญญาณที่นำเข้ามาจะถูกส่งเข้าไปในอาดูโน (Arduino Uno R3) เพื่อเริ่มกระบวนการประมวลผล หนึ่งในจุดเด่นของบอร์ดอาดูโน คือความสามารถในการตอบรับสัญญาณได้ทั้งระบบสัญญาณอนาล็อกและระบบสัญญาณดิจิทัล แต่ในขณะที่คอมพิวเตอร์ไม่สามารถอ่านสัญญาณอนาล็อกได้ ดังนั้นหลังจากได้รับสัญญาณอนาล็อกจากขั้นตอนประมวลผลเริ่มต้น อาดูโนไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียนรหัสหรือคำสั่งสำหรับการประมวลผล ซึ่งแผนภาพการทำงานและการควบคุมการแสดงผลของสัญญาณชีพด้วยการเขียนคำสั่งให้อาดูโนไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงดังภาพที่ 3 โดยสัญญาณชีพที่รับเข้าซึ่งผ่านการกรองและใช้อัลกอริทึมในการตรวจจับแล้ว อุปกรณ์และระบบคำสั่งควบคุมจะบันทึกค่าสัญญาณชีพในทุก 30 วินาที (ตรวจจับค่าสัญญาณชีพ 20 ครั้งต่อรอบ) หากตรวจพบว่าอัตราการเต้นของหัวใจอยู่ในช่วง 70-110 ครั้งต่อนาที (Beats per minute; BPM) ซึ่งแปลผลได้เป็นอัตราการเต้นของหัวใจคนปกติ ระบบคำสั่งการจะส่งผลไปที่จอแสดงผล LCD นอกจากจะแสดงผลเป็นตัวเลขของอัตราการเต้นของหัวใจแล้วยังมีข้อความกำกับสถานะว่า “ปกติ (Normal)” อีกด้วย แต่หากตรวจพบว่าสัญญาณชีพอยู่นอกเหนือจากช่วงดังกล่าว การเต้นของหัวใจอาจช้ากว่า 70 ครั้งต่อนาที หรือเร็วกว่า 110 ครั้งต่อนาที คำสั่งการจะทำการตรวจซ้ำจนครบ 20 รอบ หากยังคงแสดงผลน้อยกว่าหรือมากกว่าอัตราการเต้นของหัวใจของคนปกติอยู่ คำสั่งการจะสั่งให้จอ LCD แสดงผลตัวเลขที่ตรวจจับได้และข้อความที่บ่งบอกว่า “ผิดปกติ (Abnormal)” นอกจากนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ยังสามารถส่งสัญญาณบลูทูธเชื่อมต่อไปยังส่วนคำสั่งการและการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันไลน์ได้อีกด้วย

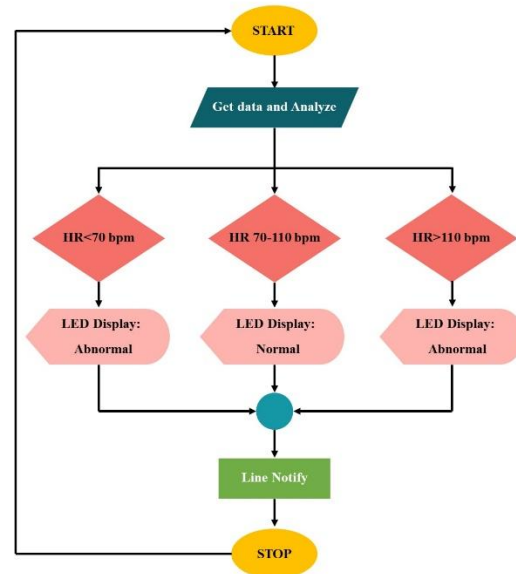


Figure 3 Real-time coding of commands to the LCD screen

ส่วนที่ 4 คำสั่งการและแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันไลน์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น NodeMCU ESP8266 ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า WiFi Controller คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ที่คล้ายกับบอร์ดอาดูโนรุ่นเดิม เพราะจะมีลักษณะการเขียนโค้ดคำสั่งภาษา C คล้ายกัน และสามารถควบคุมการทำงานด้วยการใช้โปรแกรม Arduino IDE ได้เหมือนกับบอร์ดอาดูโนรุ่นเดิม แต่ตัว NodeMCU (โหนด เอ็มซียู) จะมีความพิเศษกว่าเนื่องจากสามารถเชื่อมต่อ WiFi ได้ เพราะภายในบอร์ดชนิด NodeMCU จะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด ESP8266 อยู่ในตัวบอร์ดและแพลตฟอร์ม ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด ESP8266 จะทำหน้าที่เชื่อมต่อ WiFi หลังจากนั้นทำการเปิด Notify-Bot Line เป็นการเปิดการใช้งานสำหรับผู้พัฒนาระบบใหม่ (Access Token) เพื่อระบุและสร้างกลุ่มในการแจ้งเตือนสัญญาณชีพที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือที่ออกแบบ จากนั้นทำการคัดลอก Token code แล้วนำไปเขียนไว้ที่ Library สำหรับโปรแกรม Arduino IDE เมื่อทำการยืนยันคำสั่งแล้ว สัญญาณชีพและข้อความที่วัดได้จากเครื่องต้นแบบวัดอัตราการเต้นของหัวใจ จะถูกส่งไปที่แอปพลิเคชันไลน์แบบ Real-time ดังภาพที่ 4

แผนภาพการออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบตรวจจับอัตราการเต้นของหัวใจแสดงในภาพที่ 5 ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกายภาพหรือสัญญาณชีพ แผนภาพวงจรควบคุมการทำงานและวงจรประมวลผลเริ่มต้นไมโครคอนโทรลเลอร์และการเขียนโค้ดคำสั่งที่แสดงผลผ่านหน้าจอแบบเรียลไทม์



Figure 4 Coding instructions with LINE application display

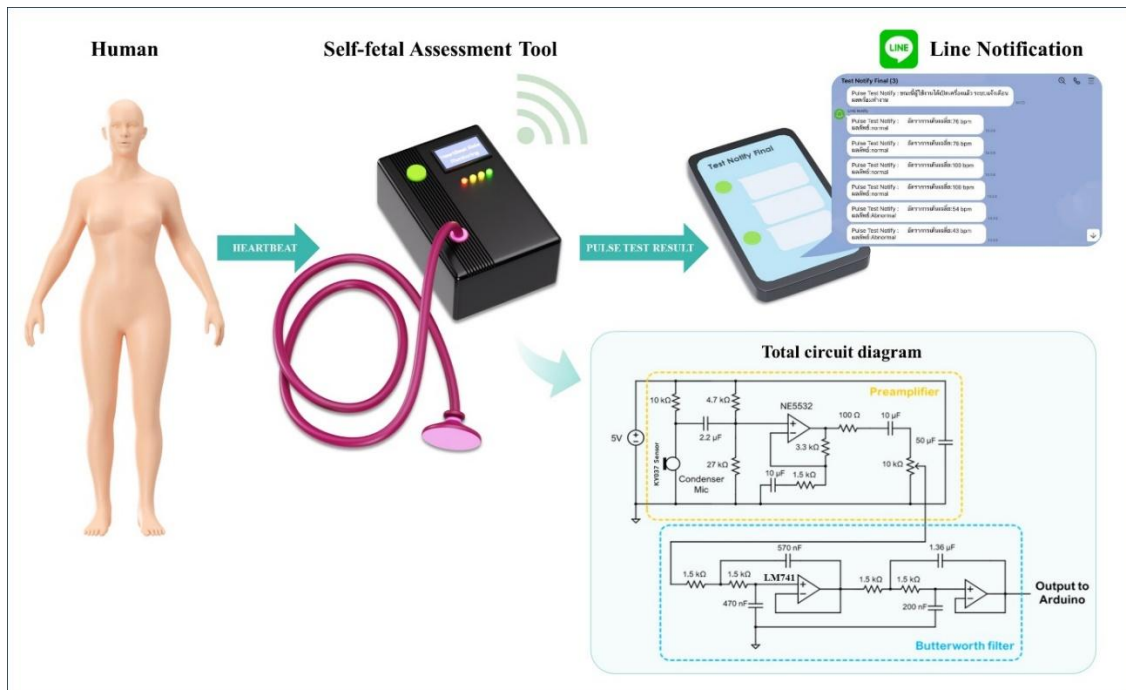


Figure 5 Electrical circuit design of heart rate detected system

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดลองเรื่องนี้ เป็นกลุ่มของประชากรที่อายุอยู่ในช่วง 20-45 ปี เนื่องจากอัตราการเต้นของหัวใจของประชากรกลุ่มตัวอย่างดังกล่าวสามารถตรวจสอบได้ง่ายกว่าทารกในครรภ์เพศหญิงและชาย ในจำนวนที่เท่ากัน โดยทดสอบโดยใช้ condition เดียวกัน ที่ เปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบ โดยการควบคุมในเรื่องความชื้น อุณหภูมิ แสงสว่าง รวมถึงการสัมผัสอื่นด้วย เราใช้กลุ่มตัวอย่างที่ศึกษาจำนวน 20 ราย การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบตรวจจับอัตราการเต้นของหัวใจที่สร้างขึ้นดังกล่าว จะนำมาทำการทดสอบวัดค่าอัตราการเต้นหัวใจเทียบกับเครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจ

ที่นำเข้าตามมาตรฐานอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยทำการบันทึกค่าอัตราการเต้นของหัวใจโดยการทำซ้ำทั้งหมด 20 ครั้งต่อรอบ ซึ่งควบคุมและจำกัดเวลาการบันทึกค่าทุก ๆ 30 วินาที หลังจากนั้นสรุปผลการวัดเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการเต้นหัวใจดังแสดงในภาพที่ 6 จากผลการทดสอบจะเห็นว่า อัตราการเต้นของหัวใจที่ได้จากการตรวจจับผ่านเครื่องต้นแบบจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจจับผ่านเครื่องมือนำเข้าทางการแพทย์ ซึ่งหลังจากทดสอบเสร็จสิ้นพบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการเต้นของหัวใจมีความแตกต่างกันสูงถึง 19.4 (เทียบจากค่าเฉลี่ยของการเต้นของหัวใจที่ได้จากการตรวจจับผ่านเครื่องมือนำเข้าทางการแพทย์) ซึ่งคิดเป็นค่าความผิดพลาดของการออกแบบสูงถึง 23.63 เปอร์เซ็นต์

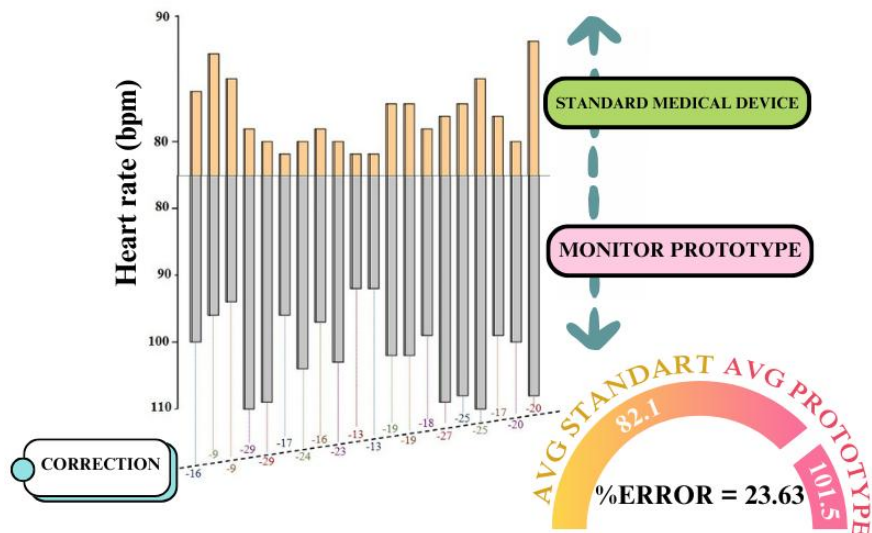


Figure 5 Electrical circuit design of heart rate detected system

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในครั้งแรกบ่งบอกถึงความผิดพลาดในการออกแบบเครื่องมือ เพื่อแก้ไขความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจึงทำการนำค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ผิดพลาด (จากภาพที่ 6) ที่มีค่าเท่ากับ 19.4 หรือค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 23.63 เปอร์เซ็นต์ เข้าไปปรับค่าในโค้ดคำสั่งการ หลังจากแก้รหัสและแก้โค้ดคำสั่งการแล้ว ทำการวัดค่าอัตราการเต้นของหัวใจอีกครั้ง ซึ่งทำการวัดซ้ำทั้งหมด 20 ครั้งต่อรอบ และควบคุมการบันทึกค่าทุก ๆ 30 วินาที โดยทำการทดสอบจำนวน 3 รอบ ดังตารางที่ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลหลังผ่านการแก้ไขและปรับเปลี่ยนโค้ดจะมีค่าลดลง เท่ากับ 1.65, 1.25 และ 1.35 คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.42 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 98.38 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Mooney *et al.* (1995) ที่มีการปรับค่าอัลกอริทึมในบางจุด พบว่า มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 85 เปอร์เซ็นต์ และงานวิจัยของ Azad (2000) ที่ใช้แนวความคิดในการแก้ปัญหาแบบ Fuzzy approach ซึ่งมีหลักการคือการปรับค่าภายใต้การไม่แน่นอน โดยเรียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ เพื่อให้ลดค่าการคลาดเคลื่อนของงานวิจัย ผลปรากฏว่ามีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 89 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งงานวิจัยของ Pieri *et al.* (2001) ที่ใช้ตัวกรอง (Matched filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่อาจจะส่งผลกระทบได้ ซึ่งทำให้ค่าความ

แม่นยำมีค่าอยู่ที่ 65 เปอร์เซ็นต์ ตลอดงานวิจัยของ Ibrahimy *et al.* (2003) ที่ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อลดค่าการคลาดเคลื่อนของงานวิจัย พบว่า ทำให้มีความแม่นยำอยู่ที่ 89 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่า งานวิจัยนี้ มีการปรับเปลี่ยนโค้ดคำสั่ง โดยใช้ 2 หลักการร่วมกัน คือการใช้การปรับค่าอัลกอริทึมในบางจุด และใช้ตัวกรองเพื่อลดสัญญาณรบกวน จึงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น มีค่าความแม่นยำที่มากกว่าการจัดการโค้ดคำสั่งเพียงเทคนิคเดียว นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นกับการสอบเทียบเครื่องมือทางการแพทย์ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบเครื่องมือทางการแพทย์ควรมีค่าต่ำกว่า 3-5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอ้างอิงจากการสอบเทียบเครื่องมือทางการแพทย์โดยใช้มาตรฐาน ISO/IEC 17025 (DigitalMultimeters, 2015) จึงจะถือเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและตรงตามมาตรฐานทางการแพทย์ ซึ่งจากผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 1.70 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ผลการทดลองข้างต้น เป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพสูงของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น และมีแนวโน้มในการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ได้

Table 1 Vital signs measured by standard medical device and heart rate monitor prototype (After calibration and adjustment in Arduino)

After calibration and adjustment in Arduino									
30 Sec/time	1st test			2nd test			3rd test		
	Standard device	Prototype	Correction	Standard device	Prototype	Correction	Standard device	Prototype	Correction
1	88	85	3	89	83	6	84	85	-1
2	86	79	7	82	86	-4	82	86	-4
3	84	86	-2	83	84	-1	83	85	-2
4	84	84	0	84	85	-1	84	88	-4
5	83	82	1	85	84	1	85	85	0
6	80	84	-4	84	76	8	85	82	3
7	79	82	-3	82	74	8	88	88	0
8	80	86	-6	81	80	1	90	83	7
9	81	86	-5	82	79	3	87	81	6
10	82	79	3	82	80	2	84	86	-2
11	83	81	2	84	84	0	83	83	0
12	83	89	-6	83	82	1	81	78	3
13	84	84	0	79	77	2	80	81	-1
14	83	82	1	76	88	-12	89	86	3
15	85	89	-4	81	87	-6	80	84	-4
16	86	88	-2	82	88	-6	75	85	-10
17	85	86	-1	81	87	-6	87	85	2
18	85	87	-2	79	90	-11	78	92	-14
19	92	96	-4	80	89	-9	80	88	-8
20	84	95	-11	83	84	-1	85	86	-1
Average	83.85	85.5	-1.65	82.1	83.35	-1.25	83.5	84.85	-1.35
%Error		1.97			1.52			1.62	

ผลการออกแบบ วิวัฒนาการ และการพัฒนาเครื่องต้นแบบ ตรวจจับอัตราการเต้นของหัวใจ ตั้งแต่รุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 2 แสดงดังภาพที่ 7 จะเห็นว่าเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะมีขนาดเล็กลงจากรุ่นแรก เกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของเครื่องต้นแบบรุ่นที่ 2 มีขนาดเล็กใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับเครื่องตรวจจับอัตราการเต้นของหัวใจหรือชีพจรของทารก ตามมาตรฐานของเครื่องมือนำเข้าในโรงพยาบาล การออกแบบเครื่องมือให้มีขนาดเล็กลงดังกล่าว ทำให้ง่ายและสะดวกต่อการพกพา แถมยังเป็นจุดเด่นในการใช้สำหรับพัฒนาต่อในเชิงพาณิชย์

นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณต้นทุนที่ใช้ในการสร้างเครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจที่พัฒนาขึ้น พบว่า มีราคา

ต้นทุนอยู่ที่ 810 บาท ซึ่งต่างจากราคาของเครื่องมาตรฐานทางการแพทย์ที่มีมูลค่าสูงถึง 20,000-25,000 บาท จึงเห็นได้ว่าต้นทุนของระบบที่นำเสนอนี้มีราคาถูกลง 96 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ แสดงดังภาพที่ 8 จะเห็นว่าเครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเป็นเครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจทารกในครรภ์ สำหรับใช้ในบ้านได้ นอกจากจะเป็นการลดอัตราการเสียชีวิตของทารกในครรภ์แล้ว ยังมีต้นทุนที่ถูกลงกว่าเครื่องมือนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งทำให้เพิ่มความสะดวกในการใช้งานและเพิ่มความน่าจะเป็นในการขยายนวัตกรรมเครื่องต้นแบบไปสู่การผลิตเพื่อการค้าหรือขยายผลสู่การผลิตเชิงพาณิชย์อีกด้วย

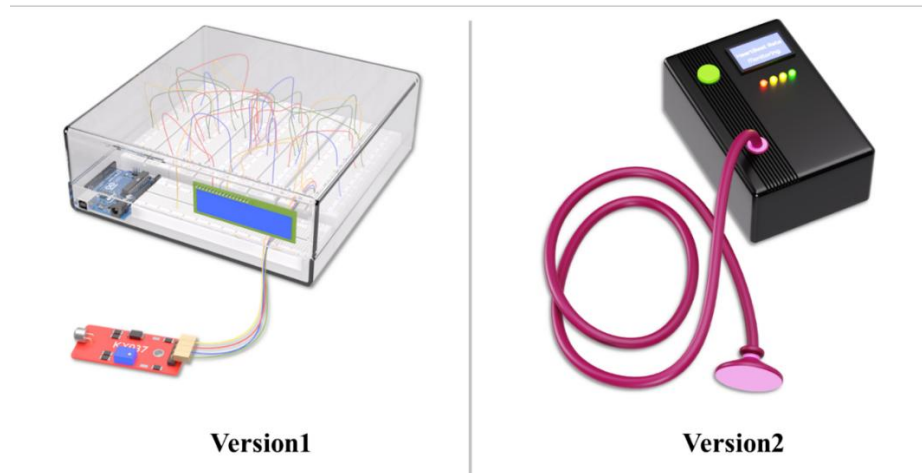


Figure 7 Development of a heart rate prototype detector from 1st generation to 2nd generation



Figure 8 Cost of heart rate monitor prototype compared with medical standard device

4. สรุป

การพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับวัดอัตราการเต้นของหัวใจนำไปสู่การขยายผลเพื่อสร้างเครื่องวัดอัตราการเต้นของหัวใจทารกในครรภ์แบบพกพาได้ ซึ่งเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนานี้ นอกจากจะช่วยให้สามารถตรวจจับสัญญาณชีพของทารกได้อย่างรวดเร็ว ยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีราคาแพง และเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงซึ่งการใช้เครื่องมือทางการแพทย์ได้ง่ายขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องต้นแบบวัดอัตราการเต้นของหัวใจกับเครื่องตรวจฟังอัตราการเต้นของหัวใจตามมาตรฐานทางการแพทย์ พบความผิดพลาดของอุปกรณ์โดยเฉลี่ยเพียง 1.70% ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานในการสอบเทียบเครื่องมือทางการแพทย์ที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบันโดยที่การสอบเทียบเครื่องมือทางการแพทย์ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่ากันระหว่างสอง เครื่องมือวัด โดยเครื่องมือที่ต้องการสอบเทียบจะถูกเทียบกับเครื่องมือทางวิศวกรรม

ที่มีความละเอียดแม่นยำสูง ตรวจสอบอุปกรณ์ข้างดวงวัดเหล่านั้นว่ามีความถูกต้องหรือไม่ โดยจำเป็นต้องสามารถสอบกลับไปสู่ค่าอ้างอิงมาตรฐานได้ ดำเนินการสอบเทียบโดยใช้วิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐาน โดยจะมีการวัดการสอบเทียบและบันทึกผลลัพธ์จากเครื่องมือวัดที่เป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับสอบเทียบโดยเฉพาะ (Calibrator) นำมาเปรียบเทียบกับ (DigitalMultimeters, 2015)

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเครื่องต้นแบบวัดอัตราการเต้นของหัวใจที่ออกแบบมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่องมือแพทย์มาตรฐานที่นำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้ต้นทุนการสร้างเครื่องต้นแบบยังมีราคาถูกกว่าเครื่องมือที่นำเข้าจากต่างประเทศถึง 96% จากการออกแบบและทดสอบดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้และสามารถนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถพัฒนาเป็นเครื่องวัดอัตราการเต้นของหัวใจทารกในครรภ์แบบพกพาในเชิงพาณิชย์ด้วยการเพิ่มเทคโนโลยีการรายงานผลผ่านแอปพลิเคชันไลน์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางการเงินจาก กองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสุรนารี รวมถึงศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีววิทยาศาสตร์ ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ช่วยอำนวยความสะดวก ในการพัฒนางานวิจัยบางส่วนที่เกิดผลสัมฤทธิ์ในการ ทดลองนี้

6. เอกสารอ้างอิง

Azad, K.A.K. 2000. Fetal QRS complex detection from abdominal ECG: a fuzzy approach, pp. 275-278. *In Proceedings of Institute of Electrical and Electronics Engineers Nordic Signal Processing Symposium*. Kolmarden, Sweden.

Chaemsaitong, P. and Raungrongmorakot, K. 2005. Intrapartum Fetal Monitoring (Intrapartum Fetal Monitoring). *Journal of Medicine and Health Sciences* 12(2): 42-58. (in Thai)

Chatchawet, W. 2019. **Maternal Newborn Nursing and Midwifery 2**. Faculty of Nursing, Prince of Songkla University. (in Thai)

Chen, H.Y., Chauhan, S.P., Ananth, C.V., Vintzileos, A.M. and Abuhamad, A.Z. 2011. Electronic fetal heart rate monitoring and its relationship to neonatal and infant mortality in the United States. *American Journal of Obstetrics and Gynecology* 204(6): 491.e1-e10.

DigitalMultimeters. 2015. **Guidelins on the calibration of Digital Multimeters**. Available Source: <https://www.nimt.or.th/main/>, April 10, 2024.

Ibrahimy, M.I., Ahmed, F., Ali, M.A.M. and Zahedi, E. 2003. Real-time signal processing for fetal heart rate monitoring. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Biomedical Engineering* 50: 258-261.

Kamalifard, M., Abbasalizadeh, S., Ghofazadeh, M., Ghatreh Samani, F. and Rabiei, L. 2013. Diagnostic value of fetal movement counting by mother and the optimal recording duration. *Journal of Caring Sciences* 2(2): 89-95.

Kasisopha, N., Vorakulpipat, C. and Rattanalerdnusorn, E. 2020. **Thai Patent No. 1703001486**.

Department of Intellectual Property, Ministry of Commerce, Bangkok. (in Thai)

Komwilaisak, R. 2022. Antepartum Fetal Surveillance. Academic conference the royal thai college of obstetricians and gynaecologists Bangkok, pp. 102-111. *In Royal Thai College of Obstetricians and Gynaecologists. CHECK before CHAT in OB-GYN 2018*. Royal Thai College of Obstetricians and Gynaecologists. (in Thai)

Mooney, D.M., Grooome, L.J., Bentz, L.S. 1995. Computer algorithm for adaptive extraction of fetal cardiac electrical signal, pp. 113-117. *In Proceedings of the 1995 ACM Symposium on Applied Computing*. Nashville, Tennessee, USA.

Phoodaangau, B. 2014. Nurse's Role to Enhance Self Care of Pregnant Women to Count and Record Fetal Movement. *Journal of Nursing Science and Health* 37(1): 135-146. (in Thai)

Piéri, J.F., Crowe, J.A., Hayes-Gill, B.R., Spencer, C.J., Bhogal, K. and James, D.K. 2001. Compact long-term recorder for the transabdominal foetal and maternal electrocardiogram. *Medical & Biological Engineering & Computing* 39: 118-125.

Rakphongsiri, K., Rakphongsiri, P. and Photham, J. 2016. **Thai Patent No. 1603000137**. Department of Intellectual Property, Ministry of Commerce, Bangkok. (in Thai)

Rungaroon, P. and Chandee, W. 2021. Importance of fetal movement counting for instructors in the Bachelor of Nursing Science program. *Journal of Nursing Science, College of Nursing, Christian University of Thailand* 8(1): 93-94.

Ryo, E., Kamata, H., Seto, M., Morita, M., Nagaya, Y., Nishihara, K. and Ohki, N. 2018. Reference values for a fetal movement acceleration measurement recorder to count fetal movements. *Pediatric Research* 83(5): 961-968.

Saastad, E., Winje, B.A., Stray Pedersen, B. and Froen, J.F. 2011. Fetal movement counting improved identification of fetal growth restriction and

- perinatal outcomes—a multi-centre, randomized, controlled trial. **PLoS One** 6(12): e28482.
- Sameni, R. and Clifford, G.D. 2010. A Review of Fetal ECG Signal Processing; Issues and Promising Directions. **The Open Pacing, Electrophysiology & Therapy Journal** 3: 4-20.
- Shabry, N.A.N.B.M., Singh, O., Sardana, P., Hisham, R.B. and Balakrishnan, M. 2017. Home based fetal heart rate monitor. **International Journal of Applied Engineering Research** 12(6): 813-817.
- Sinthanayothin, C., Phonlasit, W. and Wongwaen, N. 2013. **Thai Patent No. 1203001314.** Department of Intellectual Property, Ministry of Commerce, Bangkok. (in Thai)
- Tangwiwat, P. 2022. Fetal movement count in: Antenatal care manual for public health personnel, pp. 58. *In* Tangwiwat, P., eds. **Antenatal Care guide for public health personnel.** Department of Health, Ministry of Public Health. (in Thai)
- Thomas, T.K. and Chin, C.S. 2014. Prototype development of a home-based heart rate monitoring system using virtual instrumentation platform, pp. 381-386. *In* **2014 Institute of Electrical and Electronics Engineers Region 10 Symposium.** Kuala Lumpur, Malaysia.
- Yaisoon, S. 2015. The necessity of fetal movement count: nursing roles. **Thai Red Cross Nursing Journal** 8(1): 1-9. (in Thai)
- Yimman, S., Rattanasunthon, R., Detyu, S., Saengpitak, W., Chaengmanee, A. and Saengthong, P. 2022. **Thai Patent No. 2003000869.** Department of Intellectual Property, Ministry of Commerce, Bangkok. (in Thai)
- Yuvaraj, T., Bindushri, Chandana, G.S., Shetty, D. and Sanil, H. 2021. Development of Prototype Heart Pulse Rate Monitoring System. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management** 4(7): 172-174.



Research Article

สถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์

Architecture for Cloud-based Advanced Application Development Tools of Container Platform

อรนุช พันโท รสลิน เพตะกร * ภาณุวัฒน์ สุวรรณกุล และ กาญจนา ขัตติหะจักร์

Oranuch Pantho, Roselin Petagon *, Panuwat Suwannakul and Kanchana Khatthachak

ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Computer Department, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Muang, Chiang Mai 50300, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-07-10

Revised: 2024-04-03

Accepted: 2024-05-07

Keywords:

tools;

containers;

advanced applications;

tool architecture;

cloud computing

Containers are an ideal tool for developing and deploying software. Organizations can leverage container architecture to enhance software development processes and more efficiently deliver high-performance applications. This research aims to 1) develop an architecture for advanced cloud-based application development using container platforms and 2) investigate user satisfaction with the developed architecture. The tools employed in this study include the architecture for cloud-based advanced application development using container platforms and satisfaction surveys regarding this architecture. The sample group was chosen through a specific purposive sampling technique and divided into two categories. The first category consisted of expert samples, including five computer science professors who specialize in the review of architectural tool design and development. The second category included 77 computer science students who were enrolled in Advanced Application Development course during the second and third academic years of 2022 at the Faculty of Science and Technology, Rajabhat Chiang Mai University. The analyzed data was collected using descriptive statistics, which included frequency, percentage, mean, and standard deviation.

The study results comprise two parts: 1) the architecture for advanced cloud-based application development using container platforms, which identifies three user groups within the system: administrators, system users (students), and instructors; and 2) the findings on student satisfaction with the cloud-based application development architecture using container platforms for cloud processing. The satisfaction level was high, with an average score of 4.37 and a standard deviation of 0.72.

* Corresponding author.

E-mail address: roselin@cmru.ac.th

Cite this article as:

Pantho, O., Petagon, R., Suwannakul, P. and Khatthachak, K. 2025. Architecture for Cloud-based Advanced Application Development Tools of Container Platform. *Recent Science and Technology* 17(2): 259694.

บทคัดย่อ

คอนเทนเนอร์เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาและปรับใช้ซอฟต์แวร์ องค์กรต่าง ๆ สามารถใช้ประโยชน์จากสถาปัตยกรรมคอนเทนเนอร์เพื่อปรับปรุงกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์และส่งมอบแอปพลิเคชันที่มีความสามารถสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ 1) พัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ และ 2) ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานสถาปัตยกรรมที่พัฒนาขึ้น เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ สถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์และแบบสอบถามความพึงพอใจต่อสถาปัตยกรรมนี้ กลุ่มตัวอย่างเลือกโดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มตัวอย่างผู้เชี่ยวชาญ คืออาจารย์ที่เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือ จำนวน 5 คน และ กลุ่มตัวอย่างคือ นักศึกษาภาควิชาคอมพิวเตอร์ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูง ในภาคเรียนที่ 2-3 ปีการศึกษา 2565 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ จำนวน 77 คน การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ สถิติพื้นฐาน (ความถี่ ร้อยละ) ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการศึกษาค้นนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) สถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์โดยสถาปัตยกรรมมีผู้ใช้ระบบจำนวน 3 กลุ่มคือ ผู้ดูแลระบบ ผู้ใช้งานระบบ (ผู้เรียน) และผู้สอน และ 2) ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนต่อสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์โดยใช้คอนเทนเนอร์ของการประมวลผลคลาวด์ โดยผลการศึกษาความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยคือ 4.37 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 0.72

คำสำคัญ: เครื่องมือ, คอนเทนเนอร์, แอปพลิเคชันขั้นสูง, สถาปัตยกรรมเครื่องมือ, การประมวลผลคลาวด์

1. บทนำ

คลาวด์หรือบางครั้งเรียกว่า การประมวลผลคลาวด์ (Cloud Computing) เป็นบริการระบบที่เป็นตัวกลางเพื่อให้ผู้ใช้ได้ใช้งานบริการต่าง ๆ ผ่านอินเทอร์เน็ต ในปัจจุบันนี้มีผู้ให้บริการคลาวด์ที่ให้เข้าใช้บริการต่าง ๆ บนคลาวด์หลายราย เช่น AWS (Amazon Inc., 2023), Google Cloud Platform (Google Inc., 2023), Azure (Microsoft, 2023) เป็นต้น ซึ่งการใช้บริการเหล่านี้จะต้องมีการเช่าทรัพยากรจากผู้ให้บริการอาจจะมีค่าใช้จ่ายสูงคิดค่าบริการต่อการใช้งานตามเซิร์ฟเวอร์ที่ผู้ใช้บริการทำการเปิดใช้งาน หากองค์กรนั้น ๆ ไม่สามารถเลือกเช่าทรัพยากรจากผู้ให้บริการได้ตรงกับความต้องการ ทำให้องค์กรอาจใช้ทรัพยากรเกินความจำเป็นได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเช่าใช้บริการ Charoenphuthiwat and Buranasaksee (2023) จึงเสนอวิธีการพัฒนาเครื่องมือสร้างแบบจำลองบนแพลตฟอร์มคูเบอร์เนตส์ (Kubernetes) เพื่อช่วยให้องค์กรสามารถเลือกใช้ทรัพยากรที่เหมาะสมที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานตามขอบเขตทรัพยากรที่คุ้มค่าที่สุดสำหรับแอปพลิเคชันให้สอดคล้องกับงบประมาณที่มีอยู่

ด็อกเกอร์ (Docker Inc., 2023) เป็นเครื่องมือที่เป็นที่รู้จักและเรียบง่ายที่สุดสำหรับการสร้างและใช้งานคอนเทนเนอร์ ช่วยให้สามารถพัฒนา ทดสอบบริการ และการตั้งค่าต่าง ๆ ได้อย่างราบรื่น ซึ่งคอนเทนเนอร์เป็นหน่วยน้ำหนักเบาและพกพาได้ง่าย ซึ่งใช้ในการรวมแอปพลิเคชันเข้ากับการตั้งค่าและไลบรารีทั้งหมด โดยให้ความสอดคล้องและความยืดหยุ่นบนแพลตฟอร์มที่

หลากหลาย คอนเทนเนอร์จึงเป็นเครื่องมือสำหรับการพัฒนาสถาปัตยกรรมไมโครเซอร์วิส เนื่องจากมีกรอบการทำงานที่สามารถแยกบริการต่าง ๆ ได้ โดยแต่ละบริการมีฟังก์ชันการทำงานของตัวเอง ในขณะที่ยังคงมีการประสานงานอย่างเหมาะสม รวมทั้งช่วยในการย้ายแอปพลิเคชันและการปรับปรุงรุ่นแอปพลิเคชันได้สะดวก รวดเร็ว เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาสถาปัตยกรรมไมโครเซอร์วิส เช่น ด็อกเกอร์ และ คูเบอร์เนตส์

การศึกษาในปัจจุบันจะเน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ โดยให้ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติด้วยตนเอง แสวงหาความรู้จากแหล่งเรียนรู้และวิธีการเรียนรู้ที่หลากหลายในการพัฒนาแอปพลิเคชันต้องทำการติดตั้งซอฟต์แวร์ในเครื่องคอมพิวเตอร์ตนเอง การติดตั้งซอฟต์แวร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการพัฒนาสำหรับแอปพลิเคชันขั้นสูงนั้นต้องคำนึงถึงเครื่องมือที่ใช้พัฒนา สภาพแวดล้อมทางด้านฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งสำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูง ซึ่งต้องมีความชำนาญพอสมควรในการติดตั้งสภาพแวดล้อมสำหรับการพัฒนา ในบางครั้งการเริ่มต้นพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันขั้นสูงจุดเริ่มต้นคือการติดตั้งซอฟต์แวร์ที่เหมาะสมในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะใช้พัฒนา เมื่อไม่สามารถติดตั้งเครื่องมือที่หลากหลายเหล่านั้นได้สำเร็จก็ไม่สามารถเริ่มต้นพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงได้เช่นเดียวกัน ในปัจจุบันมีการจัดการเรียนการสอนแบบเอ็มเลิร์นนิ่งด้วยเทคโนโลยีการคำนวณแบบคลาวด์ (Laisema, 2018) เป็นการจัดการเรียนโดยให้ผู้เรียนเรียนรู้ได้ทุกที่ผ่านอุปกรณ์พกพาที่มีการเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่าย โดยการเรียนรู้การเขียนโปรแกรมภาษาต่าง ๆ

ในปัจจุบันมีเครื่องมือที่สามารถใช้เขียนโปรแกรมภาษาต่าง ๆ ได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ของผู้ให้บริการที่เป็นที่นิยมคือ เวอร์ชวลสตูดิโอโค้ด (Visual Studio Code) ผ่านเว็บ (Microsoft Inc., 2023) ในการใช้งานผ่านเบราว์เซอร์เทอร์มินัลจะไม่พร้อมให้ใช้งานในตัวแก้ไขเว็บ แต่ถ้าต้องการใช้งานเทอร์มินัลให้ใช้งานผ่าน Codespace หรือ VS Code Desktop เท่านั้น และมีบริษัท Gitpod GmbH (2023) ที่ให้บริการสภาพแวดล้อมสำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันเช่นกันเปิดให้ใช้ฟรีเฉพาะฟังก์ชันการทำงานพื้นฐานหากต้องการฟังก์ชันการทำงานขั้นสูงก็มีการคิดค่าใช้จ่ายการใช้งานเป็นรายชั่วโมงต่อการพัฒนาแอปพลิเคชัน

การพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงเป็นรายวิชาที่จะเกี่ยวกับการออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นส่วนหน้าบ้าน (Front End) ที่สามารถทำงานได้นับอุปกรณ์ที่หลากหลายหน้าจอที่แตกต่างกันก็สามารถแสดงผลได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ส่วนหลังบ้าน (Back End) ที่ใช้ในการติดต่อและจัดการฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันซึ่งผู้เรียนจะต้องมีทรัพยากรมากพอสำหรับติดตั้งเครื่องมือสำหรับการพัฒนา และมีเวลาสำหรับฝึกปฏิบัติอย่างสม่ำเสมอ

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ที่มีความยืดหยุ่นโดยได้แบ่งปันทรัพยากรต่าง ๆ ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ให้ผู้ใช้งานสถาปัตยกรรมเครื่องมือผ่านเว็บเบราว์เซอร์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงซึ่งมีส่วนประกอบ 3 ส่วนสำหรับผู้เรียนคือส่วนที่เป็นขั้นตอนการติดตั้งและพัฒนาแอปพลิเคชันให้ผู้เรียนเรียนรู้ทีละขั้นตอนโดยการคลิกขั้นตอนต่าง ๆ ใน

ส่วนที่ 2 เครื่องมือจะทำงานตามขั้นตอนให้อัตโนมัติซึ่งคือเวอร์ชวลสตูดิโอโค้ดพร้อมทั้งเปิดใช้งานเทอร์มินัลให้ผ่านเบราว์เซอร์ และส่วนที่ 3 ส่วนเบราว์เซอร์ก็เก็กลิงก์และส่วนฐานข้อมูลโดยผู้เรียนได้คอนเทนเนอร์ที่สามารถเข้าถึงทรัพยากรในการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงทั้งส่วนหน้าบ้าน หลังบ้านและฐานข้อมูล ผู้สอนสามารถบริหารจัดการคอนเทนเนอร์โดยมีระบบจัดการเนื้อหาเพื่อช่วยสร้างเนื้อหาในการจัดการเรียนการสอนแบบปฏิบัติการให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้นอกห้องเรียนได้ด้วยตนเองซ้ำก็รอบก็ได้ด้วยตัวผู้เรียนเอง ผู้ดูแลระบบสามารถจัดการคอนเทนเนอร์ทั้งหมด สิ่งสำคัญคือผู้เรียนมีพื้นที่ในการเก็บโค้ดที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นประวัติการพัฒนาโค้ดสำหรับนำไปใช้ต่อยอดและใช้ในการสมัครงานต่อไปในอนาคตได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ และ 2) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานของสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวิธีการดำเนินการวิจัยดัง Figure 1 ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ กลุ่มเป้าหมาย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย การวิเคราะห์และสังเคราะห์แนวคิดสถาปัตยกรรมเครื่องมือ การออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือ และการวิเคราะห์ผล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



Figure 1 Research methods of the Architecture Tool

2.1 กลุ่มเป้าหมาย

ประชากร ได้แก่ อาจารย์และนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

กลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) (Wanichbancha, 2011) โดยเลือกศึกษาจากประชากรที่มีลักษณะตรงตามวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา เพื่อให้ได้บุคคลที่สามารถให้ข้อมูลตรงตามที่ต้องการ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

- กลุ่มตัวอย่างผู้เชี่ยวชาญ คืออาจารย์ที่เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือ จำนวน 5 คน
- กลุ่มตัวอย่าง คือนักศึกษาภาควิชาคอมพิวเตอร์ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชา การพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงในภาคเรียนที่ 2-3 ปีการศึกษา 2565 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ จำนวน 77 คน

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

- 1) สถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์
- 2) แบบสอบถามความพึงพอใจในความพึงพอใจต่อสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

2.3 การวิเคราะห์และสังเคราะห์กรอบแนวคิดสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎี บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวทางในการออกแบบสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ เกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีคอนเทนเนอร์ของการประมวลผลคลาวด์เพื่อให้การพัฒนาแอปพลิเคชันที่นำไปใช้จริงในองค์กรสามารถทำการติดตั้งและปรับขนาดของแอปพลิเคชันให้เหมาะสมกับ

ทุกสภาพแวดล้อม และพร้อมใช้งาน ทำให้ผู้ใช้งานแอปพลิเคชันสามารถเรียกใช้งานได้อย่างรวดเร็ว ช่วยให้สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน พร้อมทั้งยังสามารถส่งมอบแอปพลิเคชันที่ทันสมัยไปยังระบบคลาวด์ได้เร็วยิ่งขึ้น

2.4 การออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

การออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.4.1 การออกแบบสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์

การออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานเทคนิควงจรชีวิตการพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development Life Cycle: SDLC) (Gary and Harry, 2011) ซึ่งนำมาใช้ในการออกแบบยูสเคสโคอะแกรมของสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ ให้แสดงสถาปัตยกรรมที่มีผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้องในระบบจำนวน 3 ส่วนได้แก่ ผู้ดูแลระบบ ผู้ใช้งานระบบ (ผู้เรียน) และผู้สอน การออกแบบสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเน้นใช้เครื่องมือช่วยในการจัดการเรียนการสอนให้ลดความยุ่งยากในการติดตั้งเครื่องมือต่าง ๆ ในการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูง ซึ่งสถาปัตยกรรมนี้จะเป็นเครื่องมือให้ผู้สอนสามารถเตรียมเนื้อหาบทเรียนให้ผู้เรียนเพื่อสามารถเรียนตามลำดับขั้นตอนเพื่อให้เข้าใจง่าย พร้อมทั้งสามารถทบทวนเนื้อหาที่ได้เรียนรู้ด้วยตัวเองได้อีกด้วยสำหรับผู้ดูแลระบบสามารถค้นหาข้อมูลผู้ใช้ และจัดการผู้ใช้ และผู้ใช้งานระบบที่เป็นผู้เรียนสามารถเข้าไปเรียนรู้ได้พร้อม ๆ ผู้สอน และทบทวนเนื้อหาที่ได้เรียนรู้ด้วยตนเองได้ตลอดเวลาดังใน Figure 2

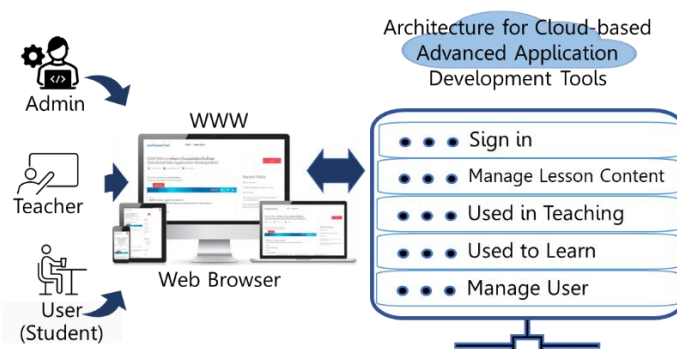


Figure 2 Concept of the Architecture Tool

การออกแบบสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ ทำให้ได้แนวทางในการออกแบบยูสเคสไดอะแกรม ดังใน Figure 3 ที่ประกอบไปด้วยผู้ดูแลระบบ (Admin) ผู้สอน (Teacher) และผู้ใช้งานหรือผู้เรียน (Student) โดยที่ผู้ดูแลระบบเข้าสู่ระบบเพื่อจัดการผู้สอน และผู้เรียน ในส่วนของผู้สอนเข้าสู่ระบบเพื่อเตรียมเนื้อหาในการสอนเป็นขั้นตอนสำหรับการฝึกปฏิบัติในห้องเรียนและผู้เรียนสามารถทบทวนได้หลังจากที่ได้ฝึกปฏิบัติในห้องเรียนเรียบร้อยแล้ว เมื่อเกิดปัญหาระหว่างที่ผู้เรียนฝึกปฏิบัติผู้สอนหรือผู้ดูแลระบบสามารถเข้าไปในคอนเทนเนอร์ของผู้เรียน ผู้สอนกับผู้เรียนจะได้หน้าตาเดียวกันแล้วช่วยแก้ปัญหาได้ทันที สำหรับผู้เรียนเมื่อสมัครเข้าใช้งานระบบ ระบบจะทำการสร้างคอนเทนเนอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเรียน ในรายวิชาการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูง ให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ได้ตามขั้นตอนที่มีให้จากผู้สอนได้สร้างขึ้น และผู้เรียนสามารถเรียนรู้เมื่อไหร่ก็ได้ตามความต้องการ

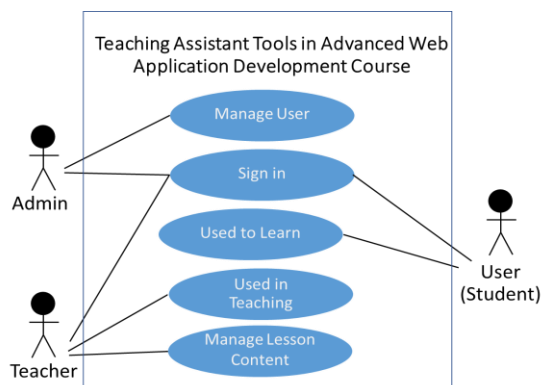


Figure 3 The Use Case Diagram of Teaching Assistant Tool Architecture

2.4.2 การพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

การพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นทำให้ผู้สอนสามารถใช้สถาปัตยกรรมเครื่องมือในรายวิชาการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูง ผู้เรียนสามารถใช้ระบบบนคอนเทนเนอร์ของผู้เรียนเองเพื่อใช้ในการเรียนสำหรับพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันโดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือต่าง ๆ ในการพัฒนา ระบบได้เตรียมสภาพแวดล้อมในการพัฒนาให้พร้อมสำหรับเริ่มพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน พร้อมทั้งสามารถเก็บโค้ดในการพัฒนาโปรแกรมไว้ในคอนเทนเนอร์ส่วนตัว และส่งลิงค์ผลลัพธ์ที่ได้พัฒนาให้กับผู้ใช้อื่นทดสอบระบบได้โดยไม่ต้องทำการเข้าสู่ระบบนั้นคือเหมือนเว็บแอปพลิเคชันถูกพัฒนาแล้วย้ายไปอยู่บนเครื่องให้บริการแม่ข่ายเรียบร้อยแล้ว และผู้สอนสามารถเตรียม

เนื้อหาบทเรียนให้กับผู้เรียนได้ พร้อมทั้งมีการประเมินประสิทธิภาพการพัฒนาระบบเพื่อให้สามารถใช้งานระบบได้ดียิ่งขึ้น ผู้ใช้ระบบสามารถใช้งานสถาปัตยกรรมเครื่องมือได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์บนอุปกรณ์เคลื่อนที่หรือบนเครื่องคอมพิวเตอร์ก็ได้ที่เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตผู้ใช้ก็สามารถเข้าใช้งานสถาปัตยกรรมเครื่องมือนี้ได้ ซึ่งเป็นการให้บริการด้านซอฟต์แวร์ (Software as a Service) ในรูปแบบหนึ่งของการประมวลผลคลาวด์ โดยผู้ใช้สามารถใช้งานได้พร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกันได้อีกด้วย (Mell and Grance, 2011)

สถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น มีการจัดการเนื้อหาด้วยภาษาพีเอชพี ภาษาจาวาใช้จัดการการลงทะเบียน มีการจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูล MySQL ด้วยโปรแกรม XAMPP และสร้างคอนเทนเนอร์สำหรับผู้ใช้งานหรือผู้เรียนด้วย Docker ที่สามารถจัดการได้ผ่าน NGINX ดังแสดงใน Figure 4 เป็นหน้าตาที่แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับรายวิชา มีรายละเอียดของเนื้อหาเบื้องต้นให้ผู้เรียนให้เป็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด และผู้เรียนสามารถกดปุ่มเข้าสู่บทเรียนเพื่อสมัครเข้าเรียนในระบบระบบจะทำการสร้างคอนเทนเนอร์ให้ผู้เรียนแต่ละคนเข้าในระบบจะปรากฏ ดังใน Figure 6 ซึ่งผลลัพธ์ในการพัฒนาสถาปัตยกรรมเครื่องมือประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ส่วนผู้ใช้งานระบบในฐานะผู้เรียนและผู้สอน ดังใน Figure 6 เมื่อระบบทำการสร้างคอนเทนเนอร์ให้เรียบร้อยแล้วผู้ใช้งานจะได้หน้าตาที่มีส่วนประกอบ 3 ส่วนคือซ้ายมือเป็นเมนูสำหรับขั้นตอนการเรียนที่ผู้สอนสร้างขึ้นมาเป็นเนื้อหาบทเรียนในแต่ละบท โดยเนื้อหาประกอบด้วยขั้นตอนการพัฒนาประกอบด้วยคำสั่งสำหรับการติดตั้งสภาพแวดล้อมและคำสั่งในการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงที่เป็นแนวทางให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ด้วยตนเอง ผู้สอนสามารถใช้ในการสอนตามขั้นตอนโดยที่ผู้เรียนหรือผู้สอนไม่ต้องพิมพ์แค่คำสั่งทางด้านซ้ายบางคำสั่งที่ต้องการทำงานผ่านเทอร์มินอลก็ทำการเปิดเทอร์มินอลเพื่อทำงาน บางคำสั่งต้องการทำงานในส่วนใดก็ทำการเปิดส่วนนั้นขึ้นมาทำงานได้แบบอัตโนมัติ ตรงกลางเป็นหน้าต่างเครื่องมือสำหรับพัฒนาแอปพลิเคชัน Visual code Studio และส่วนขวามือเป็นหน้าต่างเว็บเบราว์เซอร์แสดงผลของการพัฒนาหน้าเว็บแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบทันทีทันใดเมื่อผู้ใช้ทำการรันผลลัพธ์การทำงานไว้ ในส่วนของผู้สอนสามารถจัดการหน้าตา รวมทั้งหน้าตาฐานข้อมูลต่าง ๆ

- ส่วนผู้สอนสำหรับจัดการเนื้อหา ดังใน Figure 5 จะปรากฏหน้าตาที่ผู้สอนสามารถสร้างขั้นตอนหรือเนื้อหาสำหรับการสอนได้ทางซ้ายมือซึ่งเนื้อหาจะประกอบด้วยคำสั่งที่อยู่ในรูปแบบความต้องการให้รันหรือต้องการให้

คัดลอกเพื่อแก้ปัญหาเมื่อผู้สอนแล้วผู้เรียนทำตามแล้วพิมพ์ซ้ำหรือพิมพ์ผิดทำให้เกิดปัญหาการเรียนไม่ทัน และทางซ้ายจะเป็นผลลัพธ์ที่แสดงผลให้ผู้เรียนจริงในหน้าต่างซ้ายมือ ดังใน Figure 6

- ส่วนผู้ดูแลระบบ ที่สามารถจัดการค้นหา ลบ แก้ไขข้อมูล และจัดการสิทธิ์การใช้งาน ดังใน Figure 7 เป็น

ตัวอย่างของหน้าต่างที่ผู้ดูแลระบบเห็นข้อมูลผู้ใช้ระบบทั้งหมดว่าผู้ใช้ระบบได้คอนเทนต์ไหน ตอนนี้คอนเทนต์ทำงานอยู่หรือไม่ หากไม่ต้องการใช้งานคอนเทนต์แล้ว จะทำการหยุดคอนเทนต์และลบคอนเทนต์นั้นทิ้งได้ หรือถ้าหากผู้ใช้ลืมรหัสผ่านผู้ดูแลระบบก็จะสามารถจัดการให้ได้

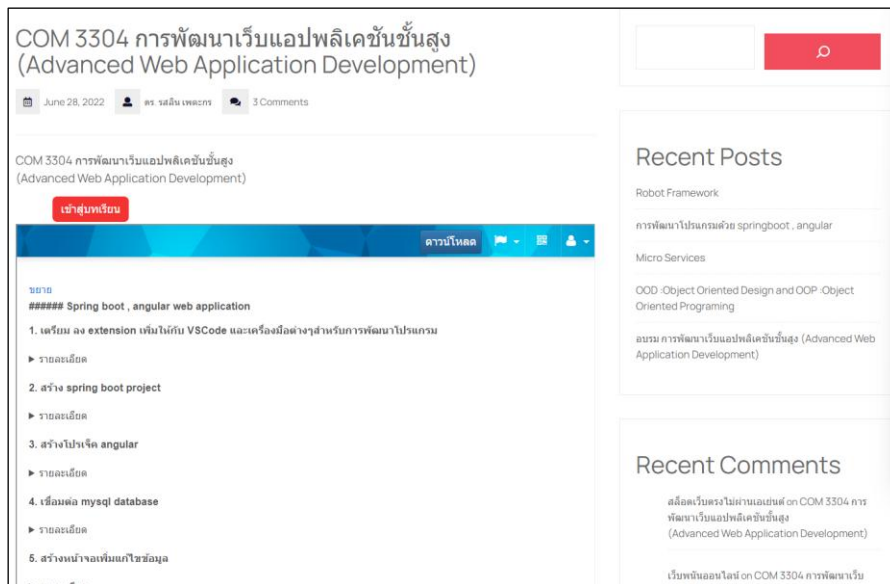


Figure 4 Home Page of Teaching Assistant Tools

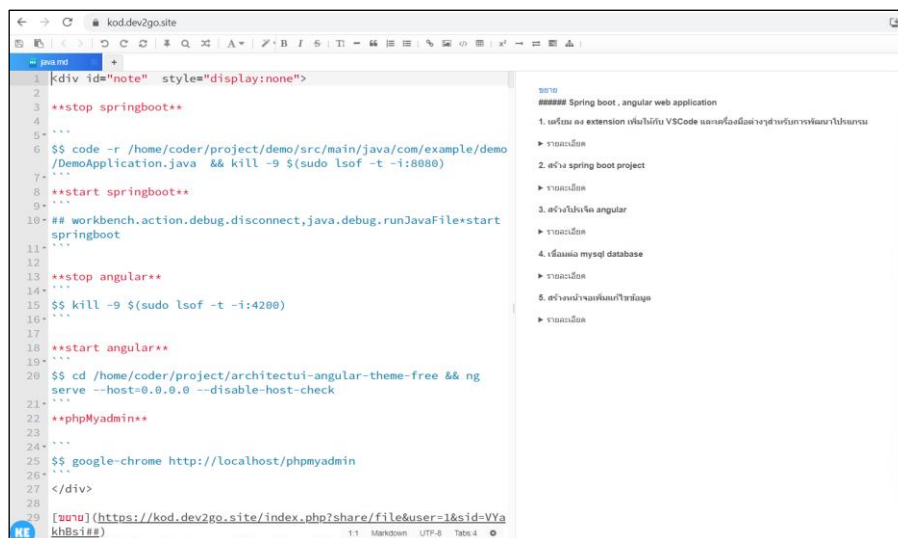


Figure 5 Content Management Page of the Teacher

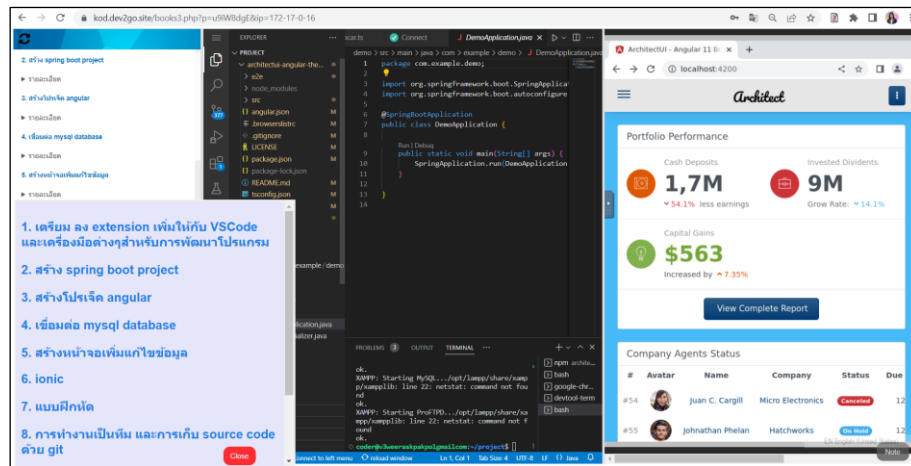


Figure 6 Learning of Students and Teaching of Teachers Pages

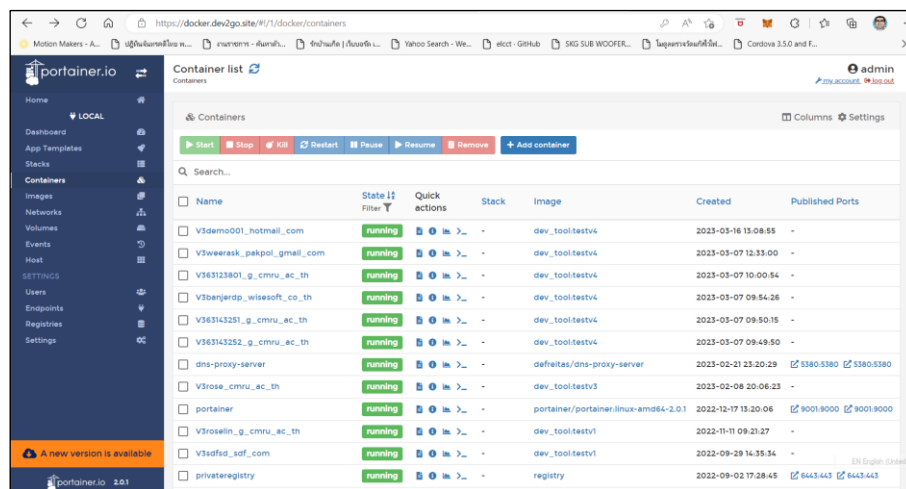


Figure 7 Management Page of Admin

2.5 การวิเคราะห์ผล

ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงบรรยาย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แล้วนำผลค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์การแปลความหมายตามเกณฑ์ (Srisa-ard, 2017) ดังนี้

- ค่าเฉลี่ย 4.50 – 5.00 เท่ากับระดับ มากที่สุด
- ค่าเฉลี่ย 3.50 – 4.49 เท่ากับระดับ มาก
- ค่าเฉลี่ย 2.50 – 3.49 เท่ากับระดับ ปานกลาง
- ค่าเฉลี่ย 1.50 – 2.49 เท่ากับระดับ น้อย
- ค่าเฉลี่ย 1.00 – 1.49 เท่ากับระดับ น้อยที่สุด

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ภาพรวมของสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ผลการ

วิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญ และผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ใช้

3.1 ภาพรวมของสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ใน Figure 8 สถาปัตยกรรมเครื่องมือต้องการนำเสนอการใช้เทคโนโลยีคอนเทนเนอร์และติดตั้ง Portainer เพื่อจัดการคอนเทนเนอร์ทั้งหมดที่มีในส่วนผู้ดูแลระบบ เมื่อผู้ใช้สมัครเข้าทำงานผู้ใช้จะได้โนดที่เชื่อมต่อกับส่วนเก็บข้อมูลที่อนุญาตให้เก็บข้อมูลในโดเมน Project เพื่อใช้เก็บข้อมูลสำหรับแต่ละโนด โดยแต่ละโนดจะทำการติดตั้งเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้หรือเครื่องมือพื้นฐานให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานระบบได้ นั่นคืออิมเมจสำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูง โดยทุก ๆ คอนเทนเนอร์รันด็อกเกอร์สคริปตามขั้นตอนสคริปต์ในด็อกเกอร์ไฟล์ (Dockerfile) ดังใน Figure 9 ที่เก็บคำสั่งสำหรับรันด็อกเกอร์สคริปเพื่อสร้างอิมเมจที่เป็นต้นแบบใน Figure 10 ในการสร้างคอนเทนเนอร์ที่สามารถใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงได้ เมื่อรันด็อกเกอร์คอนเทนเนอร์ตามสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่ออกแบบ ผู้ใช้จะได้คอนเทนเนอร์

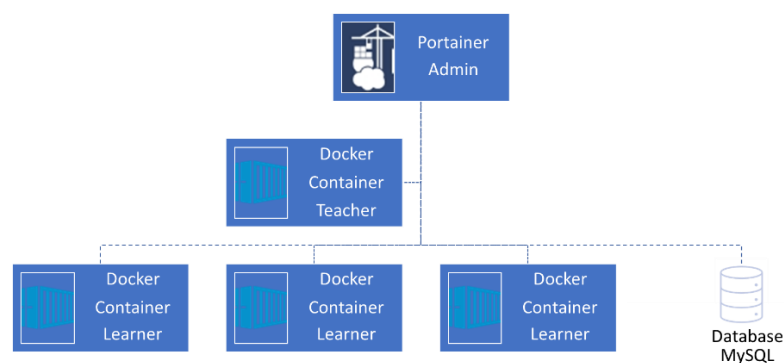


Figure 8 Overview of Architecture Tool

portainer.io

Home

LOCAL

Dashboard

App Templates

Stacks

Containers

Images

Networks

Volumes

Events

Host

SETTINGS

Users

Endpoints

Registries

Settings

Image layers

Order	Size	Layer
1	72.8 MB	ADD file:3ccf74d646089ed7bb43c40c45dd43e86f0674115f856efada93c7e4e63624 in /
2	0 B	CMD ["bash"]
3	0 B	USER root
4	161.6 MB	RUN apt-get update && apt-get install -y curl dumb-init htop locales man nano git procs o...
5	3 MB	RUN sed -i 's/# en_US.UTF-8/en_US.UTF-8/' /etc/locale.gen && locale-gen
6	333.9 KB	RUN adduser --gecos " --disabled-password coder && echo "coder ALL=(ALL) NOPASSWD:ALL" >> /etc/sudoers.d/nopasswd
7	0 B	ENV TZ=Asia/Bangkok
8	0 B	ENV LANG=en_US.UTF-8
9	45 B	RUN ln -snf /usr/share/zoneinfo/\$TZ /etc/localtime && echo \$TZ > /etc/timezone
10	113.5 MB	ADD file:fd8bf381d67f47c41ee8d373e0920f03efc9713703c08be44c8d3e00594beed in /home/coder/code-server_4.10.0_amd64.deb
11	406.6 MB	RUN dpkg -i /home/coder/code-server_4.10.0_amd64.deb
12	20.9 MB	RUN apt-get update && apt-get install -y locales && rm -rf /var/lib/apt/lists/* && localedef -i en_US -c -f UTF-8 -A /usr/s...
13	0 B	ENV LANG=en_US.utf8
14	555.5 MB	RUN curl -sSL https://get.docker.com/ sh
15	29.7 MB	RUN apt-get -q -y update && apt-get --no-install-recommends -y install runit apache2 libapache2-mod-php php openssl
16	2.9 MB	RUN apt-get install -y ssl-cert
17	93.7 MB	COPY file:86d34c82b35ea2cad8597a68f822d5f8ade3fa55157e39aaed011beef331a03 in /tmp/google-chrome-stable_current_amd64.deb

Figure 9 Docker Script for Install Container

portainer.io

Home

LOCAL

Dashboard

App Templates

Stacks

Containers

Images

Networks

Volumes

Events

Host

SETTINGS

Users

Endpoints

Registries

Settings

Image list

Pull Image

Registry

DockerHub

Image

docker.io e.g. myImage:myTag

Image name is required.

Advanced mode

Pull the image

Images

Remove

Build a new image

Import

Export

Search...

Id	Tags	Size	Created
sha256:25d3d63782d356c2951c4de731924...	Unused	71 GB	2023-05-26 14:33:13
sha256:1071f65c25ac30b93404a21795683...		2.6 GB	2023-02-22 18:00:49
sha256:2b1a479d344aff406049e21ad79023...	alquams/tmp-hs-latest	188.2 MB	2021-08-31 14:45:39
sha256:899a9eb3625af00b14a1de22b1830...	bookful	24.8 GB	2021-11-09 06:37:18

Figure 10 Container Image for Advanced Application Development

Table 1 The results of the opinion analysis of experts on the developed architecture (N=5)

Evaluation List	Evaluation Result		Interpretation
	$\bar{X}$	S.D.	
Function Requirement Test	4.50	0.353	Excellent
Function Test	4.52	0.672	Excellent
Usability Test	4.32	0.540	Good
Security Test	4.28	0.228	Good
Performance	4.55	0.512	Excellent
Teaching and Learning	4.53	0.447	Excellent
Total Average	4.45	0.458	Good

3.2 ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญต่อสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ จากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน ได้เลือกวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) (Wanichbancha, 2011) ด้วยการใช้แบบประเมินที่เป็นแบบประมาณค่า 5 ระดับ ความพึงพอใจโดยภาพรวมแสดงดัง Table 1

จาก Table 1 ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อสถาปัตยกรรมที่พัฒนาขึ้น พบว่า ความมีประสิทธิภาพของระบบมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.55 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.512 ด้านงานการเรียนการสอนค่าเฉลี่ย 4.53 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.447 ด้านฟังก์ชันการทำงานได้ตามหน้าที่ค่าเฉลี่ย 4.52 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.672

และด้านตรงตามความต้องการมีค่าเฉลี่ย 4.50 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.353 ซึ่งโดยภาพรวมแล้วผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าระบบมีค่าเฉลี่ยรวม 4.45 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.458 อยู่ในระดับมากสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Bamroongcheep, 2020) ที่ได้พัฒนารูปแบบห้องเรียนกลับทางผ่านกูเกิ้ลคลาวด์คอมพิวติ้งและสื่อสังคมเพื่อส่งเสริมทักษะวิถีแห่งการคิดในศตวรรษที่ 21 สำหรับนิสิตครู ซึ่งผลความพึงพอใจโดยรวมของกลุ่มทดลองอยู่ในระดับมากและผู้เชี่ยวชาญรับรองรูปแบบที่พัฒนาขึ้นเห็นว่าภาพรวมมีความเหมาะสมมากที่สุด

3.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้ที่ตอบแบบสอบถามความพึงพอใจต่อสถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์แสดงดังนี้

Table 2 The general data analysis results of users on the developed architecture (N=77)

List	Number	Percentage
Gender		
Male	55	71.43
Female	22	28.57
Total	77	100.00

Table 3 The results of the opinion analysis of user on the developed architecture (N=77)

Evaluation List	Evaluation Result		Interpretation
	$\bar{X}$	S.D.	
Function Requirement Test			
Functional Requirement Test on the Use Side	4.32	0.715	Good
Function Requirement Test on Coding	4.31	0.782	Good
Function Requirement Test on the output of a running program	4.29	0.792	Good
Function Requirement Test the correct display output and requirement	4.21	0.848	Good
Average	4.28	0.784	Good

Table 3 (Continuous)

Evaluation List	Evaluation Result		Interpretation
	$\bar{x}$	S.D.	
Function Test			
Function Test has the correct method of logging in to the system.	4.40	0.674	Good
The function test is correct when running the program.	4.35	0.739	Good
Function testing measures the accuracy of the program code.	4.42	0.676	Good
Function Test is correct in running the program.	4.39	0.728	Good
The function test has the accuracy of displaying the results.	4.44	0.678	Good
Average	4.40	0.699	Good
Usability Test			
The usability test is easy to run on the system.	4.27	0.789	Good
The Usability Test has a screen design that works properly.	4.29	0.758	Good
Usability Test The clarity of the text displayed on the screen	4.40	0.765	Good
The usability test is convenient to run.	4.25	0.746	Good
Usability Test The system is reliable and usable.	4.40	0.693	Good
Average	4.32	0.750	Good
Security Test			
The security test is licensed prior to the use of the various systems involved.	4.45	0.660	Good
Security tests are safe ways to verify information.	4.44	0.716	Good
Security Test is always giving advice and helping.	4.52	0.641	Excellent
Average	4.47	0.672	Good
Performance			
Performance The speed of accessing the service system	4.14	0.854	Good
Performance: Program processing speed	4.25	0.830	Good
Performance recording speed and program improvements	4.25	0.797	Good
Performance The speed of presenting results	4.31	0.782	Good
Performance The overall speed of the system	4.30	0.708	Good
Average	4.25	0.794	Good

จาก Table 3 มีการวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้ใช้ทั้งหมด 6 ด้าน ซึ่งพบว่า ด้านงานการเรียนการสอนมีความพึงพอใจมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.54 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.634 รองลงมาเป็นด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ค่าเฉลี่ย 4.47 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.672 และด้านการทำงานตามหน้าที่ ค่าเฉลี่ย 4.40 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.699 สำหรับผลของค่าเฉลี่ยรวมทุกด้านอยู่ในระดับมากค่าเฉลี่ย 4.37 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.722 อาจจะเนื่องจากเป็นระบบที่ช่วยลดจำนวนทรัพยากรในเครื่องของผู้ใช้และสามารถเข้าใช้งานได้ทุกที่ทุกเวลาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thitipetchakul *et al.* (2020) ที่ได้พัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้บนระบบคลาวด์

คอมพิวเตอร์ตามแนวคิดคอนเนคตวิสต์ซิมเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี พบว่าผู้เรียนรู้ระบบคลาวด์คอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับมากที่สุด และงานวิจัยของ Wannasin *et al.* (2021) ได้วิจัยผลการจัดกิจกรรมการเรียนรู้เชิงรุกโดยใช้ปัญหาเป็นฐานผ่านเทคโนโลยีคลาวด์คอมพิวเตอร์ เพื่อส่งเสริมทักษะวิถีแห่งการคิดเศรษฐกิจพอเพียงของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ในภาคเรียนที่ 2/2563 พบว่ากลุ่มทดลองมีความพึงพอใจต่อกิจกรรมการเรียนรู้ในระดับมากที่สุด

4. สรุป

สถาปัตยกรรมเครื่องมือการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงแบบคลาวด์ ด้วยแพลตฟอร์มคอนเทนเนอร์ ได้ใช้โปรแกรมภาษาพีเอชพีในการสร้างส่วนลงชื่อเข้าใช้ของผู้ใช้งานระบบ เมื่อลงชื่อเข้าระบบ ระบบจะสร้างคอนเทนเนอร์สำหรับผู้ใช้งานหรือผู้เรียนด้วย Docker ให้ผู้ใช้งานได้คอนเทนเนอร์สำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูง การทำงานภายในสถาปัตยกรรมเครื่องมือประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนเนื้อหาบทเรียนแบบปฏิบัติการ ส่วนที่สองเป็นส่วนเครื่องมือในการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงที่เปิดเทอร์มินัลให้ใช้ในการทำงานรันผลลัพธ์การพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงและแสดงผลลัพธ์ของแอปพลิเคชันขั้นสูงในส่วนที่สามพร้อมทั้งสามารถจัดการฐานข้อมูลในส่วนนี้ด้วย ผู้ดูแลระบบสามารถจัดการคอนเทนเนอร์ทั้งหมดโดยผ่าน Portainer เมื่อพัฒนาเสร็จแล้วนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญทดสอบผลความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับมากมีค่าเฉลี่ย 4.45 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.458 และเมื่อนำไปทดลองกับผู้ใช้งานหรือผู้เรียนจำนวน 77 คน ที่ได้เข้ามามีการศึกษาในภาคเรียนที่ 2-3 ปีการศึกษา 2565 พบว่ามีความพึงพอใจระดับมากมีค่าเฉลี่ยรวม 4.37 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.722 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเห็นว่าสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นได้ปรับใช้เทคโนโลยีด้วยดอกเกอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการสร้างและใช้งานคอนเทนเนอร์ ที่มีการจัดเตรียมเฟรมเวิร์กที่สามารถแยกบริการต่าง ๆ ได้ โดยแต่ละบริการมีฟังก์ชันการทำงานเป็นของตัวเอง แต่ในขณะเดียวกันก็มีการประสานงานอย่างเหมาะสม การนำสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาช่วยในการจัดการเรียนการสอนการพัฒนาแอปพลิเคชันขั้นสูงที่จำเป็นต้องเตรียมเครื่องมือในการพัฒนาจำนวนมากทำให้เกิดความยุ่งยากในการจัดเตรียมห้องปฏิบัติการขั้นสูงเพื่อรองรับผู้เรียนจำนวนมาก สถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจึงทำให้ผู้เรียนสะดวก และผู้เรียนได้เข้ามามีศึกษาเนื้อหาวิชาได้ตลอดเวลาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนมากยิ่งขึ้น ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมคือในส่วนของจัดการการเรียนการสอนนั้น เมื่อผู้เรียนเกิดปัญหาขึ้นขณะที่ใช้งานสถาปัตยกรรมเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นยังไม่มีระบบบริหารจัดการขอความช่วยเหลือจากผู้สอนเมื่อผู้เรียนเกิดปัญหาพร้อม ๆ กัน และยังไม่มียุทธวิธีที่ใช้ในการประเมินผลการเรียนของผู้เรียน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ

เชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกด้านต่าง ๆ สำหรับในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Amazon Inc. 2023. **Amazon Web Services (AWS)**. Available Source: amazon. <https://aws.amazon.com>, Jun 5, 2023.
- Bamroongcheep, U. 2020. Development of the Flipped-Classroom Model via Google Cloud Computing and Social Media to Enhance Way of Thinking Skills in 21st Century for Teacher Students. **Journal of MCU Peace Studies** 8(4): 1552-1566. (in Thai)
- Charoenphuthiwat, T. and Buranasaksee, U. 2023. A Model-Based Tool on Kubernetes Platform for Selecting the Most Cost Effective Resources for Web Applications t, pp. 540-547. **In The 15th NPRU National Academic Conference 2023 Research and Development Institute**. Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom. (in Thai)
- Docker Inc. 2023. **Use containers to Build, Share and Run your applications on Docker's web site**. Available Source: <https://www.docker.com/resources/what-container/>, June 5, 2023.
- Gary, B.S. and Harry, J.R. 2011. **System Analysis and Design** (9th ed). Cengage Learning, USA.
- Google Inc. 2023. **Google Cloud Platform**. Available Source: <https://cloud.google.com>, Jun 5, 2023.
- Gitpod GmbH. 2023. **GitLab**. Available Source: <https://www.gitpod.io/>, Jun 5, 2023.
- Laisema, S. 2018. Mobile Cloud Learning. **Journal of Education Silpakorn University** 16(1): 52-64. (in Thai)
- Mell, P. and Grance, T. 2011. The NIST definition of cloud computing. **National Institute of Standards and Technology Special Publication (NIST SP)** 53: 1-7.
- Microsoft Inc. 2023. **Azure**. Available Source: <https://azure.microsoft.com/en-us/>, Jun 5, 2023.
- Srisa-ard, B. 2017. **Basic Research**. Suweeriyasan, Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)

- Thitipetchakul, C., Sompong, N. and Rampai, N. 2020. Development of Learning Management Model on Cloud Computing System Based on Connectivism to Enhance Information and Communication Technology Literacy for Undergraduate Students. **Ratchphruek Journal** 18(1): 38-48. (in Thai)
- Wanichbancha, K. 2011. **Statistical Analysis: Statistics for Decision Making**. Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- Wannasin, W., Bamroongcheep, U. and Manosuttirit, A. 2021. The effects of active learning activities by using problem based Learning Via Cloud Computing Technology to Enhance Ways of Sufficiency Economy Thinking Skills of Twelfth Grade Students. **Srinakharinwirot Academic Journal of Education** 22(2): 132-151. (in Thai)

Research Article

การประยุกต์ใช้วัสดุเศษเหลือจากกระบวนการผลิตปลาป่นเพื่อลดต้นทุน
ค่าอาหารในการเลี้ยงปลาชะโอน

The Application of Fishmeal Processing Wastes for Reducing Feed Cost of
Butter Catfish (*Ompok bimaculatus*) Culture

ธนพล อยู่เย็น^a, ศิระ ลายสิงห์^a, ทวีเดช ไชยนาพงษ์^b และ แจ่มจันทร์ เพชรศิริ^{b*}

Thanapon Yooyen^a, Sira Laysing^a, Thaweedet Chainapong^b and Jamjun Pechsiri^{b*}

^a สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

^a Department of Biology, Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Pa Phayom, Phatthalung 93210, Thailand.

^b สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

^b Department of Biological and Environmental Science, Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Pa Phayom, Phatthalung 93210, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-30

Revised: 2024-05-09

Accepted: 2024-05-20

Keywords:

fish condensate;

fish oil;

Ompok bimaculatus;

growth;

feed cost

The objective of this study was to assess the effects of additional fishmeal processing wastes to commercial feed on the growth and feed cost in butter catfish (*Ompok bimaculatus*) aquaculture. Fish with initial weight of 8.05 ± 0.5 - 9.17 ± 1.24 g were raised in nine $2 \times 2 \times 1$ m³ cages at a density of 50 per cage. These cages were suspended in three $8 \times 8 \times 1.2$ m³ ponds (three cages in each pond.). Three feed recipes applied were: 1) purely commercial feed (T1); 2) commercial feed supplemented with fish condensate (T2); and 3) commercial feed supplemented with fish oil (T3), both at 10 ml per kg of commercial feed. The experiment was conducted over three months. Results show that growth performances, in terms of mean final body weight and final body length, did not differ significantly ($p > 0.05$) with mean final body weight between 26.61 ± 3.17 and 30.55 ± 7.04 g, and final body length between 15.32 ± 1.05 and 15.66 ± 1.45 cm. However, fish condensate and fish oil supplemented to commercial feed did significantly affect the survival rate, the feed conversion ratio, and the feed cost. Fish thriving on T2 and T3 diets exhibited higher survival rates (97.33 ± 1.15 and $99.33 \pm 1.15\%$, respectively), low feed conversion ratios (2.03 ± 0.69 and 1.93 ± 0.38), and low feed cost (59.9 ± 20.3 and 58.9 ± 11.7 baht per kg) while fish fed T1 had a survival rate of $89.33 \pm 3.06\%$, a feed conversion ratio of 2.93 ± 0.70 , and a feed cost of 83.5 ± 20.0 baht per kg. The study reveals that fish condensate and oil supplements, at the above-mentioned amounts, could reduce fish feed costs by 23.6-24.6 baht per kg of *O. bimaculatus* production. These results can be used as a guideline to investigate other feed formulae for reducing feed costs in aquaculture.

© 2025 Yooyen, T., Laysing, S., Chainapong, T. and Pechsiri, J. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: jamjun2508@yahoo.com

Cite this article as:

Yooyen, T., Laysing, S., Chainapong, T. and Pechsiri, J. 2025. The Application of Fishmeal Processing Wastes for Reducing Feed Cost of Butter Catfish (*Ompok bimaculatus*) Culture. *Recent Science and Technology* 17(2): 262032.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตและต้นทุนค่าอาหารในการเลี้ยงปลาชะโอน (*Ompok bimaculatus*) ด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่เสริมด้วยเศษเหลือจากการแปรรูปปลาปน โดยทดลองเลี้ยงปลาน้ำหนักเริ่มต้น 8.05 ± 0.5 - 9.17 ± 1.24 กรัม ในกระชังขนาด $2 \times 2 \times 1$ ม³ กระชัง ๆ ละ 50 ตัว จำนวน 9 กระชัง ที่แขวนในบ่อดินขนาด $8 \times 8 \times 1.2$ ม³ จำนวน 3 บ่อ ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง คือ 1) อาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้า (T1) 2) อาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้าเสริมน้ำมัน ปลาเข้มข้น (T2) และ 3) อาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้าเสริมด้วยน้ำมันปลา (T3) ในปริมาณ 10 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าปลาที่ได้รับอาหารแตกต่างกันมีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) มีน้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ยระหว่าง 26.61 ± 3.17 - 30.55 ± 7.04 กรัม ความยาวสุดท้ายเฉลี่ยระหว่าง 15.32 ± 1.05 - 15.66 ± 1.45 เซนติเมตร แต่ปลาที่ได้รับอาหาร T2 และ T3 มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 2.03 ± 0.69 และ 1.93 ± 0.38 มีอัตราการอด 97.33 ± 1.15 และ $99.33 \pm 1.15\%$ และมีต้นทุนค่าอาหาร 59.9 ± 20.3 และ 58.9 ± 11.7 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับปลาที่เลี้ยงด้วยอาหาร T1 ที่มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงถึง 2.93 ± 0.70 แต่มีอัตราการอดลดลงเหลือเพียง $89.33 \pm 3.06\%$ และมีต้นทุนค่าอาหารสูงถึง 83.5 ± 20.0 บาทต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันปลาเข้มข้นตามสูตร T2 และน้ำมันปลาตามสูตร T3 มาเสริมในอาหารสำเร็จรูปสูตรทางการค้า (T1) ในปริมาณข้างต้น สามารถลดต้นทุนค่าอาหารได้ถึง 23.6-24.6 ต่อการผลิตปลาชะโอน 1 กิโลกรัม ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางในการทดลองหาสูตรอื่น ๆ เพื่อลดต้นทุนค่าอาหารในการเลี้ยงปลาได้

คำสำคัญ: น้ำมันปลาเข้มข้น, น้ำมันปลา, ปลาชะโอน, การเจริญเติบโต, ต้นทุนค่าอาหาร

1. บทนำ

ปลาชะโอนหรือปลาเนื้ออ่อน (*O. bimaculatus*) เป็นปลาน้ำจืดที่มีรสชาติดี มีสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ประกอบไปด้วยโปรตีน 13.93% ไขมัน 3.92% (Paul *et al.*, 2018) เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ทำให้มีราคาสูงถึงกิโลกรัมละ 350-400 บาท กรมประมงจึงส่งเสริมให้มีการเพาะเลี้ยงและผลักดันให้เป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจชนิดใหม่เพื่อสร้างอาชีพ เพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร ปัจจุบันมีการเลี้ยงปลาชะโอนกันมากในพื้นที่ภาคใต้ เช่น จังหวัดสุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และพัทลุง ฯลฯ จากการศึกษาข้อมูลการเลี้ยงปลาชะโอนแปลงใหญ่ของเกษตรกรในพื้นที่ตำบลแหลมโดนด อำเภอดวนขนุน จังหวัดพัทลุง ประมาณ 30 ราย พบว่าปลาเจริญเติบโตช้าและมีขนาดที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปมีสาเหตุมาจากอัตราการปล่อยที่หนาแน่นเกินไป (Monwar *et al.*, 2013) ความถี่ในการให้อาหาร (Havas *et al.*, 2015) ระดับโปรตีน ระดับไขมัน และระดับพลังงานในอาหารที่ปลาได้รับไม่เหมาะสม ซึ่ง Biswas *et al.* (2020) รายงานว่าปลาชะโอนที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีโปรตีน 35% มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีน 25 และ 45% นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าปลาชะโอนที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีน 40% เท่ากันแต่มีไขมัน 6.01 และ 9.87% มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีไขมัน 13.54% (Chawpaknam and Bowonsupakijkul, 2003) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลา

ชะโอน แต่เนื่องจากเพิ่งเริ่มมีการส่งเสริมให้มีการเลี้ยงปลาชะโอนเชิงพาณิชย์ จึงทำให้ในท้องตลาดยังไม่มีอาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลาชะโอนโดยเฉพาะ ซึ่งต่างจากปลาดุก ปลานิล และปลากะพงขาว ซึ่งเป็นปลาเศรษฐกิจที่มีการเลี้ยงกันอย่างแพร่หลาย จึงทำให้เกษตรกรผู้เลี้ยงปลาชะโอนส่วนใหญ่ใช้อาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลาดุกซึ่งมีโปรตีนประมาณ 28-30% มาใช้เลี้ยงปลาชะโอน ทำให้ปลาชะโอนได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีนต่ำกว่าความต้องการ จึงทำให้ปลาเจริญเติบโตช้า

ดังนั้น จำเป็นอย่างยิ่งการเลี้ยงปลาชะโอนเชิงพาณิชย์ ต้องให้อาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการตรงกับความต้องการ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีอาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลาชะโอน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวการใช้อาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลากินเนื้อซึ่งมีระดับโปรตีนที่สูงกว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลาดุกน่าจะเป็นแนวทางหนึ่ง แต่อาหารปลากินเนื้อที่มีระดับโปรตีนสูงมีราคาแพงกว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่เกษตรกรใช้อยู่ในปัจจุบัน อาจทำให้ต้นทุนค่าอาหารสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อเกษตรกรที่มีเงินทุนน้อย แนวทางหนึ่งในการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนค่าอาหารในการเลี้ยงปลาให้แก่เกษตรกร คือการนำเศษเหลือจากการแปรรูปสัตว์น้ำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของอาหารเม็ดสำเร็จรูปให้สูงขึ้น

จากการศึกษาข้อมูลกรรมวิธีการผลิตปลาปนของโรงงานปลาปนแห่งหนึ่งในจังหวัดสงขลา พบว่าจากกระบวนการผลิตปลาปนนอกจากจะได้ปลาปนแล้วมีเศษเหลือส่วนที่เป็นน้ำ ซึ่งบริษัทนำมาผ่านกระบวนการระเหยน้ำออกภายใต้ระบบสุญญากาศ ทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น

ได้เป็นน้ำมันปลาเข้มข้นและน้ำมันปลา ซึ่งส่วนใหญ่จะขายให้กับโรงงานผลิตอาหารสัตว์ น้ำมันปลาเข้มข้นมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพ ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นครบทั้ง 9 ชนิด และยังอุดมไปด้วยกรดอะมิโนอิสระ เช่น อะลานีน (alanine) กรดแอสพาทิก (aspartic acid) กรดกลูตามิก (glutamic acid) และไกลซีน (glycine) ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มกลิ่น รส และเป็นสารดึงดูดและกระตุ้นการกินอาหารให้แก่สัตว์น้ำได้ (Wattanukul *et al.*, 2017a) อีกทั้งยังมีรายงานว่าน้ำมันปลาเข้มข้นประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (polyunsaturated fatty acids, PUFAs) สูงถึง 65.84 กรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง (Wattanukul *et al.*, 2019) สอดคล้องกับการเพิ่มน้ำมันปลาในสูตรอาหาร ทำให้กรดลิโนเลนิก (linolenic acid, 18:3n-3) และกรดอะราชิไดนิค (arachidonic acid, 20:4n-6) ในอาหารเพิ่มขึ้น ซึ่งกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นสารดึงดูดการกินอาหารของสัตว์น้ำเช่นเดียวกัน (Plaipetch *et al.*, 2014) จึงทำให้นักวิจัยด้านอาหารสัตว์น้ำมีความสนใจที่จะนำน้ำมันปลาเข้มข้นมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนปลาป่นเพื่อลดต้นทุนค่าอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งปลากินเนื้อซึ่งต้องการอาหารที่มีโปรตีนสูง จากรายงานการใช้ น้ำมันปลาเข้มข้นทดแทนปลาป่น 50% ในสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงปลาช่อนทำให้ต้นทุนค่าอาหารลดลง 40.28 บาทต่อกิโลกรัม (Wattanukul *et al.*, 2014) และการใช้น้ำมันปลาเข้มข้นทดแทนปลาป่น 50% ในสูตรอาหารโปรตีน 40% สำหรับเลี้ยงปลากะพงขาว ทำให้ต้นทุนค่าอาหารลดลง 12.43 บาทต่อกิโลกรัม (Wattanukul *et al.*, 2017b) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าเศษเหลือจากกระบวนการแปรรูปสัตว์น้ำสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนและไขมันในอาหารเม็ดสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอด และลดอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อและลดต้นทุนค่าอาหารปลาได้ (Pechsiri *et al.*, 2021) แต่วิธีการดังกล่าวอาจจะไม่สะดวกสำหรับเกษตรกรรายย่อยที่ไม่มีอุปกรณ์อัดเม็ดอาหาร ดังนั้นการนำเศษเหลือจากกระบวนการแปรรูปสัตว์น้ำมาใช้ควรเป็นวิธีการที่ง่าย และเหมาะสมกับเกษตรกร

งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้น้ำมันปลาเข้มข้นและน้ำมันปลา ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการผลิตปลาป่น โดยการนำมาคลุกกับอาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้าที่เกษตรกรใช้อยู่ในปัจจุบัน วิธีการดังกล่าวนอกจากเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก เกษตรกรทำได้ด้วยตนเองแล้ว น้ำมันปลาเข้มข้นและน้ำมันปลายังช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ มีกลิ่นหอม มีกรดอะมิโนและมีกรดไขมันชนิดที่มีคุณสมบัติช่วยดึงดูดการกินอาหารทำให้ปลาเข้ามากินอาหารได้เร็วขึ้น อายากินอาหารมากขึ้น ทำให้ปลา

เจริญเติบโตเร็วขึ้น ลดการสูญเสียอาหารและช่วยลดต้นทุนค่าอาหาร ผลจากการวิจัยในครั้งนี้เป็นแนวทางให้แก่เกษตรกรที่เลี้ยงปลาชะโอนเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมปลาทดลอง

โครงการวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการกำกับดูแลการเลี้ยงและการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ (COA No. TSU 2023-007) เตรียมปลาทดลองโดยซื้อลูกพันธุ์ปลาชะโอนขนาดประมาณ 8-9 กรัม จำนวน 500 ตัว จากฟาร์มเกษตรกร ในตำบลแหลมโดนด อำเภอกวนขนุน จังหวัดพัทลุง นำมาปรับสภาพการทดลองในกระชังที่ทางในบ่อดินเลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลาดุก เป็นเวลา 2 สัปดาห์ คัดขนาด นับจำนวนและชั่งน้ำหนัก แล้วนำมาปล่อยในกระชังขนาด $2 \times 2 \times 1$ ลูกบาศก์เมตร ที่ทางในบ่อดินขนาด $8 \times 8 \times 1.2$ ลูกบาศก์เมตร บ่อละ 3 กระชัง ๆ ละ 50 ตัว

2.2 การเตรียมอาหารปลาทดลอง

เตรียมอาหารทดลองทุก ๆ 3 วัน โดยนำอาหารปลาดุกเล็ก (ซีพี 9920 ดี, บริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน), สระบุรี, ประเทศไทย) ซึ่งเป็นอาหารที่เกษตรกรใช้สำหรับเลี้ยงปลาชะโอน มาคลุกด้วยน้ำมันปลาเข้มข้นหรือน้ำมันปลาซึ่งเป็นเศษเหลือจากกระบวนการผลิตปลาป่นในอัตรา 10 มิลลิลิตรต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ผึ่งลมให้แห้งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปทดสอบความคงทนในน้ำของเม็ดอาหารตามวิธีการของ (Somboon and Semachai, 2014) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างอาหาร 10 กรัม นำไปแช่ในน้ำนาน 1 ชั่วโมง และนำไปบดในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการทดสอบอาหารทดลองมีความคงทนในน้ำมากกว่า 80% ซึ่งน้ำหนักอาหารเก็บใส่กระป๋องพลาสติก ปิดฝา เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารปลาทดลอง นำอาหารแต่ละชุดการทดลองไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามวิธีของ AOAC (2000) วิเคราะห์ปริมาณความชื้นโดยอบตัวอย่างในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-6 ชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยชุดวิเคราะห์โปรตีน (ยี่ห้อ Gerhardt, ประเทศเยอรมันนี) และเครื่องไตเตรทแบบอัตโนมัติ (ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น T5, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) วิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยชุดวิเคราะห์ไขมัน (ยี่ห้อ Gerhardt รุ่น SOX 416Macro, ประเทศเยอรมันนี) และวิเคราะห์ปริมาณเถ้าโดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (ยี่ห้อ Carbolite รุ่น AAF 12/18, ประเทศอังกฤษ) ได้ผลดังตารางที่ 1

Table 1 Nutritional composition of the experimental diets (% dry matter basis)

Parameters	Experimental diets		
	Commercial feed (Control)	Commercial feed supplemented with fish condensate	Commercial feed supplemented with fish oil
Moisture	9.61±0.04 ^b	12.71±0.24 ^a	9.15±0.16 ^b
Crude protein	27.92± 0.68 ^b	36.34± 0.84 ^a	28.20± 0.86 ^b
Crude lipid	10.45±0.56 ^b	10.26±0.88 ^b	14.98±0.63 ^a
Ash	9.90±1.00 ^a	9.79±0.46 ^a	9.93±0.88 ^a

Data are presented as means ± SD obtained from three replicates and values in the same row with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

2.3 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (*randomized complete block design*, RCBD) โดยจัดให้ บ่อดินขนาด 8 × 8 × 1.2 ลูกบาศก์เมตรเป็นบล็อก จำนวน 3 บ่อ (3 บล็อก) แต่ละบ่อวางกระชังขนาด 2 × 2 × 1 ลูกบาศก์เมตรจำนวน 3 กระชัง ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง คือ 1) อาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้า (ชุดควบคุม) 2) อาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้าเสริมด้วย น้ำนิ่งปลาเข้มข้น และ 3) อาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้าเสริมด้วยน้ำมันปลา

2.4 การทดลองและการเก็บข้อมูล

2.4.1 อาหารและการให้อาหาร

ให้อาหารตามชุดการทดลอง วันละ 2 ครั้ง คือ เวลา 9.00 น. และ 16.00 น. ให้ปลากินจนอิ่ม จดบันทึกอาหารที่ให้ ทดลองเป็นระยะเวลา 3 เดือน

2.4.2 การเก็บข้อมูล

2.4.2.1 ตรวจวัดคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยใช้ pH มิเตอร์ ออกซิเจนละลายในน้ำ (dissolved oxygen, DO) และความเป็นด่าง (alkalinity) โดยวิธีไทเตรชัน (titration method) ตามวิธีของ APHA (1995) และ ความโปร่งแสง (transparency) โดยใช้เซคติดิสก์ (Secchi disc)

2.4.2.2 เก็บข้อมูลน้ำหนักและความยาวของปลาทดลองทั้งกระชัง ทุก ๆ 1 เดือน เป็นระยะเวลา 3 เดือน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองชั่งน้ำหนักผลผลิตรวมต่อกระชัง นับจำนวนปลาที่เหลือรอด และปริมาณอาหารทั้งหมดที่ปลากิน เพื่อนำมาคำนวณหาน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว เปอร์เซนต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (percentage weight gain,

PWG %) น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน (average daily gain, ADG กรัมต่อวัน) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate, SGR % ต่อวัน) อัตรารอด (survival rate, SR%) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed conversion ratio, FCR) และวิเคราะห์ต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัม โดยใช้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$1) \text{ น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลา}}$$

$$2) \text{ เปอร์เซนต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (\%)} = \frac{(\text{น.น.ปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \text{น.น.ปลาเริ่มต้นการทดลอง})}{\text{น้ำหนักปลาเมื่อเริ่มต้น}} \times 100$$

$$3) \text{ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน (กรัมต่อวัน)} = \frac{(\text{น.น.ปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \text{น.น.ปลาเริ่มต้นการทดลอง})}{\text{ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)}}$$

$$4) \text{ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (\%ต่อวัน)} = \frac{(\ln \text{ น้ำหนักสุดท้าย} - \ln \text{ น้ำหนักเริ่มต้น})}{\text{ระยะเวลาทดลอง}} \times 100$$

$$5) \text{ อัตรารอด (\%)} = \frac{\text{จำนวนปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนปลาเมื่อเริ่มต้น}} \times 100$$

$$6) \text{ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด}}{\text{น้ำหนักปลาทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น}}$$

$$7) \text{ ต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัม (บาท/กก.)} = \text{อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ} \times \text{ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)}$$

2.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำค่าน้ำหนักเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และต้นทุนค่าอาหารในแต่ละชุดการทดลอง วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ สุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows version 25

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 คุณภาพน้ำ

ระหว่างการทดลอง อุณหภูมิของน้ำมีค่าระหว่าง 29.5-31.0 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่าง มีค่าระหว่าง 6.9-7.8 ออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าระหว่าง 5.0-6.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างมีค่าระหว่าง 79.4-95.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และความโปร่งแสงมีค่าระหว่าง 30.7-36.0 เซนติเมตร ซึ่งคุณภาพน้ำทั้ง 3 บ่อ อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาชะโอน ที่มีรายงานว่าอุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาชะโอนไม่ควร มีค่าเกิน 31 องศาเซลเซียส (Rem *et al.*, 2020) ความเป็นกรด-ด่าง ควรมีค่าระหว่าง 6-8 ออกซิเจนละลายในน้ำควรมีค่ามากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Bhatnagar and Devi, 2013) อีกทั้งความเป็นด่างของน้ำมีค่าใกล้เคียงกับการเลี้ยงปลาช่อนที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรน้ำนิ่งปลาเข้มข้นทดแทนปลาป่น ที่มีความเป็นด่าง 98.44 ± 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (Wattanakul *et al.*, 2017c) และความโปร่งแสงของน้ำมีค่าใกล้เคียงกับการเลี้ยงปลาในสกุลเดียวกันเช่น *O. pabda* (Hamilton 1822) ที่เลี้ยงในบ่อดินมีความโปร่งแสงระหว่าง 29.96 ± 1.84 - 31.91 ± 1.58 เซนติเมตร (Islam *et al.*, 2021)

3.2 อัตราการเจริญเติบโต

ผลการทดลองพบว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้า (T1) อาหารเม็ดสำเร็จรูปสูตรทางการค้าที่เสริมด้วยน้ำนิ่งปลาเข้มข้น (T2) และเสริมด้วยน้ำมันปลา (T3) มีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันทาง

สถิติ ($p>0.05$) มีน้ำหนักและความยาวเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเลี้ยง (ภาพที่ 1 และ 2) น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยในเดือนที่ 1 มีค่าระหว่าง 14.18 ± 1.23 - 16.59 ± 1.39 กรัม และ 12.42 ± 0.64 - 12.95 ± 0.64 เซนติเมตร ตามลำดับ เดือนที่ 2 มีน้ำหนักเฉลี่ยระหว่าง 21.17 ± 3.07 - 24.04 ± 5.95 กรัม ความยาวเฉลี่ย 14.58 ± 1.02 - 14.88 ± 1.02 เซนติเมตร และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 3 เดือนมีน้ำหนักเฉลี่ยระหว่าง 26.61 ± 3.17 - 30.37 ± 4.01 กรัม ความยาวเฉลี่ยระหว่าง 15.32 ± 1.05 - 15.66 ± 1.45 เซนติเมตร มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นระหว่าง 192.93 ± 47.36 - $278.39 \pm 79.15\%$ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวันระหว่าง 0.19 ± 0.04 - 0.25 ± 0.08 กรัมต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะระหว่าง 1.19 ± 0.18 - $1.46 \pm 0.24\%$ ต่อวัน (ตารางที่ 2) ต่างจากผลการศึกษาลูกส่วนใหญ่ที่พบว่าการเจริญเติบโตของปลาชะโอนขึ้นอยู่กับปริมาณโปรตีนและไขมันในอาหาร เช่น Biswas *et al.* (2020) รายงานว่าปลาชะโอนที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีน 35% มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีน 25 และ 45% ในขณะที่ Chawpaknam and Bowonsupakijkul (2003) รายงานว่าการเลี้ยงปลาชะโอน ด้วยอาหารที่มีโปรตีน 40% เท่ากันแต่มีไขมันแตกต่างกัน พบว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีไขมัน 6.01 และ 9.87% มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีไขมัน 13.54% สาเหตุที่ทำให้ปลาที่มีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันในการศึกษครั้งนี้ อาจเนื่องมาจากอาหารที่มีโปรตีนสูง (T2) มีความชื้นสูงด้วย จึงทำให้ปริมาณโปรตีนที่ปลาได้รับไม่ต่างกับอาหารที่มีโปรตีนต่ำและมีความชื้นต่ำ (T1 และ T3) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการศึกษครั้งนี้ปลาได้รับอาหารที่มีโปรตีนไขมันและความชื้นต่างกันมีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แต่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาที่ได้รับอาหารที่เสริมด้วยน้ำนิ่งปลาเข้มข้นและน้ำมันปลามีแนวโน้มที่ดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม (ตารางที่ 2) อีกทั้งยังพบว่าปลาที่ได้รับอาหารที่เสริมด้วยน้ำนิ่งปลาเข้มข้นและน้ำมันปลามีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 0.25 กรัมต่อวัน ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Dullyasiriwit (2019) ที่รายงานว่าการเลี้ยงปลาชะโอนจากขนาด 6.51 ± 1.97 กรัม (สัปดาห์ที่ 3) จนได้ขนาด 26.50 ± 12.24 กรัม (สัปดาห์ที่ 15) โดยให้อาหารโปรตีน 43.99% มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 0.24 กรัมต่อวัน

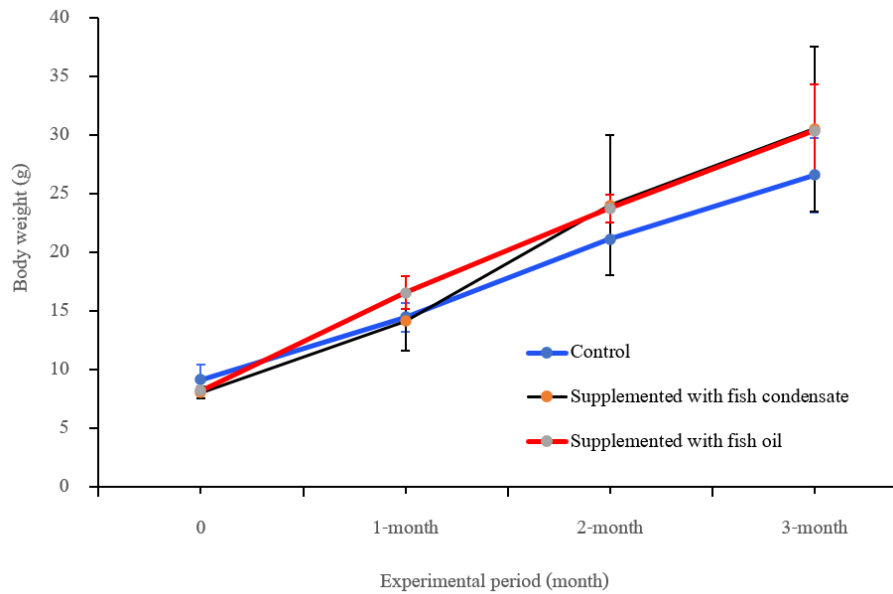


Figure 1 Mean body weight of *O. bimaculatus* during the experimental period for 3 months

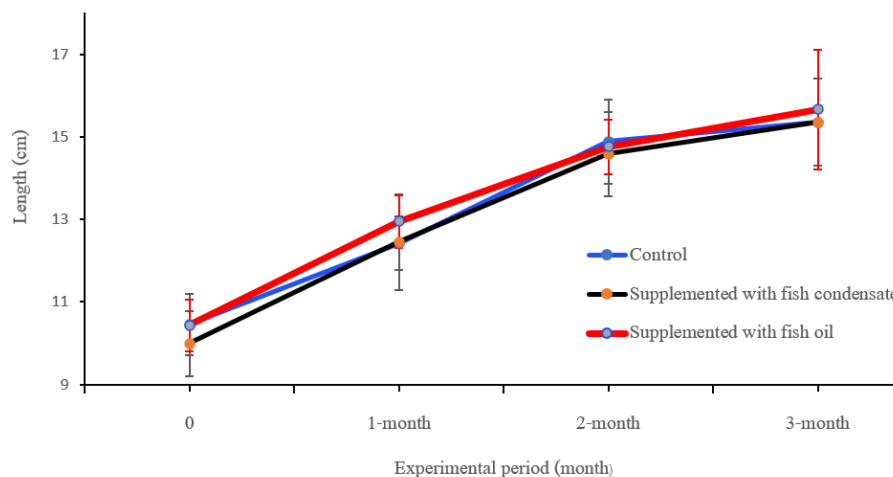


Figure 2 Mean body length of *O. bimaculatus* during the experimental period for 3 months

3.3 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ

ปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปสูตรทางการค้าเสริมด้วยน้ำนิ่งปลาเข้มข้น (T2) และน้ำมันปลา (T3) มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 2.03 ± 0.69 และ 1.93 ± 0.38 ตามลำดับ ในขณะที่ปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารชุดควบคุม (T1) มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงถึง 2.93 ± 0.70 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเสริมน้ำนิ่งปลาเข้มข้นและน้ำมันปลาในอาหารสำเร็จรูปสูตรทางการค้าทำให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอาหารที่เสริมด้วยน้ำนิ่งปลาเข้มข้นมีโปรตีน $36.34 \pm 0.84\%$ ซึ่งสูงกว่าอาหารชุดควบคุมที่มีโปรตีนเพียง $27.92 \pm 0.68\%$ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Biswas *et al.* (2020)

รายงานพบว่าปลาชะโอนที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีน 35% มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเพียง 1.62 ± 0.04 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีน 25 และ 30% ที่มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 1.76 ± 0.02 และ 1.78 ± 0.03 ตามลำดับ อีกทั้งน้ำนิ่งปลาเข้มข้นมีส่วนช่วยในการเพิ่มกลิ่น รส และยังประกอบด้วยกรดอะมิโนอิสระเช่น อะลานีน กรดแอสพาทิก กรดกลูตามิก และไกลซีน (Wattanakul *et al.*, 2017a) ซึ่งเป็นสารดึงดูดและกระตุ้นการกินอาหารของปลา เช่นเดียวกับปลาที่ได้รับอาหารที่เสริมด้วยน้ำมันปลา ถึงแม้ว่ามีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างทางสถิติกับอาหารชุดควบคุมแต่มีปริมาณไขมันสูงกว่าอาหารชุดควบคุมและน้ำมันปลาประกอบด้วยกรดไขมันลิโนเลนิก และอะราชิโดนิก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารดึงดูดการกินอาหารของปลา ทำให้

ปลาเข้ามากินอาหารได้เร็วขึ้น ลดการสูญเสียอาหาร ทำให้ใช้อาหารน้อยลง อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อจึงลดลง (Rawat *et al.*, 2018)

3.4 อัตราการอด

ปลาที่ได้รับอาหารสำเร็จรูปสูตรทางการค้าเสริมด้วยน้ำมันปลาเข้มข้น (T2) หรือน้ำมันปลา (T3) มีอัตราการอดสูงถึง 97.33 ± 1.15 และ $99.33 \pm 1.15\%$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม (T1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่มีอัตราการอดเพียง $89.33 \pm 3.06\%$ ต่างจากผลการศึกษาเกี่ยวกับการเลี้ยงปลาชะโอนด้วยอาหารที่มีระดับโปรตีนต่างกัน (Biswas *et al.*, 2020) โปรตีนระดับเดียวกันแต่พลังงานในอาหารต่างกัน (Chawpaknam and Bowonsupakijkul, 2003) หรือการเสริมยีสต์ในอาหารที่ระดับต่างกัน (Yaovararat and Chomphunich, 2017) ที่รายงานว่าอัตราการอดไม่แตกต่างกัน ผลจากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการอดที่สูงขึ้นน่าจะมีผลมาจากการให้น้ำมันปลาเข้มข้นและน้ำมันปลา เนื่องจากน้ำมันปลาเข้มข้นและน้ำมันปลา มีกรดอะมิโนและกรดไขมันที่มีคุณสมบัติช่วยดึงดูดการกินอาหารของปลา ช่วยลดการกินกันเอง (Rawat *et al.*, 2018) จึงทำให้มีอัตราการอดมากขึ้น อย่างไรก็ตามปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารชุดควบคุมมีอัตราการอดใกล้เคียงกับปลาชะโอนที่เลี้ยงด้วยอาหารโปรตีน 40% มีอัตราการอดระหว่าง 85.33 ± 2.92 – $89.90 \pm 0.32\%$ (Chawpaknam and Bowonsupakijkul, 2003)

3.5 ต้นทุนค่าอาหาร

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าการเสริมน้ำมันปลาเข้มข้น (T2) และน้ำมันปลา (T3) ในอาหารสำเร็จรูปสูตรทางการค้าทำให้ค่าใช้จ่ายค่าอาหารเพิ่มขึ้น กิโลกรัมละ 1 และ 2 บาท ตามลำดับ แต่เมื่อคำนวณต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัม พบว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปสูตรทางการค้าที่เสริมน้ำมันปลา (T2) และน้ำมันปลา (T3) มีต้นทุนค่าอาหารที่ต่ำกว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปสูตรทางการค้า (ชุดควบคุม) 23.6–24.6 บาทต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันปลาเข้มข้นและน้ำมันปลามีส่วนประกอบของกรดอะมิโนอิสระและกรดไขมันที่มีคุณสมบัติช่วยดึงดูดการกินอาหารของปลา ทำให้อาหารมีความน่ากินมากขึ้นปลาเข้ามากินอาหารเร็วขึ้นสูญเสียอาหารน้อยลง ใช้อาหารน้อยลง จึงทำให้ต้นทุนค่าอาหารลดลง (Rawat *et al.*, 2018) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wattanakul *et al.* (2014) ที่รายงานว่า การใช้ไขมันปลาเข้มข้นทดแทนปลาปน 50% ในสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงปลาช่อนทำให้ต้นทุนค่าอาหารลดลง 40.28 บาทต่อกิโลกรัม และการใช้น้ำมันปลาเข้มข้นทดแทนปลาปน 50% ในสูตรอาหารโปรตีน 40% สำหรับเลี้ยงปลากะพงขาว ทำให้ต้นทุนค่าอาหารลดลง 12.43 บาทต่อกิโลกรัม (Wattanakul *et al.*, 2017b)

Table 2 Growth performance, feed conversion ratio and survival rate of *Ompok bimaculatus* fed with different diets

Parameters	Experimental diets		
	Commercial feed (Control)	Commercial feed supplemented with fish condensate	Commercial feed supplemented with oil
Initial weight (g)	9.17 ± 1.24^a	8.05 ± 0.5^a	8.24 ± 0.03^a
Final weight (g)	26.61 ± 3.17^a	30.55 ± 7.04^a	30.37 ± 4.01^a
Final length (cm)	15.32 ± 1.05^a	15.35 ± 1.05^a	15.66 ± 1.45^a
Weight gain percentage (%)	192.93 ± 47.36^a	278.39 ± 79.15^a	268.58 ± 49.97^a
Daily weight gain (g/day)	0.19 ± 0.04^a	0.25 ± 0.08^a	0.25 ± 0.04^a
Specific growth rate (%/day)	1.19 ± 0.18^a	1.46 ± 0.24^a	1.44 ± 0.16^a
Feed conversion ratio	2.93 ± 0.70^a	2.03 ± 0.69^b	1.93 ± 0.38^b
Survival rate (%)	89.33 ± 3.06^b	97.33 ± 1.15^a	99.33 ± 1.15^a

Data are presented as means $\pm$ SD obtained from three replicates and values in the same row with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

Table 3 Feed price and feed cost per kilogram of fish

Experimental diets	Feed price (Baht/kg)	Feed cost per kilogram of fish (Baht/kg)
Commercial feed (Control)	28.5	83.5±20.0 ^a
Commercial feed supplemented with fish condensate	29.5	59.9±20.3 ^b
Commercial feed supplemented with fish oil	30.5	58.9±11.7 ^b

Data are presented as means ± SD obtained from three replicates and values in the same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

4. สรุป

การประยุกต์ใช้น้ำหนึ่งปลาเข้มข้นและน้ำมันปลา ซึ่งเป็นเศษเหลือจากการผลิตปลาป่นมาคลุกอาหารปลาสำเร็จรูปสูตรทางการค้า ชนิดเม็ดลอยน้ำ โปรตีน 27.3% ในอัตรา 10 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เลี้ยงปลาชะโอน ขนาดน้ำหนักเฉลี่ย 8.05 ± 0.5 - 9.17 ± 1.24 กรัม เป็นระยะเวลา 3 เดือน ทำให้อัตรารอดเพิ่มมากขึ้น 8-10% อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อลดลง 0.9-1.0 และต้นทุนค่าอาหารลดลง 23.6-24.6 บาทต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัม ซึ่งเกษตรกรสามารถนำไปเป็นแนวทางในการลดต้นทุนค่าอาหารในการเลี้ยงปลาชะโอนได้

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากโครงการยุวชนอาสาประจำปีงบประมาณ 2566 ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และสถานที่ดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. **Official methods of analysis**. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg.
- APHA. 1995. **Standard methods for the examination of water and waste water**. 10th ed. American Public Health Association, Washington.
- Bhatnagar, A. and Devi, P. 2013. Water quality guidelines for the management of pond fish culture. **International Journal of Environmental Sciences** 3(6): 1980-2009.
- Biswas, P., Jena, A.K., Patel, A.B. and Pandey, P.K. 2020. Dietary protein requirement of Indian Butter catfish, *Ompok bimaculatus* (Bloch) fingerlings. **Journal of Applied Aquaculture** 32(2): 107-123.

- Chawpaknam, C. and Bowonsupakijkul, S. 2003. Dietary energy requirement for *Ompok bimaculatus* (Bloch), pp. 163-170. In **Academic Conference Kasetsart University 41st**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Dullyasiriwit, N. 2019. **Effects of stocking densities on growth performance of Butter catfish *Ompok bimaculatus* (Bloch, 1794) at 2 different sizes in Cages**. Technical Paper No. 2 /2019. Inland Aquaculture Research and Development, Regional Center 7 (Chon Buri), Department of Fisheries. (in Thai)
- Havasi, M., Kumar, S., Nagy, Z., Beliczky, G., Nagy, S., Bercsényi, M. and Gal, D. 2015. Effects of feeding regime on growth feed conversion and size variation of *Silurus glanis*. **Croatian Journal of Fisheries** 73: 142-147.
- Islam, A., Samad, A., Paul, D., Asif, A. and Hossain, A. 2021. Feeding frequency on the growth and production of endemic near-threatened *Ompok pabda* (Hamilton 1822) in pond setup. **Asian-Australasian Journal of Bioscience and Biotechnology** 6(2): 89-102.
- Monwar, M.M., Sarker, R.A. and Das, N.G. 2013. Polyculture of seabass with tilapia for the utilization of brown fields in the coastal areas of Cox's Bazar, Bangladesh. **International Journal of Fisheries and Aquaculture** 5(6): 104-109.
- Paul, B.N., Bhowmick, S. Chanda, S., Sridhar, N. and Giri, S.S. 2018. Nutrient profile of five freshwater fish species. **SAARC Journal of Agriculture** 16(2): 25-41.
- Pechsiri, J., Chainapong, T. and Panritdam, T. 2021. The efficiency of catfish processing waste in

- the formulated diets on cage culture of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*). **Wichcha Journal** 40(1): 16-30. (in Thai).
- Plaipetch, P., Tamtin, M., Kuekaew, J., Chonchuenchob, P. and Siritanawongsa, B. 2014. Evaluation on optimum dietary n-3/n-6 fatty acids ratio for growth of Asian sea bass, *Lates calcarifer* (Bloch, 1790) using the commercially practical diet. **KKU Research Journal** 19(1): 119-130. (in Thai)
- Rawat, P., Siddhnath, Singh, S.M., Bharti, R.K., Verma, N. and Chirwatkar, B. 2018. *Ompok bimaculatus* rearing potential with feed attractants used in aquaculture. **International Journal of Pure Applied Bioscience** 6(6): 621-634.
- Rem, P., Chiayvareesajja, S. and Suanyuk, N. 2020. Effects of temperature on growth performance and water quality in culture system of butter catfish (*Ompok bimaculatus*). **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 42(6): 1253-1258.
- Somboon, S. and Semachai, V. 2014. The optimum level of cassava meal, corn meal, and broken rice in processing floating diets for Nile tilapia, (*Oreochromis niloticus*). pp. 258-265. In **Academic Conference Kasetsart University 52nd**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Wattanakul, W., Wattanakul, U. and Ishaak, J. 2014. The effects of using liquid fish condensate as fishmeal replacement in diet on growth and survival rate of striped snake-head fish (*Channa striatus*). **RMUTSB Academic Journal** 2(2): 121-130. (in Thai)
- Wattanakul, W., Wattanakul, U., Thongprajukaew, K. and Muenpo, C. 2017a. Optimal protein replacement of fish meal by mackerel condensate in diet for giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). **Aquaculture Research** 48: 697-710.
- Wattanakul, W., Wattanakul, U. and Ishaak, J. 2017b. **Research Report on Effects of palm kernel meal and fishes condensate incorporation in diet of seabass (*Lates calcarifer* Bloch, 1790) to reduce production cost**. Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- Wattanakul, W., Wattanakul, U., Thongprajukaew, K. and Muenpo, C. 2017c. Fish condensate as effective replacer of fish meal protein for striped snakehead, *Channa striata* (Bloch). **Fish Physiology and Biochemistry** 43: 217-228.
- Wattanakul, U., Wattanakul, W. and Thongprajukaew, K. 2019. Optimal replacement of fish meal protein by stick water in diet of sex-reversed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Animals** 9: 521.
- Yaovarat, B. and Chomphunich, J. 2017. **Efficiency of Brewer's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) as supplementary feed for *Ompok bimaculatus* (Bloch,1794) in gage**. Annua Report 2017. Inland Aquaculture Research and Development, Regional Center 7 (Chon Buri), Department of Fisheries. (in Thai)



Research Article

การผลิตน้ำทะเลเทียมเพื่อการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) ในระบบปิด

Artificial Seawater Production for Pacific White Leg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Culture in Closed System

จุฑามาศ ทะแกล้วพันธุ์*

Chuthamat Thaklaewphan *

สาขาวิชาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000

Department of Aquaculture, Faculty of Agricultural Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Muang, Phetchaburi 76000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-07-20

Revised: 2024-10-09

Accepted: 2025-03-05

Keywords:

artificial seawater;

pacific white shrimp;

sea salt;

Concentrated brine a by-product of Thai sea salt farming can be used for raising low-salinity marine shrimp in a closed system. However, transporting and storing brine remain challenging, and its mineral composition is unstable. This research aims to study the effect of different artificial seawater treatments, flowers of salt and artificial seawater prepared from concentrated salt water on the growth of white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in a closed system using a completely randomized design. The experiment included three treatments: "(1) a control unit using brine (280 ppt) from a Naklua farm, (2) flower of salt obtained from the farm, and (3) artificial seawater prepared from 60 ppt. concentrated saltwater used to accelerate crystallization. Seventy-two shrimp with an initial average weight of 11.42 ± 2.21 g were randomly placed into 200-liter fiber tanks at a density of 8 shrimp/m², with constant aeration for 60 days, while water salinity was maintained at 15 ppt. Monitoring parameters included shrimp weight, survival rate, molting frequency, and water quality. The results showed that weight gain and survival rates of shrimp across all treatments were not statistically different ($p > 0.05$). Specifically, the survival rates for treatments 1, 2, and 3 were 98.0%, 97.3%, and 97.5%, respectively. However, FCR values in treatments 2 and 3 were lower than in treatment 1. ($p < 0.05$) The color of boiled shrimp was compared using the Munsell Color Book, resulting in 5YR 5/12, 5YR 7/6, and 5YR 6/8, respectively. The result from the sensory evaluation of appearance, odor, taste, and texture of shrimp showed that the three artificial seawater formulations received scores ranging from 6.47 to 6.77 ("like moderately"). Therefore, artificial seawater produced from brine and flowers of salt can be used, as the growth, survival rate, and sensory evaluation were not significantly different from those of conventional saline cultures.

* Corresponding author.

E-mail address: Chuthamat.tha@mail.pbru.ac.th

Cite this article as:

Thaklaewphan, C. 2025. Artificial Seawater Production for Pacific White Leg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Culture in Closed System. **Recent Science and Technology** 17(2): 259815.

บทคัดย่อ

น้ำเค็มเข้มข้นเป็นผลพลอยได้จากการทำนาเกลือของไทยสามารถนำมาใช้ในการเลี้ยงกุ้งทะเลความเค็มต่ำในระบบปิด แต่การขนส่งน้ำเค็มเข้มข้นไปยังพื้นที่การเลี้ยงและการเก็บรักษายังมีความยุ่งยาก และน้ำเค็มมีองค์ประกอบของแร่ธาตุไม่คงที่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของการใช้น้ำเค็มเข้มข้นในนาเกลือ ดอกเกลือและน้ำทะเลเทียมที่เตรียมได้จากน้ำเค็มเข้มข้นที่มีต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) ซึ่งเลี้ยงในระบบปิด วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (CRD) -3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 เป็นชุดควบคุม ใช้น้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือความเค็ม 280 ส่วนในพันส่วน ชุดการทดลองที่ 2 ใช้น้ำดอกเกลือที่ได้จากนาดิน ชุดการทดลองที่ 3 ใช้น้ำทะเลเทียมที่เตรียมจากน้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือ 60 ส่วนในพันส่วนแล้วนำมาเร่งการตกผลึก กุ้งทดลองมีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 11.42 ± 2.21 กรัม คัดกุ้งที่มีขนาดใกล้เคียงกันมา 72 ตัว จากนั้นทำการสุ่มปล่อยลงเลี้ยงในถังไฟเบอร์ขนาด 200 ลิตร อัตราความหนาแน่น 8 ตัวต่อตารางเมตร ให้อากาศตลอดเวลา ควบคุมความเค็มของน้ำ 15 ส่วนในพันส่วน เก็บตัวอย่างกุ้งเพื่อชั่งน้ำหนัก อัตรารอด ความถี่ในการลอกคราบ และตรวจวัดคุณภาพน้ำ ระยะเวลาการเลี้ยง 60 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและอัตราการรอดของกุ้งในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) อัตรารอด 95.83, 91.67 และ 91.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($p > 0.05$) แต่อัตราแลกเนื้อของชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 ($p < 0.05$) และผลการเทียบสีของกุ้งตรงกับสมุดวัดสีของมัลเซลล์พบว่าสีของกุ้งมีรหัส 5YR 5/12, 5YR 7/6 และ 5YR 6/8 ตามลำดับ ผลจากการประเมินทางประสาทสัมผัสด้านรูปลักษณ์ กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของกุ้ง พบว่า สูตรน้ำทะเลเทียมทั้ง 3 สูตร มีระดับการยอมรับโดยรวมของกุ้ง ได้คะแนนตั้งแต่ 6.47 ถึง 6.77 (ระดับ “ชอบปานกลาง”) ดังนั้น ผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ น้ำทะเลเทียมหรือดอกเกลือได้โดยให้ผลการเจริญเติบโต อัตรารอด และผลการประเมินทางประสาทสัมผัสที่ไม่แตกต่างจากการใช้น้ำนาเกลือเลี้ยงตามปกติ

คำสำคัญ: น้ำทะเลเทียม, กุ้งขาวแวนนาไม, เกลือทะเล

1. บทนำ

ระบบการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) เชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบันจะนำน้ำเค็มจากนาเกลือมาผสมกับน้ำจืดและเลี้ยงในบ่อระบบความเค็มต่ำ ภายใต้การจัดการเลี้ยงระบบปิด ปล่อยกุ้งเลี้ยงในอัตราความหนาแน่นสูง แต่การนำน้ำเค็มจากนาเกลือขนส่งไปยังพื้นที่ในการเลี้ยงนั้นใช้ทรัพยากรทุกน้ำเค็มเฉพาะ ซึ่งยุ่งยากต่อการจัดการขนส่งและอาจมีความเสี่ยงต่อสารปนเปื้อนที่เกิดจากกักตรอนของน้ำเค็มต่อภาชนะบรรจุ อีกทั้งหากเปลี่ยนน้ำเค็มให้อยู่ในรูปของผลึกของแข็งที่เรียกว่าน้ำทะเลเทียมจะมีข้อดีต่อการขนส่ง การเก็บรักษา และการจัดการเนื่องจากน้ำเค็มเข้มข้นที่ถูกตกผลึกแล้วนำไปผสมแร่ธาตุต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของกุ้งนั้นจะมีความคงตัวขององค์ประกอบของเกลือแร่ มีการเก็บรักษา และการขนส่งทำได้สะดวกเนื่องจากบรรจุในกระสอบเป็นภาชนะห่อหุ้มมิดชิด อีกทั้งยังป้องกันการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นได้ ปัญหาต่าง ๆ ที่พบในการเลี้ยง เช่น โรคของกุ้ง ภูมิอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย จึงนำมาสู่การเลี้ยงกุ้งในระบบปิด องค์ประกอบแร่ธาตุในน้ำที่ใช้เลี้ยงก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเลี้ยงกุ้งให้ประสบผลสำเร็จที่ดี เพราะน้ำทะเลและเลือดของสัตว์ทะเลมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน องค์ประกอบของน้ำทะเลจากอ่าวไทย 100 กรัม เมื่อทำแห้งโดยไม่มีการเก็บผลผลิตเกลือออกในกระบวนการผลิตที่มีความชื้นร้อยละ 11.8 พบว่ามีแร่ธาตุ

หลัก ได้แก่ แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม คลอไรด์ ซัลเฟต เป็นต้น (Sirithanawong and Thakleawphan, 2019) เมื่อทำให้น้ำทะเลแห้งก็จะเกิดผลึกเกลือที่ได้จากการตากน้ำทะเล ซึ่งเป็นของแข็งมีปริมาณแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างไปจากเดิม แต่ยังคงมีชนิดของแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบคล้ายเดิม แม้ว่านักเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะพยายามในการพัฒนาสูตรน้ำทะเลเทียมเพื่อใช้ในการเลี้ยงสัตว์ทะเลในระบบปิดมาอย่างยาวนาน แต่ความนิยมในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมระบบความเค็มต่ำแต่ความหนาแน่นสูงโดยใช้เทคโนโลยีแบบพัฒนายังยวดยในปัจจุบันได้เป็นโจทย์ใหม่ที่ทำนายระบบการเลี้ยงกุ้งเพื่อความยั่งยืน เพราะเกลือแร่ที่เคยมีอย่างเพียงพอในน้ำทะเลของระบบการเลี้ยงปกติจะส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตและอัตราการรอดของกุ้ง (Keawla-iad and Pratoomchat, 2010) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลี้ยงในระบบความเค็มต่ำแต่ปล่อยกุ้งแน่นมากยิ่งส่งผลกระทบต่อระดับของ Na และ K ในระบบเลี้ยง ซึ่งมีผลต่อกิจกรรมของ $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ ซึ่งมีความสำคัญต่อการควบคุมสมดุลออสโมติกในระบบของสัตว์มีกระดูกสันหลัง ร่างกายกุ้ง ตลอดจนความเค็มน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่น (Serrano *et al.*, 2007) ที่มีการรักษาสมดุลเกลือแร่และสมดุลออสโมติก (iso-osmotic and ionic points) ในการเลี้ยง ในปัจจุบันพบว่ามีการใช้แร่ธาตุเสริมในการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมเพื่อจุดมุ่งหมายที่แตกต่างกันไป ได้แก่ การเพิ่มการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตาย (Nehru *et al.*, 2018) การเพิ่มผลผลิตในระบบการเลี้ยง

แบบผสมผสานไฮโดรโพนิคส์ (Armenta-Bojórque *et al.*, 2021) การเสริมระบบภูมิคุ้มกัน การลดต้นทุนการผลิต การควบคุมโรค (Citarasu *et al.*, 2022) การปรับปรุงคุณภาพน้ำ การส่งเสริมสุขภาพลำไส้และระบบย่อยอาหาร การลดมลพิษทางน้ำ (Lin *et al.*, 2005; Moura *et al.*, 2023) เป็นต้น แต่ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นที่จะผลิตน้ำทะเลเทียมจากเกลือทะเลเป็นแหล่งแร่ธาตุเสริมในระบบการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในระบบปิดเพื่อให้กุ้งขาวแวนนาไมมีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดที่ดี ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในการใช้แร่ธาตุเสริมในระบบการเลี้ยงแบบปิดโดยใช้น้ำเค็มเข้มข้นที่เหลือในนาเกลือมาพัฒนาต่อยอดให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกพร้อมใช้ในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการเตรียมเกลือทะเลที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมการผสมแร่ธาตุกับเกลือเพื่อทำน้ำทะเลเทียมในการทำการทดลองประกอบไปด้วย ชุดการทดลองที่ 1 ชุดควบคุม ใช้น้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือผสมน้ำจืดเลี้ยงโดยไม่ต้องผสมแร่ธาตุ ชุดการทดลองที่ 2 ใช้ดอกเกลือที่ได้จากนาดินของเกษตรกรผสมกับปูนโดโลไมท์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำไปละลายน้ำจืดเพื่อเตรียมน้ำให้มีความเค็มตามต้องการ ชุดการทดลองที่ 3 ใช้น้ำทะเลเทียมที่เตรียมจากน้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือ 60 ส่วนในพันส่วน แล้วนำมาเร่งการตกผลึก เป็นเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมงหรือให้ได้ความเค็มประมาณ 180-200 ส่วนในพันส่วน จากนั้นนำไปตกผลึกในกระบะพลาสติกในโรงเรือนเป็นเวลาประมาณ 1 สัปดาห์ จึงเริ่มเก็บเกลือเพื่อนำไปผสมกับแร่ธาตุต่อไป นำเกลือที่ตกผลึกแล้วไปผสมปูนโดโลไมท์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปูนขาว 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำไปละลายน้ำจืดเพื่อเตรียมน้ำให้มีความเค็มตามต้องการ

จากนั้นนำตัวอย่างเกลือและน้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือไปวิเคราะห์โดยการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการที่ผู้ผลิตเครื่องมือระบุ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเกลือทะเลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) ร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy / EDS/EDX) (Thammanon and Aussavamas, 2012) โดยใช้ EDS, Element and Chemical Analysis by Oxford Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS

model INCA-350 และ SEM, micrograph by JEOL Electron Microscope : SEM model JSM-5410 LV , ประเทศญี่ปุ่น

การเตรียมน้ำทะเลเทียมเริ่มโดยการนำตัวอย่างเกลือและน้ำเค็มมาเกลือไปวิเคราะห์ ลักษณะของผลึกเมื่อพิจารณาผ่านภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุหลักองค์ประกอบธาตุในเกลือทะเลที่เป็นวัตถุุดิบในการผลิตน้ำทะเลเทียมแต่ละสูตรที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี SEM-EDS จากตัวอย่างซึ่งจะถูกวิเคราะห์ออกมาเป็นอัตราส่วนร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์เพื่อความสะดวกในการอ่านค่าปริมาณ การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี ทำให้ทราบถึงองค์ประกอบธาตุชนิดต่าง ๆ ในเกลือทะเลซึ่งผลิตด้วยวิธีการต่าง ๆ กัน ซึ่งโดยปกติแล้วเกลือทะเลจะมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก ๆ คือ NaCl และมีส่วนประกอบรอง ได้แก่ KCl, MgCl, Mg₂SO₄, NaSO₄, Al₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, CaO และ Fe₂O₃ ฯลฯ การมีองค์ประกอบในสัดส่วนที่แตกต่างกันส่งผลให้สีฐานของผลึกเกลือที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างน้ำเค็มที่ใช้ในการทดลองชุดการทดลองต่าง ๆ มีรูปทรงแตกต่างกัน ทั้งนี้ ลักษณะผลึกของชุดการทดลองที่ 1 เตรียมตัวอย่างโดยการนำไปต้มจนกระทั่งแห้งและตกผลึกเป็นของแข็ง สีขาวขุ่น รูปทรงไม่สม่ำเสมอแทรกด้วยผลึกรูปสี่เหลี่ยม ลักษณะผลึกของชุดการทดลองที่ 2 ผลึกสีขาวขุ่นเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า ลักษณะรูปทรงผลึกสม่ำเสมอและมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งกระบวนการผลิตได้จากเกษตรกรนำน้ำทะเลมาตากแดดในกระถางนาดิน เมื่อน้ำทะเลมีความเข้มข้นขึ้นอย่างช้า ๆ โดยอาศัยความร้อนจากแสงแดดและกระแสลมทำให้เกิดการก่อผลึกบริเวณผิวหน้าน้ำ เกาะตัวกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ แล้วค่อยก่อผลึกหนาแน่นขึ้นจนกระทั่งจมตัวลงที่ผิวน้ำเมื่อเกลือเกาะตัวกันหนาขึ้น เกษตรกรจะใช้สวิงค่อย ๆ ช้อนแผ่นเกลือบริเวณผิวหน้าน้ำเค็มรวบรวมใส่ชั่งไม้เพื่อรอให้น้ำไหลออก แผ่นเกลือแห้งลงแล้วจึงแตกออกจากกันเป็นเกล็ดเกลือเล็ก ๆ เรียกว่า ดอกเกลือ หรือเกสรเกลือ มักพบว่ามียิ่งเจือปนน้อย มีสีขาว และมีรสเค็มปนหวาน มีโซเดียมคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ชุดการทดลองที่ 3 ผลึกมีขนาดใหญ่ สีขาวใส เป็นรูปทรงเหลี่ยมด้านไม่เท่า ได้จากการเตรียมโดยให้ความร้อนจากแก๊สทุ้งต้มอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตากไว้ในกระบะพลาสติกประมาณ 18-24 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งตกผลึกได้ปริมาณตามต้องการ เพื่อให้เข้าใจถึงสภาพเกลือทะเลที่นำมาใช้น้ำทะเลเทียมสูตรต่าง ๆ ว่ามีคุณสมบัติเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร จึงจะนำผล

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเกลือทะเลที่ผลิตขึ้น
จากวิธีการต่าง ๆ (ดังแสดงในตารางที่ 1) มาประกอบ

ก่อนที่จะได้พิจารณาคุณภาพน้ำเค็มที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาวในชุด
การทดลองต่าง ๆ ต่อไป

Table 1 Mean values of the chemical composition of artificial seawater in treatments (N=2 points)

Chemical composition (% by weight)	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3
Na	34.96	27.29	28.32
Cl	48.81	55.99	49.64
O	8.16	10.72	16.49
Ca	1.05	0.40	0.53
Mg	1.05	1.16	2.72
K	0.14	0.11	0.88
S	0.94	0.00	1.19
C	0.00	8.40	0.00
Al	0.00	0.19	0.24

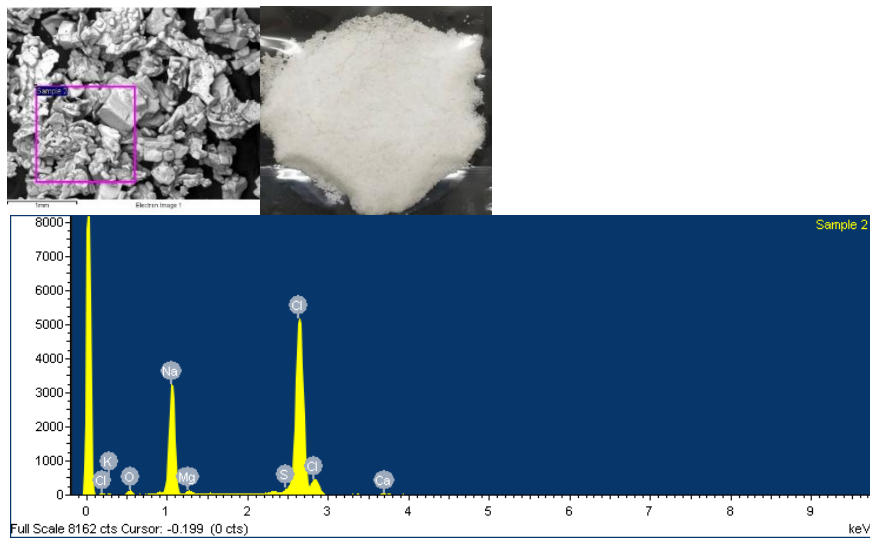


Figure 1 SEM images and XRD patterns of seawater crystals synthesized from brine 280 ppt in treatment 1.

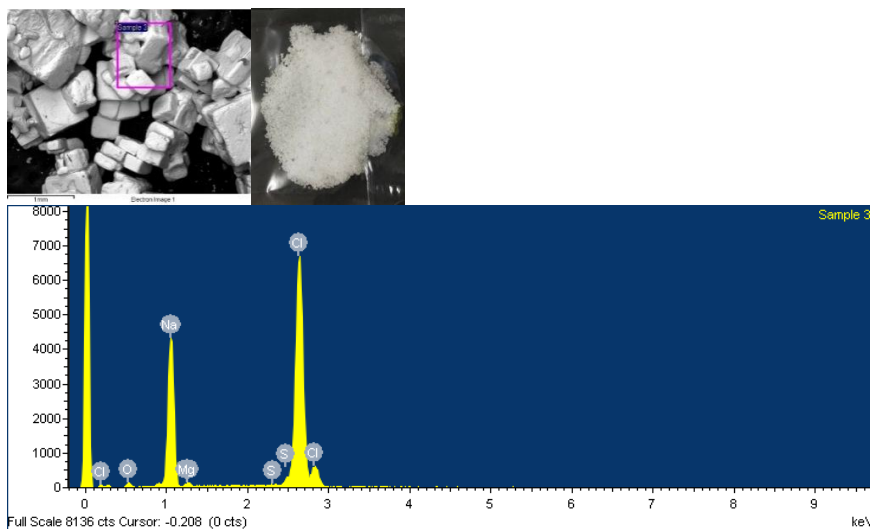


Figure 2 SEM images and XRD patterns of seawater crystals synthesized from flower of salt from the farm in treatment 2.

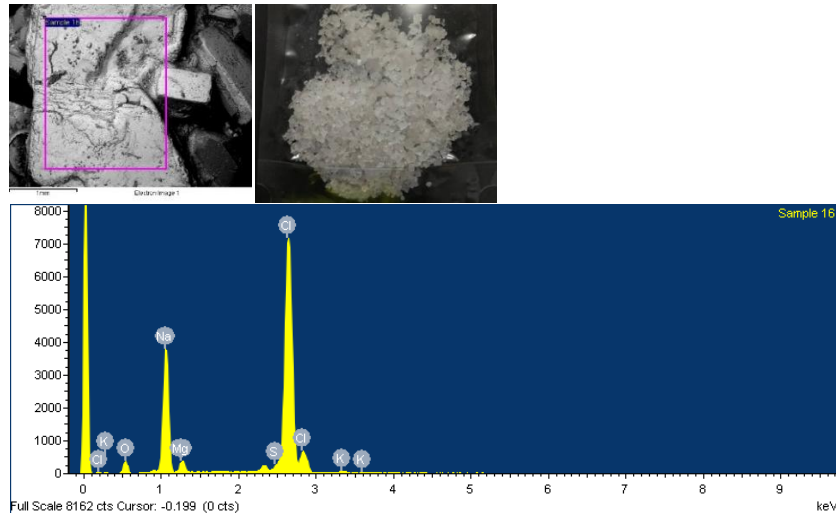


Figure 3 SEM images and XRD patterns of seawater crystals synthesized from brine 60 ppt in treatment 3.

2.2 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ประกอบด้วยชุดการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ๆ ละ 3 ซ้ำ ชุดการทดลองที่ 1 ชุดควบคุม ใช้น้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือ 280 ส่วนในพันส่วน ผสมน้ำจืดเลี้ยง ชุดการทดลองที่ 2 ใช้น้ำจืดเกลือที่ได้จากนาดินของเกษตรกร ชุดการทดลองที่ 3 ใช้น้ำทะเลเทียมที่เตรียมจากน้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือ 60 ส่วนในพันส่วน แล้วนำมาเร่งการตกผลึก

2.2.1 เตรียมพันธุ์กุ้งขาวแวนนาไมจากบ่อดินโดยติดต่อกับเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง ฟาร์มบ้านทุ่งเพื่อ ตำบลบางครก อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ขนย้ายกุ้งจากบ่อดินมาพักในบ่อไฟเบอร์กลาสขนาด 2x3 เมตร จำนวน 270 ตัว โดยคัดขนาดเท่า ๆ กัน มาดำเนินการทดลองที่โรงเพาะพัก คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

2.2.2 เตรียมถังกลไฟเบอร์ขนาด 200 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.2 เมตร จำนวน 9 ถัง พร้อมเครื่องให้อากาศ นำน้ำเค็มที่มีความเค็ม 15 ส่วนในพันส่วนซึ่งเป็นระดับความเค็มที่เกษตรกรใช้เลี้ยงในพื้นที่ที่ดำเนินการวิจัย ฆ่าเชื้อโดยใส่คลอรีนความเข้มข้น 30-50 ส่วนในล้านส่วน แล้วเติมน้ำเพื่อให้อากาศ ละลายสีน้ำและใส่จุลินทรีย์และปูนขาวเพื่อปรับสภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ปล่อยกุ้งลงบ่อ 8 ตัวต่อตารางเมตร โดยเป็นกุ้งขาวแวนนาไมจากบ่อเลี้ยงของเกษตรกรมาปล่อยในถังไฟเบอร์กลม กุ้งมีน้ำหนักเฉลี่ย 11.42 ± 2.21 กรัม ให้อากาศด้วยหัวทรายตลอดเวลาและทำระบบหมุนเวียนน้ำ วัดระดับน้ำที่มีการระเหยไปเพื่อเติมน้ำให้เท่าระดับเดิม จดปริมาณน้ำที่เติมเข้าในระบบเพื่อนำไปคำนวณต้นทุนการใช้น้ำ ดังสมการที่ 1 และ 2

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเลี้ยง (ลิตร/วัน) = (ปริมาณน้ำเริ่มต้น + ปริมาณน้ำที่เติมลงไป) / ระยะเวลาที่ใช้เลี้ยง (วัน) 1

ต้นทุนการใช้น้ำ (บาท/วัน) = ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเลี้ยง (ลิตร/วัน) x ต้นทุนน้ำต่อหน่วย (บาท/ลิตร) 2

2.3 การเตรียมอาหารโดยใช้อาหารกุ้งเชิงพาณิชย์ที่มีขายตามท้องตลาด ประกอบด้วยปริมาณโปรตีนไม่ต่ำกว่า 36% ไขมันไม่มากกว่า 4% กาก 5% และความชื้นอยู่ที่ 12% โดยมีส่วนผสมของปลาหมึกป่น ปลาป่น กากถั่วเหลือง ถั่วเหลืองนึ่ง แปะสาลิ ปลายาว น้ำมันปลา วิตามิน และเกลือแร่ ซึ่งอาหารนี้มีการใช้ในฟาร์มของเกษตรกรอยู่แล้ว ให้อาหารกุ้งทดลองวันละ 2 มื้อ เวลา 8.00 น. และ 16.00 น. ร้อยละ 5-10 ของน้ำหนักตัว จดบันทึกปริมาณการกินอาหารของกุ้ง

2.4 วัดคุณภาพน้ำ ทุก ๆ สัปดาห์ วันละ 2 เวลา ได้แก่ 8.00 น. และ 16.00 น. วัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ความเป็นต่าง ไนโตรที่ แคลเซียมและแมกนีเซียม โพแทสเซียม และค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ ด้วยชุดทดสอบ (test kit) ของบริษัท แอ็ดวานซ์ฟาร์มา จำกัด ส่วนการวัดอุณหภูมิน้ำใช้เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) และวัดความเค็มด้วยเครื่องวัดความเค็ม (Salinometer, ผลิตโดย Shijiazhuang Sanli Grain Sorting Machinery Co., Ltd. Hebei, สาธารณรัฐประชาชนจีน)

2.5 ติดตามการเจริญเติบโตของกุ้งโดยชั่งน้ำหนัก นับจำนวนกุ้งที่ลอกคราบและกุ้งที่ตายเพื่อคำนวณหาอัตราการรอด นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น อัตราการแลกเนื้อ และอัตราการรอดตาย (สมการที่ 3-7) ซึ่งสูตรการคำนวณมีดังต่อไปนี้

น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย (กรัม) (Initial weight) = น้ำหนักกุ้ง
ขาววันแรกของการทดลอง/จำนวนตัวกุ้งขาว 3

น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย (กรัม) (Final weight) = น้ำหนักกุ้ง
ขาววันสุดท้ายของการทดลอง/จำนวนตัวกุ้งขาว 4

น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (กรัมต่อตัว) (weight gain) =
น้ำหนักที่เพิ่มเฉลี่ย/จำนวนวันที่เลี้ยง 5

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) (Feed conversion
ratio) = น้ำหนักของอาหารทั้งหมดที่กิน/น้ำหนักกุ้งที่
เพิ่มขึ้น 6

อัตราการรอดตาย (%) (Survival rate) = จำนวนวันที่
เลี้ยง/จำนวนกุ้งที่ปล่อย x 100 7

2.6 หลังการทดลองนำกุ้งในแต่ละชุดการทดลอง
ไปต้มเพื่อเทียบสี โดยเตรียมเนื้อกุ้งต้มแบ่งใส่ในถ้วยแล้วใช้
การพินิจเทียบค่าสีกับสมุด Munsell book เพื่อสังเกตสีของ
เปลือกกุ้งต้มเชิงคุณภาพและทดสอบทางประสาทสัมผัส
ของกุ้งต้ม ในการประเมินความพึงพอใจทางประสาทสัมผัส
แบบ 7-point hedonic scale ให้อาสาสมัครจำนวน 30 คน
ประเมินความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านลักษณะที่
ปรากฏ (appearance) ด้านสี (color) ด้านรสชาติ (taste)
ด้านกลิ่น (odor) ด้านเนื้อสัมผัส (texture) และความพึง
พอใจโดยรวม (overall satisfaction) มีเกณฑ์ในการให้
คะแนน 7 ระดับ คือ 1 = ไม่ชอบมาก, 2 = ไม่ชอบปาน
กลาง, 3 = ไม่ชอบเล็กน้อย, 4 = เฉย ๆ, 5 = ชอบเล็กน้อย,
6 = ชอบปานกลาง และ 7 = ชอบมาก ทดสอบชิม โดยวาง
แผนการทดลองแบบ Randomized Completely Block
Design (RCBD) แล้วบันทึกผล

2.3 การบันทึกผลและวิเคราะห์ข้อมูล

การติดตามการเจริญเติบโตโดยการชั่งน้ำหนัก
ตรวจวัดคุณภาพน้ำ ทำการนับจำนวนตัวกุ้งที่เหลือรอดแล้ว
นำไปคำนวณหาอัตราการรอด รวมระยะเวลาในการเลี้ยง 60
วัน ทำการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย น้ำหนัก
สุดท้ายเฉลี่ย น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น อัตราการแลกเนื้อ และ
อัตราการรอดตาย และผลการประเมินประสาทสัมผัสโดย
การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance:
ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบ
ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test
(DMRT) โดยโปรแกรมคำนวณ R

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การผลิตน้ำทะเลเทียมและคุณสมบัติที่ส่งผลต่อคุณภาพ น้ำในการเลี้ยง และต้นทุนการผลิตน้ำทะเลเทียม

การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตน้ำทะเลเทียมใน
สูตรต่าง ๆ เมื่อได้คำนวณการใช้น้ำในการเลี้ยงกุ้งต่อรอบ
การผลิตพบว่าการใช้น้ำในแต่ละชุดการทดลอง 60 วัน
คิดเป็นปริมาตร 9 ลูกบาศก์เมตรต่อชุดการทดลองต่อรอบ
การผลิต ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณต้นทุนการใช้น้ำพบว่า น้ำ
ทะเลเทียมสูตรดอกเกลือในชุดการทดลองที่ 2 ใช้ดอกเกลือ
ที่ได้จากนาดินของเกษตรกร มีต้นทุนการผลิตและต้นทุน
ค่าน้ำต่ำที่สุดเนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนและ
ใช้พลังงานธรรมชาติอาศัยแสงแดดและแรงลมพัดให้น้ำมี
การระเหย ดอกเกลือจึงได้มาจากการช้อนผลึกเกลือที่ตาก
น้ำอยู่ในนาผ่ของเกษตรกรแล้วนำมาบรรจุกระสอบ พร้อม
ขนย้ายเพื่อนำไปใช้ได้เลย แต่น้ำทะเลเทียมสูตรที่ได้จาก
ชุดการทดลองที่ 1 และ 3 ต้องนำน้ำเค็มเข้มข้นจากนาเกลือ
มาผสมกับน้ำจืดแล้วนำมาผ่านกระบวนการเร่งการตกผลึก
โดยการต้มแล้วนำไปตากจนได้ผลึกแห้ง ซึ่งชุดควบคุม ใช้
น้ำเค็มเข้มข้นนาเกลือ 280 ส่วนในพันส่วน ผสมน้ำจืดเลี้ยง
ชุดการทดลองที่ 3 ใช้น้ำทะเลเทียมที่เตรียมจากน้ำเค็ม
เข้มข้นนาเกลือ 60 ส่วนในพันส่วน แล้วนำมาเร่งการตก
ผลึก ต้นทุนการผลิตน้ำทะเลเทียมชุดการทดลองที่ 1, 2
และ 3 จึงมีค่า 2.57, 1.8 และ 12 บาทต่อน้ำทะเลเทียม 1
กิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนต้นทุนค่าน้ำที่ใช้ต่อรอบการผลิต
ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 346.95, 243 และ
1,620 บาท ตามลำดับ

คุณภาพน้ำในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม พบว่า
คุณสมบัติของน้ำทั่วไปอยู่ในเกณฑ์ปกติและเหมาะสมต่อ
การเจริญเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไม แม้จะระดับความเค็ม
ที่ 15 ส่วนในพันส่วนในการทดลองนี้อาจจะเป็นความเค็มที่
ต่ำกว่าการทดลองของ Keawla-iad and Pratoomchat
(2010) ที่พบว่าความเค็ม 25 ส่วนในพันส่วน เป็นระดับที่
เหมาะสมในการเลี้ยงกุ้งขาว เนื่องจากมีการควบคุมสรีระ
เคมีภายในร่างกายได้ดี แต่ก็พบว่าเกษตรกรในพื้นที่การ
วิจัยนิยมเลี้ยงที่ระดับความเค็มนี้ ส่วนอุณหภูมิตลอดการ
ทดลองในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม พบว่า มีอุณหภูมิอยู่
ในช่วง 28-32 องศาเซลเซียสจึงเหมาะสมในการเลี้ยงกุ้ง
ขาวแวนนาไม โดยอุณหภูมิของน้ำในการเลี้ยงกุ้งขาวแวน
นาไมที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 28-33 องศาเซลเซียส
(Laisutisan *et al.*, 2010) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
ของน้ำอย่างรวดเร็วก็จะเกิดการช็อกเกร็งได้ มีลักษณะ
คล้ายเป็นตะคริว ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7.8-8.2
ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม (Charenphak *et al.*, 2020) ทำ
ให้กุ้งเจริญเติบโตได้ดี ทั้งนี้ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีผล
ต่อการละลายของแร่ธาตุในดินโดยจะแปรผกผันกับการ
ละลายของแร่ธาตุ ถ้าความเป็นกรดเป็นกรดในน้ำลดลงการ
ละลายของแร่ธาตุจะเพิ่มขึ้น แต่การดูดซึมแร่ธาตุไปใช้ใน

ร่างกายของกุ้งขึ้นอยู่กับเมตาโบลิซึมของกุ้ง ความเป็นต่างของน้ำตลอดจนการทดลองในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมมีค่า 170-187 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยความเป็นต่างที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 80-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแคลเซียม แมกนีเซียม อัตราส่วนของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในน้ำของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ได้แก่ 1:2.55, 1:2.71 และ 1:2.74 ตามลำดับ โพแทสเซียมอยู่ในช่วง 559-1,272 มิลลิกรัมต่อลิตร Suphawinyoo *et al.* (2013) ระบุว่าค่าแมกนีเซียมและโพแทสเซียมที่เหมาะสมควรมีค่า 400 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนการเลี้ยงกุ้งขาวในระบบปิดโดยใช้น้ำทะเลเทียมแนะนำให้ มีค่าแคลเซียม 231-237 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียม 309-347 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพแทสเซียม 200-205 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องมีการเสริมแร่ธาตุตลอดการเลี้ยงเพื่อรักษาระดับปริมาณแร่ธาตุให้คงที่ (Sommart, 2009) ค่าไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0-0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยค่าของไนโตรเจนของน้ำในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่เหมาะสมอยู่ในช่วง ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม (Charenphak *et al.*, 2020) ค่าแอมโมเนียที่เหมาะสมไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Lin and Chen, 2001) หากมีค่าแอมโมเนียหรือไนโตรเจนสูงเกินไป จะดำเนินการลดค่าความเป็นกรดเป็นด่างหรือเจือจางน้ำเสียโดยการเติมน้ำที่มีคุณภาพดีเข้าไป (Lin and Chen,

2003) ค่าออกซิเจนละลายน้ำตลอดการทดลอง อยู่ในช่วง 5-6.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำของน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่เหมาะสมอยู่ในช่วง ไม่ต่ำกว่า 4.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Villareal *et al.*, 1994)

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาคุณลักษณะของเกลือทะเลที่ใช้ทำน้ำทะเลเทียมสูตรต่าง ๆ พบว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 เกลือทะเลที่ได้จากการดอกเกลือและน้ำเค็มเข้มข้น 60 ส่วนในพันส่วนมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกันแต่ชุดการทดลองที่ 3 มี แมกนีเซียม และโพแทสเซียมสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ส่วนชุดการทดลองที่ 1 มีโซเดียมสูงกว่าชุดการทดลองอื่น (ดังแสดงในตารางที่ 1) ด้วยองค์ประกอบที่แตกต่างนี้ แสดงให้เห็นว่า หากจะใช้น้ำบาดาลเค็มหรือน้ำจืดผสมกับน้ำดีเกลือหรือเกลือแกลบมักมีโพแทสเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นต่ำตามระดับการลดความเค็มลงที่ใช้ในการเลี้ยงระบบความเค็มต่ำซึ่งส่งผลเสียต่อการอยู่รอดและการเจริญเติบโตของกุ้ง แต่อาจใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมและแมกนีเซียมเสริมเพื่อจัดการกับความไม่สมดุลของไอออนบวกได้ในการเตรียมน้ำทะเลเทียม ทั้งนี้ต้องเน้นสมดุลของแร่ธาตุที่จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้ง (Boyd *et al.*, 2007; Wudtisai and Boyd, 2011)

Table 2 Water quality parameters of the shrimp culture ponds under different treatments for 60 days (3 replicates).

Parameter	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3
Temperature (°C)	32-37	32-37	30-37
Salinity(ppt)	14-15	14-17	15-17
pH	8-9	8-9	8-9
Nitrite-N (mg/l)	0-0.02	0-0.02	0-0.02
Alkalinity (mg/l)	119-170	119-170	119-170
Total ammonia-N (mg/l)	0-1	0-1	0-1
Calcium (mg/l)	160-280	120-280	160-280
Magnesium (mg/l)	400-650	350-650	450-650
Potassium (mg/l)	559-778	729-1,202	668-1,272
DO (mg/l)	5-6.5	5-6.5	5-6.5

3.2 ผลของการใช้น้ำทะเลเทียมสูตรต่าง ๆ กันที่มีต่อการเจริญเติบโต อัตราการแลกเนื้อ อัตรารอดและความถี่ในการลอกคราบของกุ้งขาวแวนนาไม

เมื่อสิ้นสุดการทดลองทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และอัตราการรอดของกุ้งในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยชุดการทดลองที่ 1 มีน้ำหนักเฉลี่ย 27.88 ± 3.23 กรัม และชุดการทดลองที่ 2 มีน้ำหนักเฉลี่ย 30.38 ± 2.37 กรัม และชุดการทดลองที่ 3 มีน้ำหนักเฉลี่ย 30.87 ± 3.31 กรัม อัตรารอดของกุ้งขาวแวนนาไมในชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีอัตรารอด 95.83, 91.67 และ 91.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาอัตราแลกเนื้อของชุดการทดลองที่ 1 สูงกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 คือ 1.79, 1.31 และ 1.25 ตามลำดับ ($p < 0.05$) (ดังตารางที่ 3) ทั้งนี้ การได้รับแร่ธาตุในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของกุ้งในชุดการทดลองจะส่งผลทำให้กุ้งมีการเจริญเติบโตที่ดี อัตราแลกเนื้อต่ำและอัตรารอดสูง การเพิ่มความหนาแน่นของกุ้งภายในบ่อก็จำเป็นต้องเสริมแร่ธาตุในปริมาณที่สูงขึ้นด้วยสอดคล้องกับการเลี้ยงกุ้งขาวโดยใช้น้ำบาดาลเค็มในสหรัฐอเมริกา ซึ่งเกษตรกรสูบน้ำขึ้นมาจากใต้ดิน (ความเค็มประมาณ 4 ส่วนในพันส่วน) ในเดือนมีนาคมและ

เมษายนของทุกปี เกษตรกรจะนำกุ้งขาวแปซิฟิก *L. vannamei* จากฟาร์มกุ้ง Harlingen ใน รัฐเท็กซัส และแอลบามาจากระบบปรับปรุงพันธุ์กุ้ง รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกามาเลี้ยงในน้ำบาดาลเค็มและเมื่อเสริมด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์เกรดปุ๋ย ($\approx 50\%$ K) และโพแทสเซียมแมกนีเซียมซัลเฟตหรือ KMag® (Mosaic Company, Plymouth, MN, USA) (17.8% K และ 10.5% Mg) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมให้เป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแมกนีเซียมถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติทั่วไปในการเพาะเลี้ยงกุ้งในแอลบามาจะทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นเฉลี่ยจาก 24 ตัวต่อตารางเมตรขึ้นมาที่ความหนาแน่น 27 ตัวต่อตารางเมตรได้สอดคล้องกับการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในบ่อดินในจังหวัดสมุทรสาคร จะเชิงเตรา ปราจีนบุรี และนครนายก ที่เลี้ยงกุ้งด้วยระบบความเค็มต่ำ 1-5 ส่วนในพันส่วน ที่นิยมนำน้ำเค็มจากนาเกลือหรือน้ำบาดาลเค็มมาผสมน้ำจืดในการเลี้ยงเสริมด้วยโพแทสเซียมและแมกนีเซียมเนื่องจากแร่ธาตุนี้มีปริมาณต่ำกว่าปริมาณที่พบในน้ำทะเลซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้ง (Boyd *et al.*, 2007; Wudtisarn and Boyd, 2011; Roy *et al.*, 2007)

Table 3 Average initial weight, average final weight, weight gain, survival rate and FCR of *L. vannamei* nursed under different treatments for 60 days (3 replicates).

Treatment	average initial weight (g/shrimp)	average final weight (g/shrimp)	weight gain (g/shrimp)	survival rate (%)	FCR
1	12.15 ± 2.49^a	27.88 ± 3.23^a	18.73 ± 0.61^a	95.83 ± 7.22^a	1.79^b
2	11.06 ± 2.26^a	30.38 ± 2.37^a	19.31 ± 0.51^a	91.67 ± 7.22^a	1.31^a
3	11.40 ± 2.06^a	30.87 ± 3.31^a	19.46 ± 0.46^a	91.67 ± 7.22^a	1.25^a
P-Value	0.538 ^{ns}	0.079 ^{ns}	0.287 ^{ns}	0.729 ^{ns}	0.0001 ^{**}

Note: Mean value of 3 replicate measurements $\pm$ standard deviation

^{ns} = no significant difference ($P > 0.05$), ^{**} = highly significant difference ($P < 0.01$) and Means within a column followed by the same letter are not significant different at $P < 0.01$ by DMRT.

ความถี่ในการลอกคราบของกุ้งขาวแวนนาไมที่พบในบ่อเลี้ยงพบว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มีความถี่ในการลอกคราบมากกว่าชุดการทดลองที่ 1 (ดังแสดงในภาพที่ 4) อาจจะเนื่องมาจากชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มีการเสริมแร่ธาตุลงในน้ำทะเลเทียมทั้ง 2 สูตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 1 เป็นการเลี้ยงแบบไม่ได้มีการเสริมแร่ธาตุ สอดคล้องกับ Pratoomchat and Sommart (2000) พบว่าการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมโดยเสริมแร่ธาตุมีการเจริญเติบโตดีกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้เสริมแร่ธาตุ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการเลี้ยงกุ้งที่มีความหนาแน่นสูงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องเพิ่มปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ ที่จำเป็นจึงจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งที่ดีทั้งนี้ความถี่ในการเลี้ยงต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมในช่วง 25-35 ส่วนในพันส่วน โดยมีอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Na:K, Cl:K และ Cl:Na ในน้ำเท่ากับ 5.1:1, 6.5:1, 8.8:1, 21:1, 30:1 และ 1.4:1 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhu *et al.* (2004); Pan *et al.* (2006) พบว่า การเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่ระดับความเค็ม 30 ส่วนในพันส่วนโดยมี Na : K เท่ากับ 20:1 ทำให้ร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น Pratoomchat *et al.* (2011) เสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนในน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ความยาวเฉลี่ย 8.9 ± 0.17 กรัม ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ส่วนในพันส่วน (T) โดยคำนึงถึงอัตราส่วนของแร่ธาตุ และกลุ่ม

ควบคุมเชิงลบ (ไม่เสริมแร่ธาตุ, NC) และกลุ่มควบคุมเชิงบวกที่เสริม NaCl (PC) ประเมินความเข้มข้นของ Na, K, Mg, Ca, Cl และ P และอัตราส่วนของแร่ธาตุเหล่านี้ในเลือดตับ และเปลือกกุ้งทางสถิติเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากผลของจุดสมดุลของแร่ธาตุในแต่ละความเค็มนั้นย่อมแตกต่างกัน แสดงให้เห็นได้จากผลความเข้มข้นของ Na, K, Ca, Cl และ P ในพลาสมาของกุ้งที่เลี้ยงในแต่ละความเค็มย่อมแตกต่างกัน ยกเว้นความเข้มข้นของ K และ Cl ในชุดการทดลองที่เสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่เสริมโซเดียมคลอไรด์และชุดการทดลองที่ไม่เสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 10 ส่วนในพันส่วน ส่วนในโครงสร้างเปลือกของกุ้งที่ความเค็ม 20 ส่วนในพันส่วน พบว่า K, Mg และ Ca ในชุดการทดลองที่เสริมโซเดียมคลอไรด์มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับ Suphawinyoo *et al.* (2013) ที่อนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามด้วยการเสริมแมกนีเซียมโพแทสเซียมระบุว่าหากการเสริมแร่ธาตุที่มากจนเกินจุดสมดุลจะส่งผลเสียต่อกุ้งที่เลี้ยงทั้งในด้านการเจริญเติบโตและการลอกคราบ การเสริมแร่ธาตุจึงต้องพิจารณาความเค็มของน้ำที่ใช้เลี้ยงและอัตราความหนาแน่นของกุ้งที่เลี้ยงในระบบด้วย (Keawla-iad and Pratoomchat, 2010) อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมโดยเสริมแร่ธาตุมีการลอกคราบดีกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้เสริมแร่ธาตุ (ดังแสดงในภาพที่ 4)

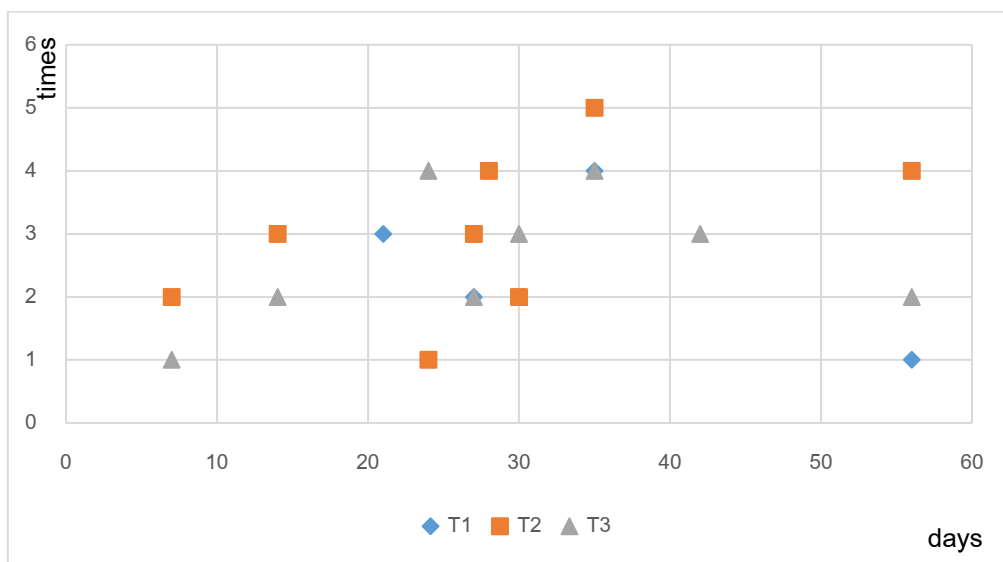


Figure 4 Shrimp molting frequency under different treatments for 60 days.

Note: T1 = treatment 1, T2 = treatment 2, T3 = treatment 3

Table 4 Average liking scores of acceptability tests of shrimp from different treatments.

Sensory attribute	appearance	odor	taste	texture	overall
treatment 1	6.67±0.61 ^a	6.50±0.51 ^a	6.60±0.56 ^a	6.60±0.62 ^a	6.47±0.63 ^a
treatment 2	6.50±0.51 ^a	6.73±0.45 ^a	6.57±0.50 ^a	6.60±0.50 ^a	6.63±0.49 ^a
treatment 3	6.60±0.50 ^a	6.63±0.49 ^a	6.60±0.50 ^a	6.73±0.45 ^a	6.77±0.43 ^a

Note: Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation and means within a column followed by the same letter are not significant different at $P < 0.05$ by DMRT.

1-Dislike Extremely to 7-Like Extremely

3.3. การเทียบสีลำตัวกุ้งและการทดสอบทางประสาทสัมผัส

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทำการเปรียบเทียบสีของกุ้งขาวแวนนาไมในแต่ละชุดการทดลองโดยนำกุ้งไปต้มเป็นเวลา 2 นาทีจากนั้นนำมาเทียบกับสมุดวัดสีของมัลเชลล์พบว่ากุ้งชุดการทดลองที่ 1 มีสีส้มเข้มรหัส 5YR 5 /12 ส่วนกุ้งชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มีสีส้ม รหัส 5YR 7/6 และ 5YR 6/8 ตามลำดับ การทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้อาสาสมัคร จำนวน 30 คน การทดสอบความพึงพอใจทางประสาทสัมผัสของกุ้ง ให้คะแนนโดยใช้ facial hedonic scale 7 ระดับ ผลการการให้คะแนนเฉลี่ยสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (ตารางที่ 4)

4. สรุป

ความเค็มและองค์ประกอบของแร่ธาตุที่มีอยู่ในน้ำเลี้ยงซึ่งมีความสมดุลเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิตกุ้งขาวแวนนาไมนั้นเป็นข้อสำคัญของการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในระบบปิด โดยผลการทดลองในทุกชุดการทดลองชี้ให้เห็นว่า แม้ว่าการเจริญเติบโตและการลอกคราบของกุ้งในทุกชุดการทดลองจะเป็นไปโดยปกติในช่วงการเลี้ยง 60 วันจนกระทั่งได้ผลผลิตกุ้งขนาดตลาดคือประมาณ 30 ตัวต่อกิโลกรัม และคุณภาพของเนื้อกุ้งเป็นที่ยอมรับเมื่อทดสอบชิม แต่การเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนในน้ำที่มีความเค็ม 15 ส่วนในพันส่วน นั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในน้ำช่วยสนับสนุนให้กุ้งขาวสร้างจุดสมดุลออสโมติกอย่างมีประสิทธิภาพ กุ้งที่เลี้ยงด้วยน้ำผสมดอกเกลือและน้ำทะเลเทียมจากน้ำเค็มเข้มข้นมีอัตราแลกเนื้อดีกว่าการไม่เสริมแร่ธาตุ อย่างไรก็ตาม การเสริมแร่ธาตุลงไปจำเป็นจะต้องรักษาปริมาณแร่ธาตุให้เพียงพอต่อความต้องการของกุ้งและต้องมีส่วนผสมแร่ธาตุที่สม่ำเสมอตลอดการเลี้ยงด้วย โดยการพิจารณาความเค็มของน้ำที่ใช้เลี้ยงและอัตราความหนาแน่นของกุ้งที่เลี้ยงในระบบจึงจะทำให้ได้ผลผลิตที่ดีทั้งคุณภาพและปริมาณผลผลิต เมื่อนำผลผลิตกุ้งไปผ่านการทดสอบทางประสาทสัมผัสต้องให้

คะแนนเฉลี่ยสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบรวมไม่แตกต่างกัน ดังนั้น กุ้งที่เลี้ยงโดยใช้น้ำทะเลเทียม ดอกเกลือและน้ำเค็มเข้มข้นในนาเกลือมีการเจริญเติบโตและอัตราการที่ดี ตลอดจนคุณภาพของผลผลิตกุ้งที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถใช้น้ำทะเลเทียมที่ผลิตจากน้ำเค็มเข้มข้นจากนาเกลือได้ แต่หากพิจารณาในด้านต้นทุนและปริมาณการใช้นาเกลือเลี้ยงตามปกติ จะพบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีต้นทุนค่าน้ำเค็มต่ำที่สุด อีกทั้งการใช้น้ำทะเลเทียมแทนการใช้น้ำเค็มเข้มข้นจากนาเกลือมาหมุนเวียนน้ำระบบปิดทำให้สามารถลดปริมาณการใช้น้ำเค็มลงได้ 6 เท่า แม้ว่าการเลี้ยงกุ้งขาวในระบบปิดในการทดลองนี้จะให้ผลผลิตต่ำกว่าการเลี้ยงของเกษตรกรในบ่อดินโดยทั่วไป อันเนื่องมาจากการได้รับแร่ธาตุในปริมาณต่ำกว่าความต้องการร่างกายกุ้งในระบบการเลี้ยงอื่น แต่ก็เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์รูปแบบใหม่ในการเตรียมน้ำเค็มเข้มข้นจากนาเกลือเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

การทดลองในขั้นตอนต่อไปของการพัฒนาสู่การเลี้ยงระบบปิดแบบรักษาสสมดุลเกลือแร่ด้วยน้ำทะเลเทียมควรมีระบบการตรวจติดตามองค์ประกอบเกลือแร่ในระบบแบบอัตโนมัติหรือระบบโรงเรือนอัจฉริยะ เนื่องจากกุ้งขาวแวนนาไมโดยธรรมชาติเป็นสัตว์ทะเลที่มีการลอกคราบเพื่อการเจริญเติบโตและมีความต้องการเกลือแร่เพื่อใช้ในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโตตลอดช่วงอายุการเลี้ยง รวมถึงการดูแลระบบการเลี้ยงโดยคำนึงถึงสมดุลเกลือแร่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุปสงค์และอุปทานเกลือแร่ที่มีในระบบการเลี้ยงโดยรวม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งในอำเภอบ้านแหลมและอำเภอยะอำ จังหวัดเพชรบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างพันธุ์กุ้งขาวแวนนาไมเพื่อใช้ในการวิจัย โดยงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ปีงบประมาณ 2564 ภายใต้

โครงการการบริหารจัดการศูนย์เทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตร (AIC) เพชรบุรี กิจกรรมการถ่ายทอดเทคโนโลยีและนวัตกรรมเกลือทะเล

การดำเนินการทดลองในครั้งนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการกำกับดูแลการเลี้ยงและใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีแล้ว เลขทะเบียน ID# IACUC PBRU 131162 008

7. เอกสารอ้างอิง

- Armenta-Bojórquez, A.D., Valenzuela-Castañeda, A.R., Fitzsimmons, K., López-Alvarez, E.S., Rodríguez-Quiroz, G. and Valenzuela-Quirón, W. 2021. Pacific white shrimp and tomato production using water effluents and salinity-tolerant grafted plants in an integrated aquaponic production system. **Journal of Cleaner Production** 278: 124064.
- Boyd, C.A., Boyd, C.E. and Rouse, D.B. 2007. Potassium budget for inland, saline water shrimp ponds in Alabama. **Aquacultural Engineering** 36(1): 45-50.
- Charenphak, V., Chanaphai, B., Reuangthong, J., Prairarin, K. and Ong-Art, K. 2020. Study on Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boon, 1931) for brood stock breeding program. **E-thai fisheries gazette** 3(4): 49-67. (in Thai)
- Citarasu, T., Babu, M.M. and Yilmaz, E. 2022. Alternative medications in shrimp health management for improved production. **Aquaculture** 561: 738695.
- Keawla-iad, N. and Pratoomchat, B. 2010. Proportional supplementation of minerals in cultured medium on growth, survival, food conversion ratio, molt frequency and size variation of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*), pp. 83-91. **In 48th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Laisutisan, K., Limsuwan, C., Wongmaneeprateep, S., Prasertsri, S., Limhang, K., Wiriapattanasub, P. and Sitthimonton, S. 2010. Effect of temperature during postlarval rearing of *Litopenaeus vannamei* on growth and survival rate, pp. 322-328. **In 48th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Lin, Y.C. and Chen, J.C. 2001. Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* Boone juveniles at different salinity levels. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology** 259(1): 109-119.
- Lin, Y.C. and Chen, J.C. 2003. Acute toxicity of nitrite on *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles at different salinity levels. **Aquaculture** 224(1-4): 193-201.
- Lin, Y., Jing, S., Lee, D., Chang, Y., Chen, Y. and Shih, K. 2005. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate. **Environmental Pollution** 134(3): 411-421.
- Moura, P., Neto, I.A., Brandão, H., Furtado, P., Poersch, L., Wasielesky, J.W. 2023. Effects of magnesium reduction in artificial low-salinity water on the growth of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* in a biofloc system. **Aquaculture** 577: 739956.
- Nehru, E., Chandrasekhara Rao, A., Pamanna, D. and Priyadarshini, N., Anil Kumar, P. and Raveendra, M. 2018. Effect of dietary minerals supplementation on growth and survival of *Litopenaeus vannamei* in low salinity water. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences** 7(3): 3040-3049.
- Pan, L.Q., Luan, Z.H. and Jin, C.X. 2006. Effects of Na⁺/K⁺ and Mg²⁺/Ca²⁺ ratios in saline ground waters on Na⁺ -K⁺ -ATPase activity, survival and growth of *Marsupenaeus japonicus* postlarvae. **Aquaculture** 261: 1396-1402.
- Pratoomchat, B. and Sommart, S. 2000. Effect of salinity on biomineralization of White Leg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*), pp. 73-82. **In Kasetsart University Annual Conference: Fisheries 48th**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Pratoomchat, B., Hongsapruet, K. and Keawla-iad, N. 2011. **Research Report on Proportional supplementaion of minerals in cultured**

- medium on physicochemical of *Litopenaeus vannamei* shrimp.** Burapha University, Chonburi. (in Thai)
- Roy, L.A., Davis, D.A., Saoud, I.P. and Henry, R.P. 2007. Effects of varying levels of aqueous potassium and magnesium on survival, growth, and respiration of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low salinity waters. **Aquaculture** 262: 461-469.
- Serrano, L., Towle, D.W., Charmantier, G. and Spanings-Pierrot, C. 2007. Expression of Na⁺/K⁺ -ATPase α -subunit mRNA during embryonic development of the crayfish *Astacus leptodactylus*. **Comparative Biochemistry and Physiology - Part D: Genomics and Proteomics**. 2(2): 126-134.
- Sirithanawong, B. and Thakleawphan, C. 2019. **The use of dried sea water and epsom salt from the wisdom of Thai sea salt farming for of White Leg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture and Giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) rearing.** Available Source: http://research.pbru.ac.th/researchexpo2017/docs/salt/1_1_salt.pdf, May 1, 2022. (in Thai)
- Sommart, S. 2009. Biomineralization of *Litopenaeus vannamei* and application of minerals supplementation in commercial larviculture and grow-out systems. Master of Science (Aquatic Science), Burapha University. (in Thai)
- Suphawinyoo, K., Savangarrom, Y. and Kaewchada, N. 2013. **Research Report on Addition of potassium magnesium in Giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) in water reduce.** Maejo university, Chumphon. (in Thai)
- Thammanon, W. and Aussavamas, D. 2012. **Archaeometric study of ancient pottery from Ban Dee Kilns, Pattani province.** Prince of Songkhla University Pattani Campus research report; Pattani. Available Source: https://soreda.oas.psu.ac.th/show_detail.php?research_id=944, April 1, 2022. (in Thai)
- Villarreal, H., Hinojosa, P. and Naranjo, J. 1994. Effect of temperature and salinity on the oxygen consumption of laboratory produced *Penaeus vannamei* postlarvae. **Comparative Biochemistry and Physiology** 108A: 331-336.
- Wang, W.N., Wangb, A.L., Wanga, D.M., Wanga, L., Liua, Y. and Sunb, R.Y. 2003. Calcium, phosphorus and adenylate levels and Na⁺ – K⁺ -ATPase activities of prawn, *Macrobrachium nipponense*, during the moult cycle. **Comparative Biochemistry and Physiology** 134: 297-305.
- Wudtisin, I. and Boyd, C.E. 2011. Possible potassium and magnesium limitations for shrimp survival and production in low-salinity, pond waters in Thailand. **Journal of the World Aquaculture Society** 42(6): 766-777.
- Zhu, C., Dong, S., Wang, F. and Huang, G. 2004. Effects of Na/K ratio in seawater on growth and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei*. **Aquaculture** 234(1-4): 485-496.



Research Article

การใช้ข้าวหอมปทุมธานีและกลีบดอกบัวหลวงพืชพื้นถิ่นในจังหวัดปทุมธานี เพื่อการผลิตซาโต

Using Pathumthani Native Plants “Khao Hom Pathum and Lotus Petal (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)” for Sato Production

สรารุธ เนียรวิทุรย์ กฤษคุณ ภาณิตยานกร อชิรญาณ์ รงค์ทอง และ วัลลภา โพธาสินธ์ *

Sarawoot Nienvitoon, Kritchakhun Bhanityanakorn, Achiraya Rongthong and Wanlapa Potasin *

สาขาวิชาศิลปะและเทคโนโลยีการประกอบอาหาร วิทยาลัยการท่องเที่ยวและอุตสาหกรรมบริการ มหาวิทยาลัยรังสิต อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000
Culinary Arts and Technology, College of Tourism and Hospitality Industry, Rangsit University, Muang, Pathum Thani 12000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-10-31

Revised: 2024-06-20

Accepted: 2024-08-15

Keywords:

sato;

local rice;

local plant;

Khao Hom Pathum;

sacred lotus flower tea

This research aims to study on the production of Sato from Pathum Thani infused with lotus petal tea leaves. It also aims to examine the physical and chemical properties of Sato from Khao Hom Pathum before and after infusion with lotus petal tea leaves, as well as to assess consumer acceptance of Sato from Khao Hom Pathum infused with lotus petal tea leaves. The experimental design was a randomized complete block design (RCBD). The results showed that Sato from Khao Hom Pathum infused with sacred lotus flower tea had a fermentation time of 10 days. The product of Sato, after infusion with sacred lotus flower tea, had a pH of 3.22 ± 0.01 , total soluble solid (TSS) of 13.00 ± 0.00 °Brix and alcohol content of 6.33 ± 0.46 %. The Sato, after being infused with sacred lotus flower tea, had brightness (L^*), redness (a^*), and yellowness (b^*) values of 46.47 ± 0.36 , 4.20 ± 0.01 , and 0.46 ± 0.01 , respectively. The Sato exhibited a pinkish-purple color after infusion with sacred lotus flower tea. The panelists accept the Sato infused with sacred lotus flower tea. According to the results of consumer acceptance, using a 9-point hedonic scale, the ratings for appearance characteristics, color, smell, taste, and overall liking were 7.34 ± 1.35 , 7.86 ± 1.40 , 6.26 ± 2.07 , 6.78 ± 1.96 , and 7.10 ± 1.42 , respectively. Regarding the intention to purchase the product if it were produced for sale, 71.43% of the panelists indicated they would definitely buy the product for consumption.

© 2025 Nienvitoon, S., Bhanityanakorn, K., Rongthong, A. and Potasin, W. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: wanlapa.p@rsu.ac.th

Cite this article as:

Nienvitoon, S., Bhanityanakorn, K., Rongthong, A. and Potasin, W. 2025. Using of Pathumthani Native Plants “Khao Hom Pathum and Lotus Petal (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)” for Sato Production. *Recent Science and Technology* 17(2): 261091.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษากระบวนการผลิตสาโทจากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชากลีบดอกบัวหลวง 2) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์สาโทก่อนและหลังการหมักในชากลีบดอกบัวหลวง 3) ทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์สาโท วางแผนการทดลองแบบ Randomized Completely Block Design (RCBD) จากผลการทดลอง พบว่า ผลิตภัณฑ์จากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชาดอกบัวหลวงใช้ระยะเวลาในการหมัก 10 วัน ผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชาดอกบัวหลวง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 3.22 ± 0.01 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (TSS) เท่ากับ 13.00 ± 0.00 องศาบริกซ์ และมีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 6.33 ± 0.46 มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 46.47 ± 0.36 4.20 ± 0.01 และ 0.46 ± 0.01 ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชาดอกบัวหลวงที่ได้มีสีชมพูอมม่วง จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) จากผู้ทดสอบจำนวน 50 คน ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 7.34 ± 1.35 7.86 ± 1.40 6.26 ± 2.07 6.78 ± 1.96 และ 7.10 ± 1.42 ตามลำดับ ในด้านความตั้งใจในการซื้อผลิตภัณฑ์พบว่าหากผลิตออกจำหน่าย ผู้ทดสอบชิมซื้อผลิตภัณฑ์มาบริโภคแน่นอน คิดเป็นร้อยละ 71.43

คำสำคัญ: สาโท, ข้าวพื้นเมือง, พืชพื้นถิ่น, ข้าวหอมปทุมธานี, ดอกบัวหลวง

1. บทนำ

จากกระแสการก้าวหน้าที่ทำให้สุราชุมชนได้รับความสนใจ และสินค้าที่ต้องการอย่างมากในท้องตลาดทำให้เกิดการความต้องการในการเรียนรู้ และยอมรับรู้เรื่องราวความเป็นมาเกี่ยวกับสุราที่มีอยู่ในชุมชน เป็นวงกว้างขึ้น (Thairath, 2023; Matichon, 2023) โดยสาโทจัดเป็นหนึ่งในสุราชุมชน ประเภทสุราพื้นเมือง ซึ่งตามพระราชบัญญัติสุรา พ.ศ. 2493 สาโท หมายความว่า สุราที่ไม่ได้กลั่น ผลิตจากข้าวเหนียว หมักกับเชื้อสุรา (ลูกแป้ง) มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่เกิน 15 ดีกรี (Excise Department, 2023) สาโท เป็นเครื่องดื่มพื้นบ้านที่หมักจากข้าวเหนียว โดยการหมักข้าวเหนียวหนึ่งสุกผสมลูกแป้งหรือเชื้อราและยีสต์เพื่อเปลี่ยนแป้งในข้าวให้เป็นแอลกอฮอล์ โดยเชื้อราทำหน้าที่ผลิตเอนไซม์อะไมเลสย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า Saccharification หลังจากนั้นยีสต์จะทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งให้เป็นเอทานอล (Phakamat and Irphong, 2021)

เนื่องจากจังหวัดปทุมธานีมีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำ ส่วนมากเป็นดินเหนียว มีความอุดมสมบูรณ์ ระบายน้ำได้ช้า รวมทั้งมีระบบชลประทานเชื่อมต่อกันทั้งจังหวัด เหมาะสมแก่การทำเกษตรกรรมโดยเฉพาะนาข้าว ดังนั้น จังหวัดปทุมธานีจึงมีข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจ อีกทั้งยังมีพันธุ์ข้าวพื้นถิ่นอย่างข้าวหอมปทุมธานี ที่เป็นข้าวสายพันธุ์ใหม่ของไทย จากการวิจัยและพัฒนาโดยศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี เพาะปลูกและคัดเลือกจนได้สายพันธุ์ สำเร็จในปี พ.ศ. 2533 เป็นสายพันธุ์ข้าวที่ได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ตามพระราชบัญญัติคุ้มครองสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์หรือข้าวจีไอ (Geographical Indication, GI) ต้องปลูกและผลิตในพื้นที่

จังหวัดปทุมธานีเท่านั้น (Department of Intellectual Property Ministry of Commerce, 2021) อีกทั้งเกษตรกรผู้ผลิตยังต้องขึ้นทะเบียนเป็นสมาชิกผู้ปลูก มีระบบการบันทึกข้อมูลที่สามารถตรวจสอบได้ตั้งแต่การปลูกไปจนถึงการขนย้ายเข้าโรงสี แต่ถึงแม้ข้าวหอมปทุมธานีจะมีคุณสมบัติที่มีความหอมนุ่มคล้ายข้าวหอมมะลิ ทว่าก็ยังไม่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายนักทั้งยังมีราคาต่ำกว่าข้าวหอมมะลิอีกด้วย

ข้าวหอมปทุมธานี (Khao Hom Pathum Thani หรือ Pathum Thani Hom Pathum Rice) หมายถึง ข้าวเปลือกข้าวกล้อง และข้าวขาว ที่แปรรูปจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่มีเปลือกข้าวสีฟาง รูปทรงเมล็ดเรียวยาวจมูกข้าวเล็ก เนื้อเมล็ดข้าวมีสีขาวนวล ผิวค่อนข้างมัน เมื่อหุงสุกแล้วข้าวนุ่มค่อนข้างเหนียวและมีกลิ่นหอมอ่อน ๆ ปลูกและผลิตในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี (Department of Intellectual Property Ministry of Commerce, 2021) ข้าวหอมปทุมธานีมีคาร์โบไฮเดรตสูงถึงร้อยละ 71-77 รองลงมาคือ โปรตีน ร้อยละ 5-8 ช่วยให้อาหารย่อยง่ายขึ้น นอกจากนั้นยังมีวิตามินบี 1 ช่วยป้องกันโรคเหน็บชาและวิตามินบี 2 ช่วยป้องกันโรคปากนกกระบอกได้อีกด้วย

นอกจากข้าวหอมปทุมธานีแล้ว จังหวัดปทุมธานียังมีบัวหลวง ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งราก ต้น ดอก และใบ บัวหลวงจัดอยู่ในวงศ์ Nelumbonaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Nelumbo nucifera* Gaertn. ชื่อสามัญคือ Lotus, Sacred lotus ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นต้นไม้ ใฝ่เลื้อย เหนือน้ำ อายุหลายปี ลำต้นมีทั้งที่เป็นเหง้าใต้ดิน และเป็นไหลเหนือดินใต้น้ำ ใบเป็นใบเดี่ยว เรียงสลับ ใบรูปไข่ค่อนข้างกลม ขนาด 15-40 เซนติเมตร ขอบใบเรียบและเป็นคลื่นเล็กน้อย แผ่นใบเรียบ สีเขียวและมีนวลเคลือบ ก้านใบมีหนามเป็นตุ่มเล็ก ๆ ก้านใบติดกับแผ่นใบ ด้านหลัง

ใบ (peltate leaf) โคนก้านใบมีหูใบ 2 อัน ก้านใบกลมเรียวยาว แข็งส่งใบให้เจริญที่ผิวน้ำหรือเหนือน้ำ ดอกสีชมพูขาวมีกลิ่นหอม จากการศึกษาวิจัยพบสารชนิดต่าง ๆ ในส่วนประกอบของบัวหลวง ที่มีสรรพคุณในการบำรุงร่างกายหรือนำมาปรุงเป็นยารักษาโรค เช่น ส่วนต่าง ๆ ของบัวหลวง (โดยเฉพาะ *Nelumbo nucifera* Gaertn.) คือ ดอก ใบ ก้าน ผักบัว และเมล็ด โดยเฉพาะกลีบดอกบัวหลวงนั้น มีสารอัลคาลอยด์ (Alkaloids) ที่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์หลายชนิด ที่มีฤทธิ์ขยายหลอดเลือดที่ไปเลี้ยงหัวใจ (Charoenwattana *et al.*, 2009)

ทั้งนี้ ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงศักยภาพและคุณประโยชน์ของชากลีบดอกบัวหลวง เพื่อเพิ่มสีและกลิ่นให้แก่ผลิตภัณฑ์สาโทเพื่อหวังสร้างเอกลักษณ์ให้แก่สาโท และยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มทางการตลาดให้แก่ข้าวหอมปทุมธานีและดอกบัวหลวง ทั้งนี้ข้าวหอมปทุมธานีและดอกบัวหลวงที่เปรียบเป็นสัญลักษณ์ประจำจังหวัดปทุมธานี ดังนั้น การเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าวหอมปทุมธานีจะช่วยสนับสนุนเกษตรกรในช่วงที่ข้าวมีปริมาณล้นเกินกว่าความต้องการบริโภคในท้องตลาด โดยการนำมาผลิตเป็นเครื่องดื่มสาโทหมักชากลีบดอกบัวหลวงก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่และหากผลิตภัณฑ์เป็นเครื่องดื่มที่สามารถหาดื่มได้เฉพาะในจังหวัดปทุมธานีก็จะส่งผลต่อการท่องเที่ยวเชิงอาหารตามมาได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การผลิตสาโทจากข้าวหอมปทุมธานี (ข้าวเจ้า)

2.1.1 การล้าง (Washing) ชั่งข้าวหอมปทุมธานี (ข้าวสาร) 2 กิโลกรัม (Chuchat *et al.*, 2016) นำมาล้างผ่านด้วยน้ำสะอาดเพื่อเป็นการชะล้างสิ่งปนเปื้อนที่อาจติดมากับข้าว และช่วยลดระดับการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ จากนั้นสะเด็ดน้ำให้หมด พักไว้ประมาณ 10 นาที

2.1.2 การนึ่งข้าวเจ้า (Steamed Rice) นำน้ำสะอาด อัตราส่วนข้าว : น้ำ เท่ากับ 1 : 1 ใส่ภาชนะ จากนั้นทำการนึ่งด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 45 นาที เมื่อข้าวสุกแล้ว พักให้เย็น ล้างข้าวสุกผ่านน้ำด้วยน้ำสะอาดเพื่อล้างยางข้าวออกจนน้ำใส และเมล็ดข้าวร่วนไม่ติดกัน จากนั้นสะเด็ดน้ำให้หมด 15 นาที เพื่อปรับความชื้นของข้าวสุกให้ลดลงก่อนนำไปหมักสาโท

2.1.3 การเตรียมกล้าเชื้อ (Fermentation) ใช้ลูกแป้งที่ได้จากชุมชนที่มีการผลิตสาโทในจังหวัดปทุมธานีในสัดส่วนข้าวเจ้า (ข้าวสาร) 1 กิโลกรัม ต่อ ลูกแป้ง 40 กรัม (ร้อยละ 4) เริ่มจากการคลุกลูกแป้งบดละเอียดผสมกับข้าวเจ้าที่สุกให้เข้ากัน ย้ายลงถึงหมักขนาด 20 ลิตร ใช้มือกด

ข้าวเล็กน้อยเพื่อให้เกาะกัน ปิดฝาให้แน่นสนิทติด air lock เพื่อไม่ให้อากาศภายนอกเข้าสู่ถึงหมัก หมักที่อุณหภูมิห้อง (25-35 องศาเซลเซียส) นาน 14 วัน เพื่อให้ราและยีสต์จากลูกแป้งเจริญเติบโตจนได้น้ำหวานออกมาจากการหมักข้าว (น้ำต้อย)

2.1.4 การผ่าน้ำ (Adding water) ในวันที่ 4 ของการหมัก เติมน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อ และมีคุณภาพน้ำบริโภคเพื่อเจือจางความหวาน และปรับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ให้มีค่าประมาณ 16-18 องศาบริกซ์ แล้วปล่อยให้กระบวนการหมักดำเนินการต่อจนครบ 14 วัน หรือจนได้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ให้มีค่าประมาณ 11-14 องศาบริกซ์ (Chuchat *et al.*, 2016)

2.1.5 การทำให้ใส (Cold crashing) ย้ายถึงหมักสาโทที่หมักผ่านไปแล้ว 14 วัน แช่ในตู้แช่เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้เกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิต่ำ

2.1.6 กระบวนการหยุดการหมัก (Stop fermentation) ถ่ายเอาเฉพาะส่วนของเหลว (น้ำสาโท) ออกจากถังหมักไปเก็บในถังพัก

2.1.7 การหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง (Infused) โดยนำดอกบัวหลวง อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 80 นาที (Mokmungmuang *et al.*, 2017) จากนั้นปั่นหยาบด้วยเครื่องปั่นแล้วผสมเข้ากับน้ำสาโทหมักเป็นเวลา 4 วันในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยให้แอลกอฮอล์ช่วยดูดซับกลิ่น สี จากใบชากลีบดอกบัวหลวง

2.1.8 การบรรจุ และการฆ่าเชื้อ (Bottling and Pasteurization) กรองเอาแต่น้ำสาโทบรรจุลงในขวดแก้วปิดผนึกด้วยฝาจีบ จากนั้นทำการฆ่าเชื้อด้วยวิธีการพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที (Yotmanee and Naksang, 2021) และทำให้เย็นทันทีโดยการแช่ขวดสาโทลงในอ่างน้ำเย็นจัดผสมน้ำแข็งนาน 10 นาที หรือจนกระทั่งน้ำสาโทมีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บรักษาโดยการแช่เย็นในตู้แช่เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อใช้ศึกษาคุณภาพทางกายภาพ เคมี และการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์สาโทต่อไป

2.2 ศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์สาโทในระหว่างกระบวนการผลิต

2.2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสาโทระหว่างการหมักก่อนการผ่าน้ำ (น้ำต้อย) (จากข้อ

1.4) โดยทำการตรวจคุณภาพน้ำต้อยหลังจากเริ่มการหมักไปแล้ว 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการสุ่มตรวจตัวอย่างน้ำต้อยทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 วัน ด้วยการวัดคุณภาพทางเคมี ดังนี้

- 1) วิเคราะห์หาปริมาณแอลกอฮอล์ โดยใช้เครื่องวินิโอมิเตอร์ (Vinometer)
- 2) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid; TSS) โดยใช้แฮนรีแฟรคโตมิเตอร์ (Hand Refractometer)

2.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของสาโทระหว่างการหมักหลังเติมน้ำ (ผ้าน้ำ) (จากข้อ 2.1.4) ทำการสุ่มตัวอย่างสาโทหลังเติมน้ำ และทำการสุ่มตรวจตัวอย่างทุก 48 ชั่วโมงจนถึงวันที่ 14 ของการหมัก และได้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) มีค่าประมาณ 11-14 องศาบริกซ์ โดยมีการวัดคุณภาพ ดังนี้

- 1) วิเคราะห์หาปริมาณแอลกอฮอล์ โดยใช้วินิโอมิเตอร์ (Vinometer)
- 2) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (Total Soluble Solid; TSS) โดยใช้แฮนรีแฟรคโตมิเตอร์ (Hand Refractometer)
- 3) วิเคราะห์ค่าความเป็น กรด – เบส (pH) โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH Meter)

2.2.3 วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ และเคมีของสาโท ก่อนและหลังการหมักในใบชาดอกบัวหลวง (Infused) โดยมีการวัดคุณภาพ ดังนี้

- 1) วิเคราะห์หาปริมาณแอลกอฮอล์ โดยใช้วินิโอมิเตอร์ (Vinometer)
- 2) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (Total Soluble Solid; TSS) โดยใช้แฮนรีแฟรคโตมิเตอร์ (Hand Refractometer)
- 3) วิเคราะห์ค่าความเป็น กรด – เบส (pH) โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH Meter)
- 4) วิเคราะห์ค่าสี ได้แก่ ค่าความสว่าง (L^*), ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Shenzhen WR-10, China)

2.3 ทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์สาโทจากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชาโคลบักหลวง

ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์สาโทจากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชาโคลบักหลวง จากผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ไม่ผ่านการฝึกฝนแต่มีความคุ้นเคยกับการบริโภคเครื่องดื่มประเภทแอลกอฮอล์ โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกอาสาสมัครผู้รับการวิจัย (Inclusion criteria) ดังนี้ เป็นเพศชายและหญิงสุขภาพดี มีอายุตั้งแต่ 20-60 ปี ยินยอมเข้าร่วมการวิจัย จำนวน 50 คน ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม (Pangborn, 2003; Meilgaard *et al.*, 2007)

2.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าแอลกอฮอล์ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (Total Soluble Solid; TSS) ความเป็น กรด – เบส (pH) และค่าสี วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ส่วนการวิเคราะห์การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) และหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์สาโทในระหว่างกระบวนการผลิต

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของสาโทระหว่างการหมัก (ก่อนการเติมน้ำ) โดยมีการตรวจคุณภาพน้ำต้อยหลังการหมักข้าวด้วยเชื้อราลูกแป้งหลังการหมัก 2 วัน ทำการสุ่มตรวจตัวอย่างน้ำต้อยทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 วัน พบว่า ปริมาณสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid; TSS) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยจนถึงวันที่ 4 ของการหมักซึ่งมีค่าสูงสุดหลังจากนั้นจะคงที่ โดยข้าวหอมปทุมธานีจะให้ค่าปริมาณสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid; TSS) เท่ากับ 24 องศาบริกซ์ ดังแสดงใน Figure 1

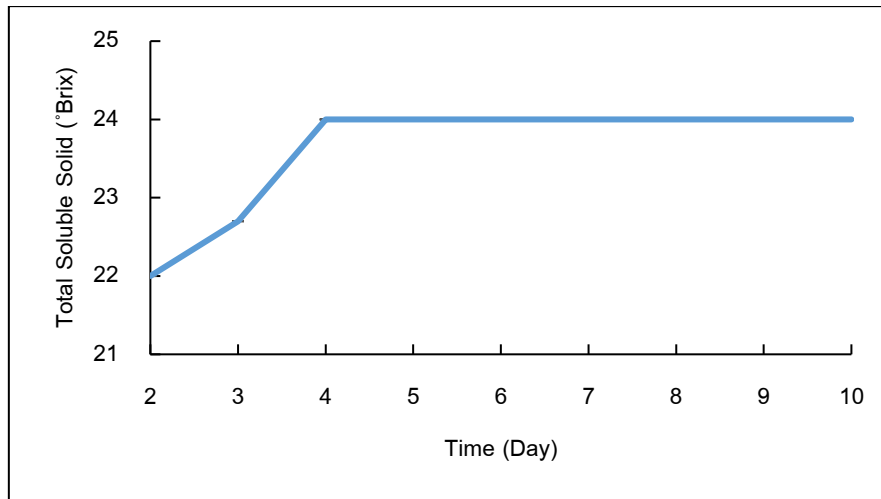


Figure 1 Total soluble solid (TSS) during fermentation before adding water.

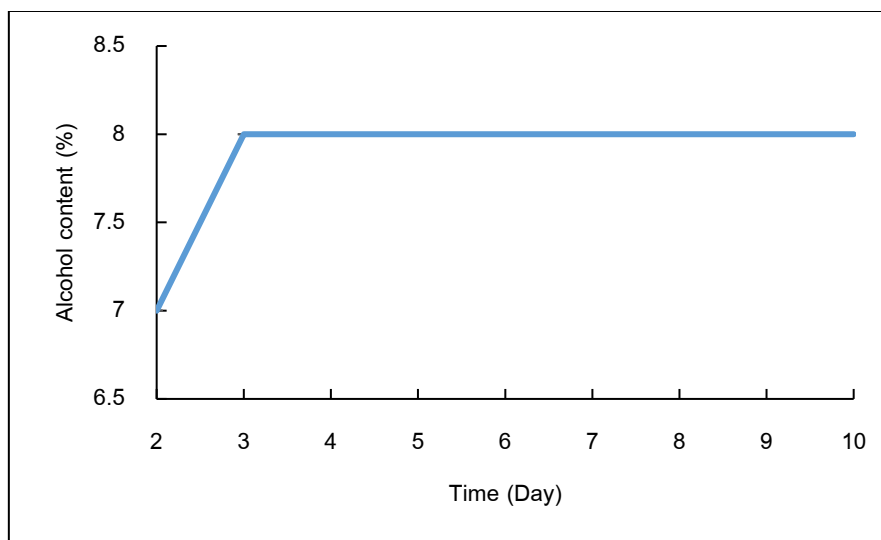


Figure 2 Alcohol content (%) during fermentation before adding water.

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก พบว่าปริมาณแอลกอฮอล์จะเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 3 ของการหมัก ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งมีปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 8 และมีค่าคงที่จนถึงวันที่ 10 ของการหมัก

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์สาโทระหว่างการหมัก หลังการเติมน้ำ (ผ้าน้ำ) โดยทำการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (Total Soluble Solid ; TSS) ทุก 48 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว

(Total Soluble Solid ; TSS) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงวันที่ 6 ของการหมัก โดยข้าวหอมปทุมธานีจะให้ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว สูงสุดเท่ากับ 15 องศาบริกซ์ ดังแสดงใน Figure 3 และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสาโทที่หมักได้อยู่ระหว่าง 3.25-3.56 ดังแสดงใน Figure 4 โดยได้ค่าที่ลดต่ำลงเรื่อยมาในวันสุดท้ายที่ 3.25 ± 0.02 และผลวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ พบว่าปริมาณแอลกอฮอล์ เพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 6 ของการหมัก เท่ากับร้อยละ 7 ดังแสดงใน Figure 5

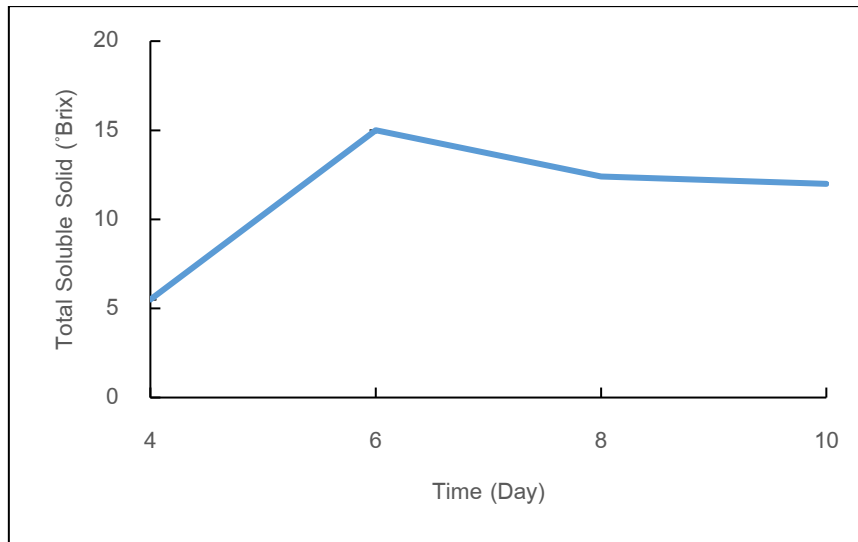


Figure 3 Total soluble solid (TSS) during fermentation after adding water.

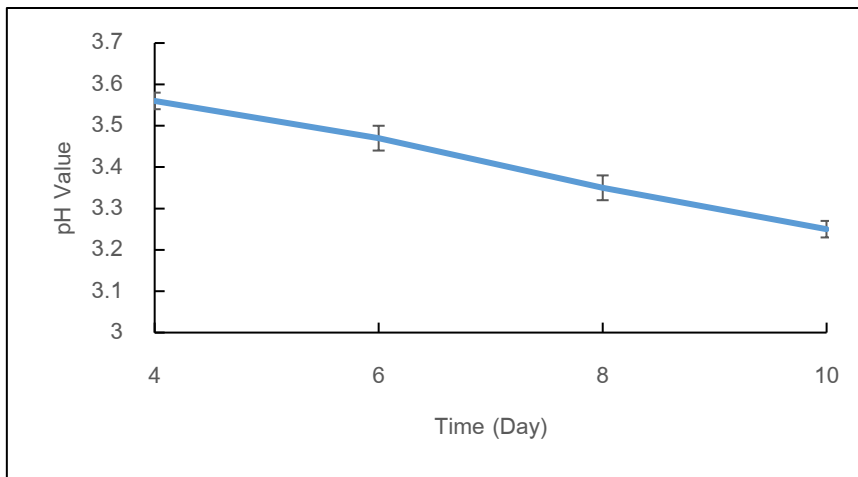


Figure 4 pH Value during fermentation after adding water.

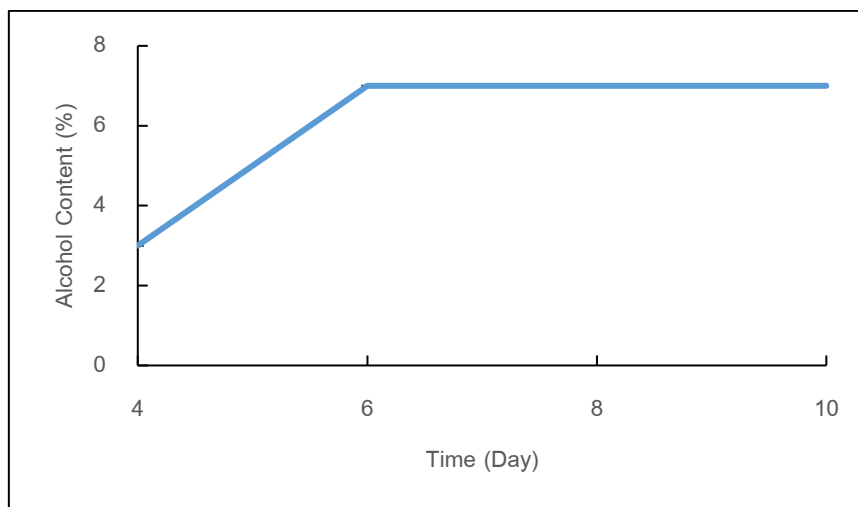


Figure 5 Alcohol content (%) during fermentation before adding water.

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (Total Soluble Solid ; TSS) บ่งชี้ถึงปริมาณน้ำตาลที่พบในน้ำหมักสาโทจากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชากลีบดอกบัวหลวง พบว่า ปริมาณค่าปริกซ์ก่อนเติมน้ำ (น้ำต้อย) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงวันที่ 4 จะพบปริมาณปริกซ์สูงสุด จากนั้นการย่อยแป้งของราในลูกแป้งก็ไม่สามารถย่อยเพื่อเพิ่มค่าปริกซ์เพิ่มเติมได้ในขณะที่หลังเติมน้ำ (ผ่านน้ำ) ซึ่งเป็นกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ ปริมาณค่าปริกซ์เพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 6 ของกระบวนการหลังหมัก จากนั้นปริมาณค่าปริกซ์ลดลงจนถึงระดับที่ต้องการโดยปริมาณแอลกอฮอล์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 6 เช่นกัน จนมีค่าคงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของสาโทเกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของจุลินทรีย์ในลูกแป้งที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงในเมล็ดข้าวให้เป็นน้ำตาลคือ *Aspergillus* spp. และ *Rhizopus* spp. จากนั้นปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการหมักเพิ่มขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์ *Saccharomyces cerevisiae* ในลูกแป้งทำการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เอนไซม์ไซเมส (zymase) ในการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ (Jittima, 2023) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kudpeng *et al.* (2016) คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะลดลงเรื่อย ๆ โดยพบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสาโทข้าวไรซ์เบอร์รี่มีค่าเท่ากับ 6 องศาปริกซ์

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการหมักสาโท ซึ่งการหมักควรมีค่ากรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของยีสต์ และป้องกันไม่ให้อินทรีย์ชนิดอื่นเจริญเติบโตได้ ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นเกิดจากการคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการบวนการหมักแอลกอฮอล์ส่งผลให้ค่า pH ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pornpukdeewattana (2003) ที่ศึกษาการผลิตไวน์ข้าวนาปรังโดยปริมาณปริกซ์และแอลกอฮอล์จะมีค่าเพิ่มสูงสุดในวันที่ 6 ทั้งนี้กรดที่เกิดขึ้นมาจากการคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นกรดอ่อนมีผลทำให้ค่า pH ในการกระบวนการหมักลดลง ส่งผลให้ค่า pH โดยรวมลดลง และยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ได้

โดยคณะผู้วิจัยได้หยุดกระบวนการหมักในวันที่ 8 เพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกับผลทดสอบทางประสาทสัมผัสของสาโทที่ได้รับการยอมรับสูงสุดโดยที่ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 7 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์สาโทตาม มอก. 2089-2544 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuchat *et al.* (2016) ที่ศึกษาการผลิตสาโทจากพันธุ์ข้าวพื้นเมืองชนิดต่าง ๆ ในจังหวัดนครราชสีมา จำนวน 7 ชนิด ที่นำข้าวที่ผ่านการนึ่งหรือหุงให้สุก นำไปคลุกเคล้ากับลูกแป้งแล้วหมักในถังหมักเป็นเวลา 4 วัน จากนั้นเติมน้ำสะอาด 2 ลิตร แล้วหมักต่ออีกเป็นเวลา 14 วัน เพื่อให้ได้สาโทที่มีปริมาณแอลกอฮอล์สูง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของสาโท ก่อนและหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง (Infused) แสดงใน Table 1 พบว่า ผลิตภัณฑ์สาโทก่อนการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (TSS) และ ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละ) เท่ากับ 3.22 ± 0.01 13.00 ± 0.00 และ 6.33 ± 0.46 ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (TSS) และ ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละ) เท่ากับ 3.44 ± 0.02 12.75 ± 0.35 และ 6.75 ± 0.35 ตามลำดับ ซึ่งผลิตภัณฑ์สาโทก่อนและหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (TSS) และ ปริมาณแอลกอฮอล์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าสีของผลิตภัณฑ์สาโทก่อนและหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชาดอกบัวหลวง มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 46.47 ± 0.36 4.20 ± 0.01 และ 0.46 ± 0.01 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวงที่ได้มีสีชมพูอมม่วง ดังแสดงใน Figure 6

Table 1 Physical and chemical quality of wort products before and after fermentation in royal lotus tea leaves.

Physical and chemistry quality of wort products	Before infusion with lotus petal	After infusion with lotus petal
	tea leaves	tea leaves
pH Value	3.22±0.01 ^b	3.44±0.02 ^a
Total Soluble Solid (°Brix) ^{ns}	13.00±0.00	12.75±0.35
Alcohol content (%) ^{ns}	6.33±0.46	6.75±0.35
Color value		
Brightness (L*) ^{ns}	45.90±0.01	46.47±0.36
Redness (a*)	2.07±0.04 ^b	4.20±0.01 ^a
Yellowness (b*)	0.35±0.01 ^b	0.46±0.01 ^a

Remark : Different letters in the same row means there is a statistically significant difference ($p \leq 0.05$).

ns means there is no statistical significant difference ($p > 0.05$).

Table 2 The appearance (Eye Appearance) from Pathum Thani Rice Wort Products.

Pathum Thani Rice Wort Products	Physical properties		
	Color	Turbidity	Smell
Before infusion with royal lotus tea leaves	+	++	+
After infusion with royal lotus tea leaves	++	++	+++

Remark : 1) Color : + white, ++ light pink, +++ dark pink

2) Clear turbidity : + the product is clear, ++ the product is slightly cloudy, +++ The product looks very cloudy

3) Smell : + no smell, ++ a light lotus aroma, +++ a strong lotus aroma



Figure 6 Wort product before fermentation in royal lotus tea leaves (left), Wort product after fermentation in royal lotus tea leaves (right).

ผลการแสดงลักษณะที่ปรากฏ (Eye Appearance) จากการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์สาโท ก่อนและหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง แสดงใน Table 2 พบว่า ของผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชา กลีบดอกบัวหลวงแสดงลักษณะทางด้านสีมีสีชมพู และมี

กลิ่นหอมจากดอกบัวหลวงมากกว่าผลิตภัณฑ์สาโทก่อน การหมักในใบชาดอกบัวหลวงส่วนลักษณะด้านความขุ่นใส พบว่า ผลิตภัณฑ์สาโทก่อนและหลังการหมักในใบชา กลีบดอกบัวหลวงมีลักษณะขุ่นเล็กน้อย

Table 3 Acceptance testing of commercial wort products, wort before fermentation in royal lotus tea leaves and wort products after fermentation in royal lotus tea leaves

Sensory attributes	Wort products commercial	Wort product before infusion with royal lotus	Wort product after infusion with royal lotus
		tea leaves	tea leaves
Appearance	6.66±1.66 ^b	6.08±1.68 ^b	7.34±1.35 ^a
Color	6.90±1.93 ^b	6.12±1.53 ^c	7.86±1.40 ^a
Odor	5.94±2.17 ^b	6.12±2.34 ^b	6.26±2.07 ^a
Taste ^{ns}	6.68±2.02	6.90±2.08	6.78±1.96
Overall liking	6.98±1.20 ^b	7.00±1.63 ^b	7.10±1.42 ^a

Remark : Different letters in the same row means there is a statistically significant difference ($p \geq 0.05$).

ns means there is no statistical significant difference ($p > 0.05$).

3.2 การทดสอบการยอมรับผู้บริโภคต่อสาโทจากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชากลีบดอกบัวหลวง

ผลการทดสอบการยอมรับของผลิตภัณฑ์สาโททางการค้า ผลิตภัณฑ์สาโทก่อนการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง และผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง จากผู้ทดสอบชิมจำนวน 50 คน (Table 3) พบว่า ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวงมากที่สุด โดยมีคะแนนค่าเฉลี่ย คุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม เท่ากับ 7.34±1.35 7.86±1.40 6.26±2.07 6.78±1.96 และ 7.10±1.42 ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวงมีคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์สาโททางการค้า และผลิตภัณฑ์สาโทก่อนการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง ส่วนคุณลักษณะด้านรสชาติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากการทดสอบการยอมรับ ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี และกลิ่นของผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวงมากที่สุด เพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีชมพูอมม่วง ซึ่งกระบวนการหมัก (Infused) ด้วยชากลีบดอกบัวหลวง แอลกอฮอล์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์สาโทจะไปละลายสารที่ให้สี และกลิ่นรสที่อยู่ในกลีบดอกบัวหลวง เช่น แอนโทไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิก ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์สาโทที่ได้มีสีชมพูอมม่วง และมีกลิ่นหอมอ่อน ๆ ของดอกบัว ซึ่งคล้ายกับวิธีการทำเครื่องดื่มแอลกอฮอล์รสหวานที่มีชื่อเสียงของประเทศอิตาลี อย่างลิมอนเซลโล่ (Limoncello) (Naviglio *et al.*, 2021)

เพื่อสร้างเอกลักษณ์เฉพาะท้องถิ่นทำให้ได้สีชมพูอมม่วงใส และได้กลิ่นอ่อนจากบัว

ผลการสำรวจการยอมรับและการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ จากผู้ทดสอบชิมจำนวน 50 คน พบว่าชื่นชอบผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวงมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 42.00 รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์สาโทก่อนการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง คิดเป็นร้อยละ 32.00 และ ผลิตภัณฑ์สาโททางการค้าคิดเป็นร้อยละ 26.00 ตามลำดับ ด้านความชอบผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชากลีบดอกบัวหลวง พบว่ามีความชอบระดับมาก คิดเป็นร้อยละ 80.95 และเฉย ๆ คิดเป็นร้อยละ 19.05 ด้านความตั้งใจในการซื้อผลิตภัณฑ์หากผลิตออกจำหน่าย พบว่า ผู้ทดสอบชิมซื้อผลิตภัณฑ์มาบริโภคแน่นอน คิดเป็นร้อยละ 71.43 และ อาจจะซื้อมาบริโภคคิดเป็นร้อยละ 28.57 ตามลำดับ

4. สรุป

ผลิตภัณฑ์สาโทจากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชาดอกบัวหลวงใช้ระยะเวลาในการหมัก 10 วัน มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 3.22±0.01 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในของเหลว (TSS) เท่ากับ 13.00±0.00 องศาบริกซ์ และมีปริมาณแอลกอฮอล์ ร้อยละ 6.33±0.46 มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 46.47±0.36 4.20±0.01 และ 0.46±0.01 ตามลำดับ

ผลิตภัณฑ์สาโทหลังการหมักในใบชาดอกบัวหลวงที่ได้มีสีชมพูอมม่วง ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนค่าเฉลี่ยด้านคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม เท่ากับ 7.34±1.35 7.86±1.40

6.26±2.07 6.78±1.96 และ 7.10±1.42 ตามลำดับ ด้านความตั้งใจในการซื้อผลิตภัณฑ์หากผลิตออกจำหน่ายพบว่าผู้ทดสอบชิมซื้อผลิตภัณฑ์มาบริโภคแน่นอน คิดเป็นร้อยละ 71.43

ผลจากการศึกษานี้ จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าวหอมปทุมธานีจะช่วยสนับสนุนเกษตรกรในช่วงที่ข้าวมีปริมาณล้นเกินกว่าความต้องการบริโภคในท้องตลาด อีกทั้งยังทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่เป็นทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคที่เป็นเอกลักษณ์ของจังหวัดปทุมธานี ซึ่งใช้วัตถุดิบที่อยู่ในพื้นที่ ได้แก่ ข้าวหอมปทุมธานี และดอกบัวหลวง อีกทั้งยังสามารถส่งผลต่อการท่องเที่ยวเชิงอาหารอีกด้วย

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อเสนอแนะการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ข้อดีของการผลิตสาโทจากพันธุ์ข้าวหอมปทุมธานีหมักชาดอกบัวหลวงของจังหวัดปทุมธานีคือสามารถลดระยะเวลาจากการผลิตแบบปกติ 14-16 วัน ในการหมักเพิ่มให้ได้ค่าน้ำตาลที่ยอมรับ แม้ไม่ได้มีปริมาณแอลกอฮอล์ที่สูงมาก แต่ก็เหมาะสมกับการพัฒนาที่ตรงต่อผู้บริโภครุ่นใหม่ เมื่อเปรียบเทียบกับแอลกอฮอล์ปัจจุบันที่มีขายตามท้องตลาด และเป็นกระแสในกลุ่มสุราพื้นบ้าน ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์อยู่ระดับร้อยละ 5.5-6.5 (ตัวอย่างเช่น สาโทร้อยละ 5.5 มิสเตอร์สาโทร้อยละ 5.5) เพื่อให้เข้าถึงผู้บริโภคได้ง่ายขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะการวิจัยในครั้งต่อไป

5.2.1. ศึกษาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในผลิตภัณฑ์สาโท

5.2.2 ศึกษาการใช้ข้าวชนิดอื่นของประเทศไทยในการผลิตผลิตภัณฑ์สาโท

5.2.3 ศึกษาการหมักสาโทในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

Charoenwattana, P., Pansmuthr, S., Kongsawat, D. and Phetprapai, A. 2009. **Research Report on Antimicrobial activity of *Nelumbo nucifera* Gaertn. Extracts.** Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)

Chuchat, K., Wichai, S. and Varavut, T. 2016. Study on Production of Sato from Indigenous Rice

Varieties in Nakhon Ratchasima, pp. 371-380. *In The National and International Graduate Research Conference 2016.* Khon Kaen University. (in Thai)

Department of Intellectual Property Ministry of Commerce. 2021. **Announcement of registration of Pathumthani fragrant rice geographic indication.** Available Source: <https://www.ipthailand.go.th/images/3534/2564/GI/GIAN168.pdf>, May 23, 2023. (in Thai)

Excise Department. 2023. **Liquor Act 1950.** Available Source: <https://www.excise.go.th/cs/groups/public/documents/document/mjaw/mdyx/~edisp/webportal16200061201.pdf>, May 23, 2023. (in Thai)

Jittima, K. 2023. Study of Sato Production with Japanese Sweet Potato and Sago Palm. **Journal of Research and Innovation in Science and Technology** 4(2): 47-57. (in Thai)

Kudpeng, C., Soemphol, W. and Tanamool, V. 2016. Study on Production of Sato from Indigenous Rice Varieties in Nakhon Ratchasima, pp. 371-380. *In The National and International Graduate Research Conference 2016.* Khon Kaen University, Thailand. (in Thai)

Matichon. 2023. **Progressive liquor doesn't want it to be just a trend.** Available Source: https://www.matichon.co.th/region/news_4013797, May 2, 2023. (in Thai)

Meilgaard, C., Morten, C., Gail, V. and Carr, B.T. 2007. **Sensory Evaluation Techniques.** CRC Press, Boca Raton.

Mokmungmuang, S., Panichprapha, T. and Phromsawat, P. 2017. **Research Report on Temperature study and the appropriate baking time for producing tea from lotus petals.** Phayao Pittayakhom School. (in Thai)

Naviglio, D., Montesano, D. and Gallo, M. 2021. Laboratory Production of Lemon Liqueur (Limoncello) by Conventional Maceration and a Two- Syringe System To Illustrate Rapid Solid-Liquid Dynamic Extraction. **Journal of Chemical Education** 92(5): 911-915.

- Pangborn, R.M. 2003. **Sensory techniques of food analysis. In Food Analysis, Principles and Techniques.** Volume 1: Physical Characterization, pp. 61-68. *In* Gruenwedel, D.W. and Whitaker, J.R., eds. Marcel Dekker, New York.
- Phakamat, R. and Iraphon, S. 2021. **Research Report on Development of mango wort and mango jam products to increase the value of local agricultural products in Na Chueak District, Maha Sarakham Province.** Maha Sarakham Rajabhat University. (in Thai)
- Pornpukdeewattana, S. 2003. Production of rice wine from off-season rice. Master of Science (Biotechnology), Kasetsart University. (in Thai)
- Thairath. 2023. **Local liquor trend.** Available Source: <https://www.thairath.co.th/news/local/localbusiness/2699153>, May 5, 2023. (in Thai)
- Yotmanee, S. and Naksang, P. 2021. The Study of Fermentation and the Effect of the Pasteurization on Chemical Compositions and Microbial Quality of Rice Wine Brewed from Black Sticky Rice. **PKRU SciTech Journal** 5(1): 25-35. (in Thai)



Research Article

การประยุกต์ใช้เชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการฉีดพ่นเพื่อควบคุมแมลง
ค่อมทอง *Hypomeces squamosus* (Fabricius) ในต้นทุเรียนระยะแตกใบอ่อน
Application of *Beauveria bassiana* (KMB1) to Spraying for Controlling of
Hypomeces squamosus (Fabricius) on Stage Young Leaves Period in Durian Trees

สุกฤตา อнуตรากุลชัย คมสันต์ สุป้อง และ ธิติ ทองคำงาม *

Sukritta Anutrakunchai, Khomsan Supong and Titi Thongkamngam *

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืชและภูมิทัศน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี 22210

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

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-09-21

Revised: 2024-03-27

Accepted: 2024-06-04

Keywords:

Beauveria bassiana (KMB1);

Hypomeces squamosus;

golden weevils;

durian young leaf period

Expansion of golden weevils *Hypomeces squamosus* (Fabricius) in durian orchards during the young leaf stage causes significant damage to durian growers. It has been reported that the weevils chew the young leaves excluding the middle vein. Therefore, effective methods to prevent and control the weevils are necessary to reduce the problem of their expansion in durian plantations. The objective of this research is to apply the fungus *Beauveria bassiana* through spraying to control the weevils in durian trees. The *H. squamosus* (Fabricius) samples were collected, and the insect fungi were identified based on molecular biology. It was found that all fungal isolates were *B. bassiana*. Laboratory control of the weevils was then conducted at concentrations of 10^4 , 10^6 , 10^8 , and 10^{10} spores per milliliter. The results showed that all concentrations could inhibit the weevil growth. Moreover, concentrations of 10^8 and 10^{10} spores per milliliter completely inhibited the growth of the weevils. Subsequently, a field experiment conducted during the young shoot growth period revealed that spraying *B. bassiana* at a concentration of 10^{10} spores per milliliter on young leaves of durian trees reduced the damage caused by the weevils by 64%. In summary, the application of *B. bassiana* fungus through spraying can be utilized as an alternative method for preventing and controlling the expansion of the golden weevils during the young leaf period of durian trees.

* Corresponding author.

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

Cite this article as:

Anutrakunchai, S., Supong, K. and Thongkamngam, T. 2025. Application of *Beauveria bassiana* (KMB1) to Spraying for Controlling of *Hypomeces squamosus* (Fabricius) on Stage Young Leaves Period in Durian Trees. *Recent Science and Technology* 17(2): 260494.

บทคัดย่อ

ปัญหาการแพร่ระบาดของแมลงค่อมทอง หรือ *Hypomeces squamosus* (Fabricius) ในสวนทุเรียนในระยะแตกใบอ่อนสร้างความเสียหายให้กับเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากแมลงค่อมทองเข้าไปทำลายโดยการกัดกินใบอ่อนจนเหลือแต่เพียงเส้นกลางใบจึงจำเป็นที่จะต้องมีการหาวิธีการป้องกันกำจัดที่สามารถช่วยลดปัญหาการแพร่ระบาดของแมลงค่อมทองในแปลงปลูกทุเรียน โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการฉีดพ่นเพื่อควบคุมแมลงค่อมทอง *Hypomeces squamosus* (Fabricius) ในต้นทุเรียน เริ่มจากการเก็บแมลงค่อมทองมาคัดแยกเชื้อราจากแมลงและจัดจำแนกทางสัณฐานวิทยาของเชื้อราโดยชีวโมเลกุล พบว่าเชื้อราที่แยกมาจากแมลงทุกไอโซเลท คือ *B. bassiana* (KMB1) 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแมลงค่อมทองในห้องปฏิบัติการ พบว่าทั้ง 4 ระดับความเข้มข้น (10^4 10^6 10^8 และ 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร) สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแมลงค่อมทองได้ อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้น 10^8 และ 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร พบเปอร์เซ็นต์การยับยั้งได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนในการทดลองในแปลงปลูกทุเรียนระยะแตกใบอ่อน พบว่าการฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ความเข้มข้น 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร สามารถลดเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายของแมลงค่อมทองกับใบทุเรียนอ่อนได้ถึง 64 เปอร์เซ็นต์ โดยสรุปจากผลการทดลองการฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) นำจะนำมาใช้เป็นทางเลือกในการป้องกันและควบคุมการแพร่ระบาดของแมลงค่อมทองในระยะแตกใบอ่อนของทุเรียนได้

คำสำคัญ: เชื้อราเบียวเวอร์เรีย, *Hypomeces squamosus*, แมลงค่อมทอง, ต้นทุเรียนระยะแตกใบอ่อนของทุเรียน

1. บทนำ

ในปัจจุบันเกษตรกรประสบปัญหาการแพร่ระบาดของแมลงศัตรูพืชที่เข้ามาทำลายผลผลิตทุเรียนทุกระยะตั้งแต่ช่วงแตกใบอ่อน โดยมีแมลงศัตรูพืชหลายหลายชนิด เช่น เพลี้ยไก่แจ้ เพลี้ยแป้ง เพลี้ยไฟ เพลี้ยอ่อน (Zaki, 1998; Burckhardt *et al.*, 2014) ที่เข้ามาดูดกินน้ำเลี้ยงที่ส่วนของใบอ่อนทำให้เกิดอาการบิดเบี้ยวเล็กผิดปกติ แต่ก็ยังไม่เป็นอันตรายมากเท่ากับการเข้าทำลายของแมลงกลุ่มจำพวกด้วงที่เข้ากัดกินใบ เช่น ด้วงกุหลาบ แมลงกินหนูน และแมลงค่อมทอง เป็นต้น (Erlar and Ates, 2015) ซึ่งแมลงค่อมทองเป็นแมลงกลุ่มด้วงที่พบมากในช่วงทุเรียนแตกใบอ่อนมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hypomeces squamosus* (Fabricius) สามารถเข้าทำลายได้ตลอดทั้งปี เริ่มจากตัวเต็มวัยเข้าไปกัดกินใบอ่อนและยอดอ่อน โดยใช้ปากกัดทะลุใบ เริ่มจากขอบใบด้านนอกก่อนแล้วค่อยทะลุเข้าไปสู่ภายในของใบ ทำให้ใบเกิดเป็นรอย เว้า ๆ แหว่ง ๆ ถ้าหากเกิดการแพร่ระบาดรุนแรงหรือมีปริมาณจำนวนตัวมากก็จะกัดกินใบเหลือแต่เพียงส่วนของก้านใบ ทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโต แคระแกรน เนื่องจากใบถูกทำลายทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ แมลงค่อมทองตัวเต็มวัย ชอบอยู่อาศัยรวมกันเป็นกลุ่ม หรืออยู่กันเป็นคู่ ๆ อยู่อาศัยตามใต้ใบ เคลื่อนที่ค่อนข้างเชื่องช้าไม่ว่องไว แต่ถ้าหากถูกรบกวนเพียงเล็กน้อยก็จะทิ้งตัวลงพื้น และขุดดินหนีจากภัยอันตราย หรือถ้าถูกคุกคามอย่างรุนแรงก็จะหยุดเคลื่อนไหวและหุบส่วนขาและหนวด เข้าเก็บภายในส่วนลำตัว นอกจากนี้ยังพบว่าแมลงค่อมทองยังเข้าทำลายพืชอื่นได้หลายชนิด เช่น มะม่วง ส้ม ลำไย ลิ้นจี่ เป็นต้น (Zafar *et al.*, 2016; Ullah *et al.*, 2018; Boston *et al.*, 2020)

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้เกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนตระหนักถึงวิธีการแก้ปัญหาการแพร่ระบาดของแมลงค่อมทอง โดยการใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์ในการฆ่าแมลง เพื่อช่วยควบคุมประชากรและลดปริมาณของแมลงให้อยู่ในวงที่จำกัด อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีฉีดพ่นไปให้สัมผัสกับตัวแมลงค่อมทองนั้นก็ยังคงมีข้อจำกัดเนื่องจากมีไขปกคลุมลำตัว นอกจากนั้นผนังลำตัวมีลักษณะแข็งคล้ายโล (เกาะกำบัง) จึงทำให้สารเคมีเข้าไปไม่สัมผัสถึงตัวของแมลงอีกทั้งแมลงค่อมทองนั้นหากได้รับการกระทบกระเทือนเพียงเล็กน้อยก็จะมีอาการทิ้งตัวลงพื้นดินจึงอาจจะทำให้ไม่สัมผัสกับสารเคมีได้เต็มที่ ดังนั้นการฉีดพ่นสารเคมีฆ่าแมลงจึงไม่ค่อยได้ผลในการควบคุม (Ambethger, 2009) จากข้อจำกัดดังกล่าวถ้าหากมีการนำจุลินทรีย์กลุ่มเชื้อราพิษแมลง (Entomopathogenic fungi) ได้แก่ เชื้อรา *Beauveria bassiana* *Metarhizium anisopliae* และ *Paecilomyces lilacinus* (Butt *et al.*, 1994; Zimmermann, 2007; Mahdneshtin *et al.*, 2011; Zapata *et al.*, 2021) มาประยุกต์ใช้และฉีดพ่นอาจจะช่วยลดปริมาณและสามารถช่วยควบคุมการแพร่ระบาดของแมลงค่อมทองได้ สำหรับเชื้อราพิษแมลงนั้นมีคุณสมบัติในการปรับตัวและติดไปกับอวัยวะต่าง ๆ ของแมลงได้ นอกไปจากนี้ส่วนขยายพันธุ์สามารถงอกส่วนขยายพันธุ์และแพร่กระจายในตัวแมลงได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นทำให้แมลงหยุดกินอาหารและตายในที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นสามารถติดไปกับแมลงตัวอื่น ๆ ได้เช่นกัน (Anutrakunchai *et al.*, 2019; Wang and Zheng, 2012; Oo *et al.*, 2017; Dannon *et al.*, 2020)

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการฉีดพ่นเพื่อควบคุมแมลงค่อมทอง *Hypomeces*

squamosus (Fabricius) ในต้นทุเรียนระยะแตกใบอ่อนของต้นทุเรียน ตลอดจนสามารถใช้เป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนทุกภาคของประเทศไทยได้นำไปใช้ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเก็บตัวอย่างและแยกเชื้อรากินแมลง

เก็บตัวอย่างแมลงค่อมทองที่พบในแปลงปลูกทุเรียนระยะแตกใบอ่อนจากแปลงเกษตรกรอำเภอเขาชะเมาตามลักษณะ (Figure 1 a-e) โดยสังเกตลักษณะใบทุเรียนอ่อนแบบเพสลาด (กิ่งอ่อนกิ่งแก่) มักเป็นส่วนที่พบแมลงค่อมทองกัดกิน โดยจะจับแมลงโดยใช้คีมจับแมลง (forceps) ใส่ลงกล่องพลาสติกใสแบบมีฝาปิด (เจาะบริเวณส่วนด้านบนของฝากล่องและปิดด้วยตะแกรงสแตนเลสเพื่อป้องกันไม่ให้แมลงหลบหนีออกมาภายนอกกล่อง) หลังจากนั้นจะตัดยอดอ่อนและใบอ่อนของทุเรียนนำมาใส่ลงในกล่องเพื่อให้แมลงค่อมทองได้กินเป็นอาหาร เมื่อเวลาผ่านไปรอสังเกตพฤติกรรมของแมลงจากการกินอาหาร การเคลื่อนไหว ถ้าหากแมลงค่อมทองตัวใดมีการหยุดกินอาหารจะจับแยกออกจากตัวอื่น ๆ มาเก็บใส่ไว้ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อและให้ความชื้นโดยการใส่สาลีชุบน้ำนิ่งมาเชื้อไว้ด้านใดด้านหนึ่งให้ห่างจากตัวแมลงเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อราชนิดอื่น ๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไปถ้าหากพบการเจริญของเส้นใยเชื้อราสีขาวขึ้นตามส่วนข้อต่อของแมลง เช่น ขา ลำตัว และ ปีก เป็นต้น ให้นำไปแยกเชื้อด้วยวิธี Single spore และ Tissue transplanting technique

(Lee *et al.*, 2019) โดยใช้เข็มเย็บสะกิดสปอร์หรือเส้นใยของเชื้อรามาเลี้ยงลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Water agar (WA) เป็นเวลา 3 วัน

หลังจากนั้นย้ายมาเลี้ยงบนอาหาร Potato dextrose agar (PDA) เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน นำไปจัดจำแนกโดยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของเชื้อตามวิธีการมาตรฐานของ Samson *et al.* (1988) เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแมลงต่อไป

2.2 การตรวจสอบและจัดจำแนกเชื้อ *Beauveria* sp. ในระดับชีวโมเลกุล

เลี้ยงเชื้อรา *B. bassiana* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Malt Extract Agar (MEA) ประมาณ 10 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นสกัดดีเอ็นเอโดยใช้ชุดน้ำยาสำเร็จรูป Prep man ultra (Applied Biosystems) โดยบริษัท Macrogen กรุงโซล ประเทศเกาหลี โดยชุดเส้นใยของเชื้อใส่ลงใน Eppendorf tube ขนาด 100 ไมโครลิตร หลังจากนั้นบดเส้นใยของเชื้อแล้วนำไปปั่นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส บั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที (rpm) ประมาณ 10 นาที เก็บสารแขวนลอยดีเอ็นเอที่ได้ไว้ในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปตรวจคุณภาพและปริมาณของดีเอ็นเอโดยเครื่องวัดคุณภาพดีเอ็นเอ Nano Drop spectrophotometer แล้วนำไป เพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ



Figure 1 Characteristics of damage leaf caused by *Hypomeces squamosus* (Fabricius) on young durian leaves. Tender durian leaves are commonly encountered as a favorite food source for the golden weevil. (a-b) Adult golden weevils coexisted on the leaf. (c) The weevils first chew at the edges of younger leaves, then progress toward the middle of the leaves(d), and severe damage to the leaf (e)

โดยวิธีการ PCR (polymerase chain reaction) ในส่วนของ rDNA (ITS5 และ ITS4) คือ primer ITS5 (5-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3) - ITS4 (5-CCTCCGCTTATTGATATGC-3) (White *et al.*, 1999) โดยทำการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ ITS ด้วยวิธี maximum likelihood (ML) (Linnakoski *et al.*, 2010) ด้วยโปรแกรม MEGA 11.0 กำหนดค่า bootstrap analysis (Tamura *et al.*, 2021) ให้มีค่าเท่ากับ 1,000 พร้อมรายงานผลเป็น Phylogenetic tree

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทองในสภาพห้องปฏิบัติการ

การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทอง โดยปล่อยแมลงค่อมทองลงไปจำนวน 5 ตัวต่อจานเพาะเชื้อ ดัดแปลงจากวิธีการของ Johnson *et al.* (2020) ขนาด 9 เซนติเมตร การฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ใช้ขวดสเปรย์แก้ว ขนาดบรรจุ 2 มิลลิลิตร ก่อนฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ให้เปิดฝาจานอาหารเลี้ยงเชื้อ ให้กว้างพอประมาณที่ละอองของเชื้อราที่สเปรย์สามารถฟุ้งกระจายไปโดนบริเวณส่วนกึ่งกลางของจานเพาะเลี้ยงเชื้อที่มีแมลงค่อมทองอยู่ โดยเตรียมสารแขวนลอยสปอร์ ความเข้มข้น 4 ระดับ ได้แก่ 10^4 , 10^6 , 10^8 และ 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร (ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ปริมาณ 2 มิลลิลิตรต่อจานอาหารเลี้ยงเชื้อ) วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized design (CRD) ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี ๕ ซ้ำ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กรรมวิธีที่ 1 กรรมวิธีควบคุม (ฉีดพ่นน้ำนิ่งฆ่าเชื้อ)
- กรรมวิธีที่ 2 ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) (10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร)
- กรรมวิธีที่ 3 ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) (10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร)
- กรรมวิธีที่ 4 ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) (10^8 สปอร์ต่อมิลลิลิตร)
- กรรมวิธีที่ 5 ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) (10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร)

บันทึกผลการทดลองโดยนับจำนวนแมลงค่อมทองที่ตายในแต่ละกรรมวิธี หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การตายของแมลงค่อมทอง ประเมินจากจำนวนแมลงค่อมทองหลังจากฉีดเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ว่ามีจำนวนที่ตายกี่ตัวเพื่อนำมาใช้คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การตายของแมลงค่อมทอง และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ โดยวิธี

Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นสังเกตการเจริญของเส้นใยเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) บนตัวของแมลงค่อมทองที่เกิดขึ้นภายใต้กล้องจุลทรรศน์พร้อมทั้งถ่ายภาพ

2.4 การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทองในแปลงปลูกทุเรียน

การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทองในแปลงปลูกทุเรียน ดัดแปลงจากวิธีการของ Johnson *et al.* (2020) ทดสอบกับต้นทุเรียนระยะแตกใบอ่อน (ช่วงใบเพสลาด) โดยคัดเลือกต้นทุเรียนต้นเล็กที่มีอายุ 2 ปี (ขนาดทรงพุ่มเท่าๆกัน) การฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ใช้ระบบอัดแรงดันอากาศ บรรจุ 2 ลิตร โดยกำหนดระดับความเข้มข้นที่ใช้พ่น คือ 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร (กรรมวิธีที่ให้ผลเปอร์เซ็นต์การตายดีที่สุดและแมลงค่อมทองตายเร็วที่สุด) โดยการฉีดพ่นจะเลือกช่วงเวลาเพื่อเป็นโจทย์วิจัยในครั้งนี้ วางแผนการทดลองแบบ CRD ประกอบด้วย 4 กรรมวิธี ๕ ซ้ำ ๕ ต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กรรมวิธีที่ 1 กรรมวิธีควบคุม (ฉีดพ่นน้ำนิ่งฆ่าเชื้อ)
- กรรมวิธีที่ 2 ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) (10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร) ช่วงเช้า 6.00-9.00 น.
- กรรมวิธีที่ 3 ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) (10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร) ช่วงกลางวัน 12.00-14.00 น.
- กรรมวิธีที่ 4 ฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) (10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร) ช่วงเย็น 16.00-18.00 น.

บันทึกผลการทดลองโดยนับจำนวนแมลงค่อมทองที่เข้าทำลายใบทุเรียนอ่อนในแต่ละกรรมวิธี เพื่อใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายใบของแมลงค่อมทอง ประเมินจากการเข้าทำลายยอดอ่อนของต้นทุเรียนจำนวน 10 ยอด โดยกำหนดหลักเกณฑ์ไว้ 3 ระดับ คือ ระดับ 1 เข้าทำลาย 1-3 ยอด (1-35 เปอร์เซ็นต์) ระดับ 2 เข้าทำลาย 4-6 ยอด (36-70 เปอร์เซ็นต์) ระดับที่ 3 เข้าทำลาย 7-10 ยอด (71-100 เปอร์เซ็นต์) และคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของการเข้าทำลายใบทุเรียน ประเมินได้จากค่าการเข้าทำลายใบในกรรมวิธีที่ฉีดพ่นด้วย *B. bassiana* (KMB1) ความเข้มข้นที่แตกต่างกันหักลบกับกรรมวิธีควบคุม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และถ่ายภาพประกอบ

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การเก็บตัวอย่างและการจำแนกเชื้อรากินแมลง

จากการเก็บตัวอย่างแมลงค่อมทองที่เข้าทำลายทุเรียนระยะแตกใบอ่อนจากพื้นที่แปลงเกษตรอำเภอเขาคิชฌกูฏ จำนวน 3 สวน สามารถเก็บแมลงค่อมทองมาเลี้ยงและสังเกตพฤติกรรมของการกินและการเคลื่อนไหว พบแมลงค่อมทองมีเส้นใยสีขาวขึ้นปกคลุมบริเวณลำตัว โดยเริ่มจากส่วนของข้อต่อ หนวด แขน และขา บริเวณส่วนอกยาวไปถึงปลายท้อง (Figure 2 a-b) หลังจากนำแมลงค่อมทองมาแยกเชื้อราที่ขึ้นปกคลุมลำตัว พบว่าลักษณะเส้นใยของเชื้อรามีลักษณะเป็นผลสีขาวเจริญอยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งจะเจริญเต็มจานอาหารเลี้ยงเชื้อใช้เวลา รวม 14 วัน หลังจากนั้นนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบส่วนขยายพันธุ์โคนิเดีย (Conidia) มีลักษณะ

กลมสีขาวแยกกันอยู่ส่วนบนของก้านชู (Phialides) (Figure 3 a-b) จากการตรวจสอบระดับชีวโมเลกุล และถอดรหัสลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้จากการทำ DNA sequencing และ Blast โดยใช้ primer ในส่วนของ rDNA (ITS5 และ ITS4) คือ primer ITS5 (5-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3)-ITS4 (5-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3) เปรียบเทียบกับข้อมูลพื้นฐานบน Gene Bank ใน NCBI เบื้องต้นได้เชื้อราในกลุ่ม *Beauveria* ด้วยวิธี maximum likelihood (ML) ด้วยโปรแกรม MEGA 11.0 กำหนดค่า bootstrap analysis ให้มีค่าเท่ากับ 1,000 และเมื่อนำไปทำ Phylogenetic tree เปรียบเทียบกับเชื้อ *Beauveria bassiana* สายพันธุ์อื่นๆ ก็พบว่ามีความใกล้เคียงกัน สามารถจัดจำแนกได้ว่าเป็นเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) 100 เปอร์เซ็นต์ (Figure 4)

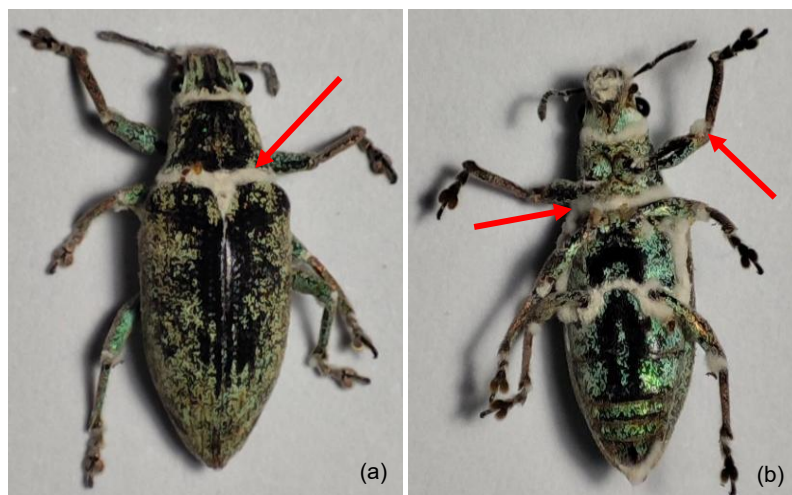


Figure 2 Hyphae of *Beauveria bassiana* that grew and covered on *Hypomeces squamosus* (Fabricius) body: the top portion from head to the base of the wings (a), and lower portion from mouth to the abdomen and around the joints of the arms, legs and chest (b).

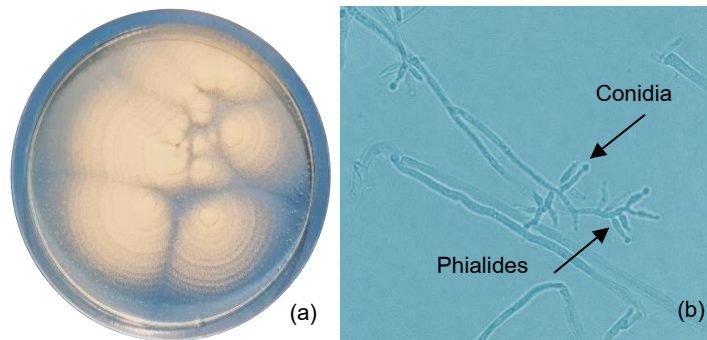


Figure 3 Morphological characteristics of *Beauveria bassiana* (KMB1): colony on PDA after 14 days of incubation period (a), and conidia and phialides (b).

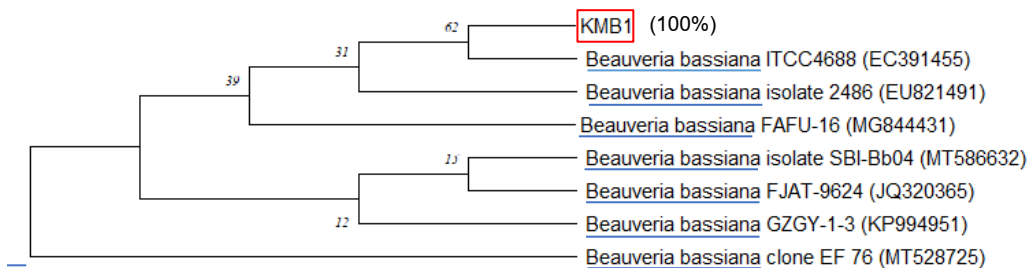


Figure 4 Phylogenetic tree of *Beauveria bassiana* (KMB1) built using maximum likelihood (ML) with ITS sequence data and a bootstrap test (1000 replications) through MEGA 11.0.

3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทองในสภาพห้องปฏิบัติการ

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทองในสภาพห้องปฏิบัติการ พบว่าการใช้เชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ทั้ง 4 ระดับความเข้มข้น (10^4 , 10^6 , 10^8 และ 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร) สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของแมลงค่อมทองได้ตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง (3-5 วันหลังการฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana*) พบเปอร์เซ็นต์การตายของแมลงค่อมทองอยู่ระหว่าง 24-92 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ระดับความเข้มข้น 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร เป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุด และแมลงค่อมทองตายเร็วที่สุด รองลงมาคือ ระดับความเข้มข้น 10^8 , 10^6 และ 10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1; Figure 5) หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงวันที่ 7 หลังการฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) พบว่าระดับ

ความเข้มข้น 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร แมลงค่อมทองตายทั้งหมดและเริ่มสังเกตเห็นเป็นเส้นใยสีขาวเจริญปกคลุมลำตัว (Figure 5) และในระดับความเข้มข้นอื่น ๆ ก็มีแนวโน้มให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับในช่วงแรกของการทดลอง และเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (14 วันหลังการฉีดพ่นเชื้อ) พบว่าในกรรมวิธีที่ฉีดพ่นด้วยระดับความเข้มข้น 10^8 สปอร์ต่อมิลลิลิตร แมลงค่อมทองตายทั้งหมดและเริ่มมีเส้นใยเจริญปกคลุมลำตัวแมลงค่อมทอง ในขณะที่กรรมวิธีที่ฉีดพ่นด้วย 10^4 และ 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร พบว่าแมลงที่เหลื้อยังตายไม่หมดแต่หยุดกินอาหารและมีการเคลื่อนไหวช้าลง โดยมีเปอร์เซ็นต์การตายเท่ากับ 76 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1; Figure 5) สอดคล้องกับการวิจัยของ Mascarín and Jaronski (2016) ซึ่งพบว่าเชื้อรา *B. bassiana* ที่ความเข้มข้น 10^3 - 10^7 สปอร์ต่อมิลลิลิตร สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแมลงกินหนูนและด้วงวงได้

Table 1 Percentage of mortality of adult of *Hypomeces squamosus* (Fabricius) infected by *Beauveria bassiana* (KMB1) in vitro

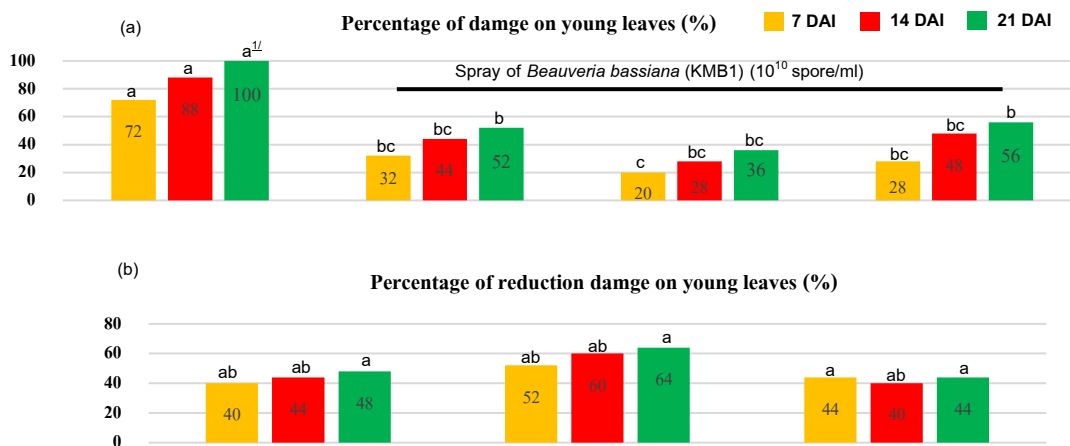
Treatment	Percentage of Mortality (%) ¹					
	3 DAI ²	5 DAI	7 DAI	10 DAI	14 DAI	C.V.
Tr 1 Spray of water (Healthy control)	0d ³	0d	0d	0c	0c	-
Tr 2 Spray of <i>B. bassiana</i> (KMB1) (10 ⁴ spore/ml)	24Cc	32Bc	36Bc	68Bb	76ABb	17.6
Tr 3 Spray of <i>B. bassiana</i> (KMB1) (10 ⁶ spore/ml)	36Bbc	56Bb	76Bb	80Bb	88Aa	15
Tr 4 Spray of <i>B. bassiana</i> (KMB1) (10 ⁸ spore/ml)	68Bb	76Bb	88Aa	92Aa	100Aa	4.1
Tr 5 Spray of <i>B. bassiana</i> (KMB1) (10 ¹⁰ spore/ml)	80Ba	92Aa	100Aa	100Aa	100Aa	3.7
C.V. (%)	23.2	19.7	11.2	4.7	3.4	-
F-value	*	*	*	*	*	-

¹ Percent of Mortality = (total number of insects – number of insect dead) x 100² DAI = Day after inoculation³ Values followed by lowercase letters in the same row and uppercase letters in the same column are not significantly different at P = 0.05, according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT).**Figure 5** Adults of *Hypomeces squamosus* (Fabricius) were sprayed with a spore suspension of *Beauveria bassiana* (KMB1) at four different concentrations (10⁴, 10⁶, 10⁸ and 10¹⁰ spore/ml) following a 14-day inoculation period.

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทองในแปลงปลูกทุเรียน

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ในการควบคุมแมลงค่อมทองในแปลงปลูกทุเรียนระยะแตกใบอ่อน พบว่าการใช้เชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ระดับความเข้มข้น 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร ฉีดพ่นในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเช้า (6.00-9.00 น.) กลางวัน (12.00-15.00 น.) และเย็น (17.00-19.00 น.) จากผลการทดลองในช่วงแรก 7 วันหลังการฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* (KMB1) ยังพบการเข้าทำลายของแมลงค่อมทองอยู่ระหว่าง 20-32 เปอร์เซ็นต์ และช่วงเวลากลางวัน เป็นช่วงเวลาที่พบการเข้าทำลายน้อยที่สุด รองลงมาคือช่วงเย็น (17.00-19.00 น.) และช่วงเวลาที่พบการเข้าทำลายใบอ่อนมากที่สุดคือ ช่วงเช้า (6.00-9.00 น.) เมื่อเทียบกับกรรมวิธีที่ฉีดพ่นด้วยน้ำเปล่ากับพบเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายสูงที่สุดเท่ากับ 72 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 6) หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (21 หลังการฉีดพ่นเชื้อรา) พบว่าเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายของทุกกรรมวิธีเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นเด่นชัดในกรรมวิธีที่ฉีดพ่นน้ำเปล่า ที่เพิ่มขึ้นถึง 100 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือใบอ่อนของทุเรียนถูกแมลงค่อมทองกัดกินเหลือแต่เพียงเส้นกลางใบ (Figure 8) ในขณะที่เดียวกันกรรมวิธีที่ฉีดพ่นด้วยเชื้อรา *B. bassiana* ระดับ

ความเข้มข้น 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร ช่วงกลางวัน (12.00-15.00 น.) ก็เป็นช่วงเวลาที่พบการเข้าทำลายของแมลงค่อมทองน้อยที่สุด รองลงมาคือ ช่วงเช้า และช่วงเย็น พบการเข้าทำลาย เท่ากับ 36, 52 และ 56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P = 0.05$ (Figure 6) และเมื่อนำค่าของเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายของแมลงค่อมทองมาคิดวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การลดลงของการเข้าทำลายหลังฉีดพ่นเชื้อรา *B. bassiana* ก็สามารถสรุปได้ว่า ช่วงระยะเวลามีผลต่อการเข้าทำลายของแมลงค่อมทอง และการใช้เชื้อรา *B. bassiana* สามารถช่วยลดเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายของแมลงค่อมทองได้อยู่ในช่วง 40-64 เปอร์เซ็นต์ (Figure 7) สอดคล้องกับการทดลองของ White *et al.* (2021) ทดสอบเชื้อรา *B. bassiana* 4×10^{11} สปอร์ต่อมิลลิลิตรสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของตัวอ่อนแมลงวันบ้าน นอกจากนั้นยังทำให้ตัวอ่อนที่พัฒนาไปเป็นตัวเต็มวัยเจริญไม่สมบูรณ์ เพราะเชื้อรา *B. bassiana* ไปส่งผลต่อกระบวนการฟักเป็นตัวเต็มวัยนอกจากนี้งานทดลองของ Nichanun (2020) ที่ทดสอบเชื้อรา *B. bassiana* ความเข้มข้น 10^7 - 10^9 สปอร์ต่อมิลลิลิตรกับเพลี้ยจักจั่นปีกลายหยัก และเพลี้ยจักจั่นสีเขียว สามารถควบคุมได้ 67 และ 80 เปอร์เซ็นต์ และงานวิจัยของ Lin *et al.* (2017) ทดสอบเชื้อรา *B. bassiana* 10^1 - 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร พบว่าสามารถควบคุมเพลี้ยอ่อน และมวนแดงในข้าวโพดได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



^{1/} Values followed by lowercase letters in the same row and uppercase letters in the same column are not significantly different at $P = 0.05$, according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

Figure 6 Percentage of leaf damage (a) and reduction (b) by *Hypomeces squamosus* (Fabricius) after spraying with a spore suspension of *Beauveria bassiana* (KMB1) at different time intervals (morning, afternoon and evening) at 7, 14 and 21 days after the inoculation period.

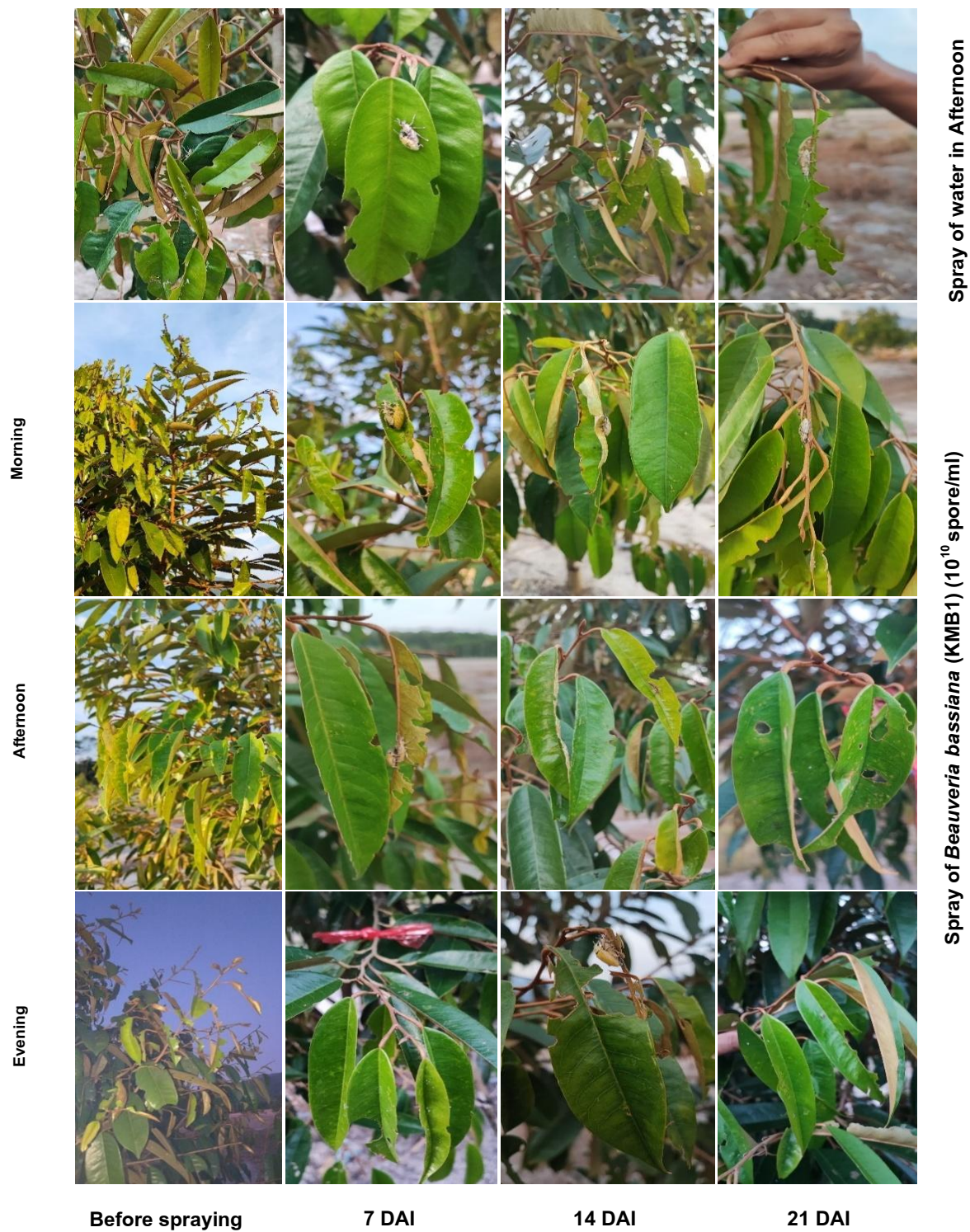


Figure 7 Percentage of leaf damage by *Hypomeces squamosus* (Fabricius) after spraying with *Beauveria bassiana* (KMB1) at different time intervals (morning, afternoon and evening) at 7, 14 and 21 days after inoculation.

4. สรุป

จากการเก็บตัวอย่างแมลงคอมทองศัตรูของทุเรียนในช่วงแตกใบอ่อนและนำมาแยกเชื้อรากินแมลงและจัดจำแนกทางสัณฐานวิทยาและระดับชีวโมเลกุล พบว่ามีความคล้ายคลึงกับเชื้อรา *Beauveria bassiana* ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นเมื่อนำมาทำการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแมลงคอมทองในห้องปฏิบัติการ พบว่าสารแขวนลอยสปอร์ทั้ง 4 ระดับความเข้มข้น (10^4 , 10^6 , 10^8 และ 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร) สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแมลงคอมทองได้ โดยที่ความเข้มข้น 10^8 และ 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร พบการยับยั้งได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความเข้มข้น 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร พบแมลงคอมทองตายทั้งหมดตั้งแต่วันที่ 7 หลังการฉีดพ่น และพบการเจริญของเส้นใยเชื้อราขึ้นปกคลุมลำตัวแมลงคอมทอง ในส่วนของการทดลองในแปลงปลูกทุเรียนระยะแตกใบอ่อน พบว่าช่วงเวลาที่ฉีดพ่นมีผลต่อการเข้าทำลายของแมลงคอมทองและการฉีดพ่นเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) ความเข้มข้น 10^{10} สปอร์ต่อมิลลิลิตร สามารถลดเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายของแมลงคอมทองกับใบทุเรียนอ่อนได้ถึง 64 เปอร์เซ็นต์ โดยสรุปจากผลการทดลองการฉีดพ่นเชื้อรา *Beauveria bassiana* (KMB1) น่าจะนำมาใช้เป็นแนวทางและทางเลือกให้กับเกษตรกรผู้สนใจในการฉีดพ่นและป้องกันกำจัดแมลงคอมทองในช่วงทุเรียนแตกใบอ่อนได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการกีฏวิทยาและโรคพืชวิทยา ของสาขาเทคโนโลยีการผลิตพืชและภูมิทัศน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ทำงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

Ambethger, V. 2009. Potential of entomopathogenic fungi in insecticide resistance management. **Journal of Biopesticide** 2: 177-193.

Anutrakunchai, S., Tongla, T. and Thongkamngam, T. 2019. A Survey of Shot-Hole Borer (*Xyleborus fornicates* Eichoff) Scolytidae: Coleoptera-an Insect pest on durian in Chanthaburi province, pp. 118-123. 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.

Boston, W., Leemon, D. and Cunningham, J.P. 2020. Virulence screen of *Beauveria bassiana* isolates for Australian Carpophilus (Coleoptera: Nitidulidae) beetle biocontrol. **Agronomy** 10(8): 1207.

Burckhardt, D., Ouvrard, D., Queiroz, D. and Percy, D. 2014. Psyllid host-plants (Hemiptera: Psylloidea): Resolving a semantic problem. **Florida Entomologist** 97(1): 242-246.

Butt, T.M., Ibrahim, L., Ball, B.V. and Clarks, S.J. 1994. Pathogenicity of the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* against crucifer pests and the honey bee. **Bicontrol Science and Technology** 4(2): 207-214.

Dannon, H.F., Dannon, A.E., Douro-Kpindou, O.K., Zinsod, A.V., Houndete, A.T., Toffa-Mehinto, J., Elegbede, I.A.T.M., Olou, B.D. and Tamo, M. 2020. Toward the efficient use of *Beauveria bassiana* in integrated cotton insect pest management. **Journal of Cotton Research** 3: 24-45.

Erler, F. and Ates, A.O. 2015. Potential of two entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* (Coleoptera: Scarabaeidae), as biological control agents against the June beetle. **Journal of Insect science** 15(1): 44-62.

Johnson, D.M., White, R.L., Pereira, R.M. and Geden, C.J. 2020. *Beauveria bassiana* culturing and harvesting for bioassays with House Flies. **Journal of Insect Science** 20(6): 1-7.

Lee, T.J., Zobayed, S., Firmani, F. and Park, E. 2019. A novel automated transplanting system for plant tissue culture. **Biosystems Engineering** 181: 63-72.

Lin, G., Tanguay, A., Guertin, C., Todorova, S. and Brodeur, J. 2017. A new method for loading predatory mites with entomopathogenic fungi for biological control of their prey. **Biological Control** 115: 105-111.

- Linnakoski, R., Beer, Z.W., Ahtiainen, J., Sidorov, E., Niemela, P., Pappinen, A. and Wingfield, M.J. 2010. Ophiostoma spp. associated with pine– and spruce–infesting bark beetles in Finland and Russia. **Persoonia** 25: 72-93.
- Mahdneshtin, Z., Vojoudi, S., Ghosta, Y., Safaralizadeh, M.H. and Saber, M. 2011. Laboratory evaluation of the entomopathogenic fungi, Iranian isolates of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin and *Metarhizium anisopliae* (Metsch) Sorokin against the control of the cowpea weevil, *Callosobruchus maculatus* F. (Coleoptera: Bruchidae). **African Journal of Microbiology Research** 5(9): 5215-5220.
- Mascarin, G.M. and Jaronski, S.T. 2016. The production and uses of *Beauveria bassiana* as a microbial insecticide. **World Journal of Microbiology and Biotechnology** 32(11): 177-203.
- Nichanun, K. 2020. Utilization of Entomopathogenic Pathogenic Fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* (Metschn.) Control *Recilia dorsalis* and *Nephotettix virescens* (Hemiptera: Cicadellidae). **Khon Kaen Agriculture Journal** 48(1): 153-162. (in Thai)
- Oo, N.L., Mekkamol, S., Srithi, K. and Saengyot, S. 2017. Effect of different concentrations of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin against corn leaf aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae). **Interdisciplinary Research Review** 12(3): 26-30.
- Samson, R., Evans, H. and Latge, J.P. 1988. **Atlas of Entomopathogenic fungi**. Springer Verlag Publication, New York.
- Tamura, K., Stecher, G. and Kumar, S. 2021. MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. **Molecular Biology and Evolution** 38: 3022-3027.
- Ullah, M.I., Arshad, M., Abdullah, A., Khalid, S., Iftikhar, Y. and Zahid, A.M. 2018. Use of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* (Hyphomycetes: Moniliales) and *Isaria fumosorosea* (Hypocreales: Cordycipitaceae) to control *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) under laboratory and semi-field conditions. **Egyptian Journal of Biological Pest Control** 28: 75-80.
- Wang, J. and Zheng, C. 2012. Characterization of newly discovered *Beauveria bassiana* isolate to *Frankliniella occidentalis* Perganda, a non-native invasive species in China. **Microbiological Research** 167(2): 116-120.
- White, R.L., Geden, C.J. and Kaufman, P.E. 2021. Exposure timing and method affect *Beauveria bassiana* (Hypocreales: Cordycipitaceae) efficacy against House Fly (Diptera: Muscidae) Larvae. **Journal of Medical Entomology** 58(1): 372-378.
- White, T.J., Bruns, T.D., Lee, S.B. and Taylor, J.W. 1999. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA Genes for phylogenetics, pp. 315-322. In Innis, M.A., Gelfand, D.H., Sninsky, J.J. and White, T.J., eds. **PCR Protocols a Guide to Methods and Applications**. Academic Press, Inc. New York.
- Zafar, J., Freed, S., Khan, B.A. and Farooq, M. 2016. Effectiveness of *Beauveria bassiana* Against Cotton Whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Aleyrodidae: Homoptera) on Different Host Plants. **Pakistan Journal of Zoology** 48(1): 91-99.
- Zaki, F.N. 1998. Efficiency of the entomopathogenic fungus, *Beauveria bassiana* (Bals), against *Aphis craccivora* Koch and *Bemisia fabae*, Gennadius. **Journal of Applied Entomology (Zeitschrift fuer Angewandte Entomologie)** 122(7): 397-399.
- Zapata, Q.I., Gonzalez, F.M.S., Santillana, L.E.J., Gonzalez, N.A. and Pacheco, G.F.L. 2021. Late effects of *Beauveria bassiana* on larval stages of *Aedes aegypti* Linneo, 1762 (Diptera: Culicidae). **Brazilian Journal of Biology** 10(82): e237789.
- Zimmermann, G. 2007. Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. **Biocontrol Science and Technology** 7(6): 553-596.



Research Article

การสร้างสมการพยากรณ์สำหรับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี :
กรณีศึกษา วัชพืชบริเวณเขตอำเภอเมือง จังหวัดตาก

The Equation for the Theoretical Ethanol Yield:
A Case Study of Weed in Muang District, Tak Province

บุญพริก รอดบำรุง^a และ เนรัญชรา เกตุมี^{b*}

Boondarick Rodbumrung^a and Narunchara Katemee^{b*}

^a กลุ่มวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

^a Department of Sciences, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand.

^b กลุ่มวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

^b Department of Mathematics, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2023-11-24

Revised: 2024-03-07

Accepted: 2024-05-13

Keywords:

weed;

cellulose;

ethanol;

multiple regression;

forecasting of the theoretical ethanol yield

This research studied the diversity of weed species, the chemical compositions of weeds and the theoretical ethanol yields. The weed samples were collected in Muang District, Tak Province, by the quadrat sampling method. Data on the chemical compositions of weeds were used to evaluate the correlation for the equation of the theoretical ethanol yield forecast by multiple regression analysis. The result showed that Fabaceae was the family with the largest number of weeds in this area. The chemical composition analysis showed that *Physalis angulata* L. had the highest moisture and ash content. *Phragmites karka* (Retz.) Trin. ex Steud. had the highest cellulose content and theoretical ethanol yield, while *Cyperus pilosus* Vahl and *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit had the highest hemicellulose and lignin content, respectively. The results of the study on the correlation between the chemical composition of weeds and the theoretical ethanol yields showed that cellulose content was the best indicator for all the chemical compositions of weeds. The equation for the theoretical ethanol yields had a coefficient of determination (R^2) value of 80.7%.

* Corresponding author.

E-mail address: narunchara.ket@gmail.com

Cite this article as:

Rodbumrung, B. and Katemee, N. 2025. The Equation for the Theoretical Ethanol Yield: A Case Study of Weed in Muang District, Tak Province. **Recent Science and Technology** 17(2): 261341.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสำรวจความหลากหลายชนิดของวัชพืชองค์ประกอบทางเคมีในวัชพืชและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี โดยทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างวัชพืชบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดตาก ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบวางแปลง ประเมินความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีในวัชพืช เพื่อสร้างสมการพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ ผลการวิจัยพบว่า วัชพืชที่พบมากที่สุดคือ วงศ์ Fabaceae เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัชพืช พบว่า *Physalis angulata* L. ให้ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าสูงสุด *Phragmites karka* (Retz.) Trin. ex Steud. ให้ปริมาณเซลลูโลสและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีสูงสุด สำหรับ *Cyperus pilosus* Vahl และ *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit ให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและปริมาณลิกนินสูงสุด ตามลำดับ จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีในวัชพืชและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี พบว่าปริมาณเซลลูโลสมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีมากที่สุด เมื่อนำมาสร้างสมการพยากรณ์ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจสูงถึงร้อยละ 80.7

คำสำคัญ: วัชพืช, เซลลูโลส, เอทานอล, การถดถอยพหุคูณ, การพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

1. บทนำ

การใช้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะพลังงานเชื้อเพลิงในระบบขนส่งมวลชนและภาคอุตสาหกรรม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกประเทศรวมทั้งประเทศไทย ส่งผลให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ซึ่งมีสาเหตุมาจากภาวะโลกร้อน (Global Warming) จากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกออกสู่บรรยากาศโลกเป็นจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นในการหาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้พลังงานทดแทนจึงเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว (Broda *et al.*, 2022) เอทานอลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานและอุตสาหกรรมต่าง ๆ การนำเอทานอลมาผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงจะช่วยเพิ่มค่าออกเทนทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรสออกไซด์ลดลง (Pacheco and Silva, 2019) เอทานอลยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมสำหรับผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ (Bio Plastic) ทำให้ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Abe *et al.*, 2021) เอทานอลผลิตได้จากวัตถุดิบ 3 ประเภท ได้แก่ 1) วัตถุดิบที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย เป็นต้น 2) วัตถุดิบที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด และพืชตระกูลหัว เป็นต้น และ 3) วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Material) เช่น ฟางข้าว หนุ่ย และไม้ เป็นต้น (Barros-Rios *et al.*, 2015) วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมและน่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบเอทานอลและการผลิตพลาสติกชีวภาพเพราะไม่ใช่พืชอาหาร (Food Crop) และมีราคาถูก (Broda *et al.*, 2022) อีกทั้งยังเป็น

การช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาทำลายวัชพืช และในปี 2566 คณะกรรมการบริหารการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียวมีมติส่งเสริมการนำเอทานอลไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นนอกเหนือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพและการผลิตสุรา (The Secretariat of the Cabinet, 2023) ลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและความหลากหลายทางสายพันธุ์ (Fatma *et al.*, 2018) วัชพืช (Weed) เป็นวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสชนิดหนึ่งที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 25-40% เฮมิเซลลูโลส 25-50% และลิกนิน 10-30% (Howard *et al.*, 2003) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล โดยอาศัยการปรับสภาพ (Pretreatment) วัตถุดิบไปเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและการหมัก (Fermentation) เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล (Premjet, 2019) โดยมีรายงานการศึกษาของ Prasertwasu *et al.* (2014) ได้ผลิตเอทานอลจากวัชพืช *Pennisetum polystachion* (L.) Schult. โดยผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยต่างและใช้เชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5596 ในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้ผลผลิตเอทานอลเท่ากับ 16 กรัมต่อลิตร ภายใน 24 ชั่วโมง สำหรับวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเอทานอลควรมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูงและปริมาณลิกนินต่ำ (Ahorsu *et al.*, 2018) โดยวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสที่ให้ผลผลิตน้ำตาลกลูโคสสูงคือ วัตถุดิบที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดสำหรับการนำมาผลิตเอทานอล นอกจากนั้นผลผลิตเอทานอลยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลส โดยปริมาณเซลลูโลสสูงจะให้ผลผลิตเอทานอลสูง (Kikas *et al.*, 2016; Raud and Kikas, 2020) อีกทั้งยังมีรายงานการศึกษาของ Premjet *et al.* (2013) ได้ทำการสำรวจวัชพืชที่มีศักยภาพสำหรับผลิต

เอทานอลและจากการประมาณค่าปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี พบว่าวัชพืชที่มีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูงทำให้ผลผลิตเอทานอลทางทฤษฎีสูง โดยผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี หมายถึง ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการเคมีซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ รวมถึงการศึกษาของ Kikas et al. (2016) ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของ *Helianthus tuberosus* L., *Cannabis sativa* L., *Helianthus annuus* L. และวัชพืช *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth. & Hook.f. ex Franch. สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่า *H. tuberosus* L. ที่มีปริมาณเซลลูโลสต่ำที่สุดจะให้ผลผลิตเอทานอลต่ำที่สุดในขณะที่ *C. sativa* L. มีปริมาณเซลลูโลสสูงที่สุดจะให้ผลผลิตเอทานอลสูงที่สุด นอกจากนี้ ยังพบว่าผลผลิตเอทานอลกับปริมาณลิกนินไม่มีสหสัมพันธ์กัน แต่ผลผลิตเอทานอลกับปริมาณเซลลูโลสมีสหสัมพันธ์ทางบวก

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่ามีการศึกษาถึงสหสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีในวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเอทานอลซึ่งพบทั้งผลการทดลองที่มีสหสัมพันธ์ทางบวก และไม่มีสหสัมพันธ์ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการสำรวจวัชพืชบริเวณเขตอำเภอเมือง จังหวัดตาก ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในวัชพืช และนำข้อมูลที่ได้ไปศึกษาหาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีในวัชพืช เพื่อใช้สร้างสมการพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส

วัชพืชเป็นวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล โดยอาศัยการปรับสภาพวัตถุดิบไปเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและการหมักน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวไปเป็นเอทานอล (Premjet, 2019) โดยเซลลูโลสประกอบไปด้วยน้ำตาลเฮกโซส (HEXT) และเฮมิเซลลูโลสประกอบไปด้วยน้ำตาลเพนโทส (PENT) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อทำการย่อยสลายวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริกจะทำให้ให้น้ำตาลเหล่านี้ถูกปลดปล่อยออกมา กระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจนได้ผลผลิตเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวให้คิดเป็น 100% ตามทฤษฎี ดังนั้นปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของวัชพืชแต่ละชนิดจะถูก

นำมาใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณน้ำตาลเฮกโซสและเพนโทส สำหรับผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำตาลเฮกโซส (HEXTEL) และน้ำตาลเพนโทส (PENTEL) ให้คิดเป็น 100% ตามทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำน้ำตาลเฮกโซสและน้ำตาลเพนโทสมาใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณ ดังนั้นการคำนวณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีสามารถคำนวณตามสมการของ Premjet et al. (2013)

$$\text{HEXT} = b \times Y_h \times \text{HEX} \quad \text{Kg/Ton (substrate)} \quad (1)$$

$$\text{PENT} = b \times Y_p \times \text{PEN} \quad \text{Kg/Ton} \quad (2)$$

$$\text{HEXTEL} = \text{HEXT} \times Y_{eh} \quad \text{Kg/Ton} \quad (3)$$

$$\text{PENTEL} = \text{PENT} \times Y_{ep} \quad \text{Kg/Ton} \quad (4)$$

$$\text{ETOHTLT} = (\text{HEXTEL} + \text{PENTEL})/d \quad \text{L/Ton} \quad (5)$$

เมื่อ HEX คือ ผลผลิตน้ำตาลเฮกโซสหรือน้ำตาลกลูโคส ซึ่งได้จากกระบวนการย่อยสลายเฮกโซแซนตามทฤษฎี (1.111) PEN คือ ผลผลิตน้ำตาลเพนโทสหรือน้ำตาลไซโลส ซึ่งได้จากกระบวนการย่อยสลายเพนโทแซนตามทฤษฎี (1.136) b คือ น้ำหนักของวัตถุดิบ (1,000 กิโลกรัม) Y_h คือ เปอร์เซนต์เซลลูโลสในตัวอย่างวัชพืช Y_p คือ เปอร์เซนต์เฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างวัชพืช Y_{eh} คือ ผลผลิตเอทานอลที่ได้จากน้ำตาลกลูโคสตามทฤษฎี (0.511) Y_{ep} คือ ผลผลิตเอทานอลที่ได้จากน้ำตาลไซโลสตามทฤษฎี (0.511) HEXTEL คือ ผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำตาลเฮกโซส PENTEL คือ ผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำตาลเพนโทส d คือ ความหนาแน่นของเอทานอล (0.789 กิโลกรัม/ลิตร)

2. การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (X) จำนวนตั้งแต่ 2 ตัว ขึ้นไป และสร้างสมการพยากรณ์ตัวแปรตาม (Y) จำนวน 1 ตัว รูปแบบของการสร้างสมการการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Vanichbuncha, 2018) แสดงดังนี้

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (6)$$

การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณจำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม โดยมีสูตรในการคำนวณ (Pearson, 1920) ดังนี้

$$r_{xy} = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (7)$$

Table 1 Interpretation of the correlation coefficient value

Coefficient of Determination	Meaning
0.00-0.50	Association is very small
0.51-0.70	Association is small
0.71-0.84	Association is high
0.85-1.00	Association is very high

สำหรับการแปลความหมายของระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of Determination, R^2) แสดงดังตารางที่ 1 (Intarapanich and Mungkalasiri, 2017)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณในงานวิจัยนี้ ต้องการ 1) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้มากที่สุดของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม 2) สร้างสมการถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม (Y) ที่เหมาะสม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยในส่วนของ การสำรวจและการจัดจำแนกวัชพืชและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีได้ดำเนินการวิจัยตาม Rodbumrung (2019) โดยมีวิธีการโดยย่อ ดังนี้

2.1 การสำรวจและการจัดจำแนกวัชพืช

เก็บตัวอย่างวัชพืชจากพื้นที่บริเวณอำเภอเมืองตากมีพื้นที่ 1,599.36 ตารางกิโลเมตร (ภาพที่ 1) ผู้วิจัยสำรวจและเก็บตัวอย่างวัชพืชบริเวณอำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก ทั้งหมด 10 ตำบล 30 หมู่บ้าน จำนวนทั้งหมด 90 หน่วยตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบวางแปลง (Quadrat Sampling Method) ด้วยการสุ่มวางแปลงตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดแปลง 1x1 ตารางเมตร (Rodbumrung, 2019) และทำการจัดจำแนกชนิดของวัชพืชตามฐานานวิทยา จากหนังสือและคู่มือที่เกี่ยวข้องกับการจัดจำแนกวัชพืช (Noda *et al.*, 1994) และสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญด้านวัชพืชที่หน่วยวิจัยการฟื้นฟูป่าภาควิชาชีพวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (Rodbumrung, 2019)



Figure 1 Sampling location in Muang District, Tak Province

2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

2.2.1 การวิเคราะห์และคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัชพืช

นำตัวอย่างวัชพืชที่ผ่านการบดและร่อนขนาด 0.25 มิลลิเมตร มาทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้าลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา หาปริมาณความชื้นโดยนำตัวอย่างวัชพืชอย่างละ 1 กรัม อบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือน้ำหนักแห้งของตัวอย่างคงที่ การหาปริมาณเถ้าทำโดยนำตัวอย่างวัชพืชอย่างละ 2 กรัม ไปเผาบนเตาไฟฟ้าจนหมดควันและนำไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักที่ได้ ทำการวิเคราะห์และคำนวณหาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินด้วยวิธีการดีเทอร์เจนต์ (Detergent Method หรือ Forage Fiber Analysis) (Goering and Van Soest, 1970) สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หาปริมาณเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกลาง (Neutral Detergent Fiber, NDF) เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (Acid Detergent Fiber, ADF) และลิกนิน (Acid Detergent Lignin, ADL) เทียบกับน้ำหนักแห้งของตัวอย่างวัชพืชคำนวณได้จาก 3 สมการ ได้แก่

1) การคำนวณปริมาณเอมิเซลลูโลส :

$$\% \text{ เอมิเซลลูโลส} = \% \text{ NDF} - \% \text{ ADF} \quad (8)$$

2) การคำนวณปริมาณเซลลูโลส :

$$\% \text{ เซลลูโลส} = \% \text{ ADF} - \% \text{ ADL} \quad (9)$$

3) การคำนวณปริมาณลิกนิน :

$$\% \text{ ลิกนิน} = \% \text{ ADL} \quad (10)$$

2.2.2 การศึกษาแนวทางการหาปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

เป็นการคำนวณหาปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีจากวัชพืชจากสมการของ Premjet *et al.* (2013) โดยกำหนดให้น้ำตาลเฮกโซส (HEXT) และน้ำตาลเพนโทส (PENT) คือ องค์ประกอบหลักที่ได้จากการย่อยสลายเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริกจนได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวคิดเป็น 100% ตามทฤษฎี สำหรับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำตาลเฮกโซส (HEXTEL) และกระบวนการหมักน้ำตาลเพนโทส (PENTEL) คือ กระบวนการเปลี่ยนน้ำตาลเฮกโซสและน้ำตาลเพนโทสไปเป็นผลผลิตเอทานอลคิดเป็น 100% ตามทฤษฎี ดังนั้นการหาปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีสามารถคำนวณได้ ดังนี้

1) ทำการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลเฮกโซส (HEXT) และปริมาณน้ำตาลเพนโทส (PENT) จากปริมาณเซลลูโลสและปริมาณเอมิเซลลูโลสของวัชพืชแต่ละชนิด (Rodbumrung, 2019)

2) ทำการคำนวณหาปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีจากปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำตาลเฮกโซส (HEXTEL) และปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำตาลเพนโทส (PENTEL) ของวัชพืชแต่ละชนิด (Rodbumrung, 2019)

2.3 การสร้างสมการพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

2.3.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ศึกษาปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีเป็นการหาตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณลิกนิน ปริมาณเอมิเซลลูโลส และปริมาณเซลลูโลส และค่าที่ได้จากการคำนวณปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี โดยกำหนดให้

1) ตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (X) คือ ตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี ได้แก่ X_1 คือ ปริมาณความชื้น X_2 คือ ปริมาณเถ้า X_3 คือ ปริมาณลิกนิน X_4 คือ ปริมาณเอมิเซลลูโลส และ X_5 คือ ปริมาณเซลลูโลส

2) ตัวแปรตาม (Y) คือ ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี หมายถึง ข้อมูลที่ถูกวิเคราะห์ตามสมการ ด้วยหลักการทดสอบความสัมพันธ์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ SPSS version 21 serial 4e5042aefdea71686ee

2.3.2 การสร้างสมการพยากรณ์และการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสม

การสร้างสมการพยากรณ์โดยการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ทำการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกตัวแปรที่คาดว่าจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ SPSS มาช่วยในการสร้างสมการพยากรณ์และคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสม สามารถสร้างสมการพยากรณ์ได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (11)$$

เมื่อ ค่า Y คือ ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

ค่า $X_1, X_2, \dots, X_k$ คือ ตัวแปรอิสระที่ 1, 2, ..., k

ค่า a คือ ค่าคงที่

ค่า b คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรแต่ละตัว

การเลือกตัวแปรต้นเพื่อนำมาใช้ในแบบจำลองใช้วิธีการเลือกตัวแปรแบบลำดับขั้น (Stepwise Selection) ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ เพื่อใช้ในการสร้างสมการสำหรับคาดการณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีที่ได้ต่อไปในอนาคต

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การสำรวจและการจัดจำแนกวัชพืชบริเวณอำเภอเมืองจังหวัดตาก

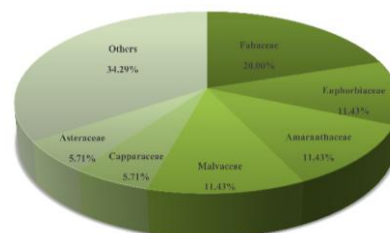


Figure 2 Proportion of weed species in each family presented as percentage to the total species collected in Muang District, Tak Province

จากภาพที่ 2 แสดงการจำแนกวัชพืชตามวงศ์ จากการสุ่มสำรวจวัชพืชบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดตาก พบวัชพืช 18 วงศ์ จัดอยู่ใน 33 สกุล จำนวน 35 ชนิด วัชพืชส่วนใหญ่ที่พบจัดอยู่ในวงศ์ Fabaceae คิดเป็น ร้อยละ 20.00 จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ *Senna occidentalis* (L.) Link, *Stylosanthes hamata* (L.) Taub., *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Mimosa pigra* L., *Sesbania javanica* Mig., *Crotalaria impressa* Nees ex Walp. และ *Tephrosia purpurea* (L.) Pers. รองลงมาคือ วงศ์ Amaranthaceae วงศ์ Euphorbiaceae และ วงศ์ Malvaceae คิดเป็นร้อยละ 11.43 โดยวงศ์ Amaranthaceae จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ *Celosia argentea* L., *Achyranthes aspera* L., *Amaranthus blitum* subsp. *blitum* และ *A. spinosus* L. วงศ์ Euphorbiaceae จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ *Acalypha poiretii* Spreng., *Croton hirtus* L'Hér., *Jatropha gossypifolia* L. และ *Ricinus communis* L. และวงศ์ Malvaceae 4 ชนิด ได้แก่ *Abutilon indicum* (L.) Sweet, *Sida acuta* Burm. f., *Urena lobata* L. และ *Waltheria indica* L. นอกจากนี้ยังพบวงศ์ Capparaceae และวงศ์ Asteraceae คิดเป็นร้อยละ 5.71 โดยวงศ์ Capparaceae จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ *Cleome gynandra* L. และ *C. viscosa* L. และวงศ์ Asteraceae จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ *Chromolaena odorata* (L.) R.M.King & H. Rob. และ *Praxelis clematidea* (Hieron. ex Kuntze) R.M.King & H. Rob. และยังพบวัชพืชอีก 12 วงศ์ ๆ ละ 1 ชนิด คิดเป็นร้อยละรวม 34.29 ดังนี้ วงศ์ Acanthaceae (*Ruellia tuberosa* L.) วงศ์ Araceae (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) วงศ์ Asclepiadaceae (*Calotropis procera* (Aiton) W.T.Aiton) วงศ์ Cyperaceae (*Cyperus pilosus* Vahl) วงศ์ Lamiaceae (*Mesosphaerum suaveolens* (L.) Kuntze) วงศ์ Moraceae (*Broussonetia papyrifera* (L.) L'Hér. ex Vent.) วงศ์ Nyctaginaceae (*Boerhavia coccinea* Mill.) วงศ์ Poaceae (*Phragmites karka* (Retz.) Trin. ex Steud.) วงศ์ Plantaginaceae (*Scoparia dulcis* L.) วงศ์ Solanaceae (*Physalis angulata* L.) วงศ์ Typhaceae (*Typha angustifolia* L.) และวงศ์ Verbenaceae (*Lantana camara* L.) โดยวัชพืชที่พบส่วนใหญ่จากการสุ่มสำรวจพบ การกระจายพันธุ์บริเวณภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Premjet *et al.* (2013) ได้ ทำการสำรวจวัชพืชสำหรับพลังงานชีวมวลและการผลิตเอทานอลบริเวณภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย พบ วัชพืช 25 วงศ์ จัดอยู่ใน 62 สกุล จำนวน 74 ชนิด วงศ์พืชที่พบวัชพืชมากที่สุด ได้แก่ Poaceae และ Asteraceae

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัชพืช และปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

จากการสำรวจตัวอย่างวัชพืชบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดตาก โดยการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น พบว่าวัชพืช มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 4.51-24.18% วัชพืชที่มี ปริมาณความชื้นสูงสุด คือ *P. angulata* L. ($24.18 \pm 0.32\%$) รองลงมา คือ *C. esculenta* (L.) Schott ($16.88 \pm 0.71\%$) และ *R. tuberosa* L. ($14.87 \pm 0.72\%$) วัชพืชที่มีความชื้นต่ำสุด คือ *T. angustifolia* L. ($4.51 \pm 0.57\%$) และพบวัชพืช 4 ชนิด ที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 10% คือ *T. angustifolia* L., *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud., *S. javanica* Mig. และ *C. pilosus* Vahl ($4.51-5.99\%$) โดยเชื้อเพลิงชีวภาพจาก ไม่ต้องมีความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10% ซึ่งปริมาณ ความชื้นของชีวมวลส่งผลเสียต่อคุณภาพของเชื้อเพลิง ชีวภาพอัดแท่งหากเกิน 8-10% (Shojaeiarani *et al.*, 2019)

จากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า พบว่าวัชพืชมี ปริมาณเถ้าอยู่ระหว่าง 4.33-22.22% วัชพืชที่มีปริมาณเถ้า สูงสุด คือ *P. angulata* L. ($22.22 \pm 0.57\%$) รองลงมา คือ *R. tuberosa* L. ($19.79 \pm 0.65\%$) และ *A. spinosus* L. ($17.15 \pm 0.74\%$) และ *B. papyrifera* (L.) L'Hér. ex Vent. ($17.15 \pm 0.32\%$) วัชพืชที่มีเถ้าต่ำสุด คือ *C. impressa* Nees ex Walp. ($4.33 \pm 0.29\%$) และพบวัชพืช 5 ชนิด ที่มีปริมาณ เถ้าต่ำกว่าหรือเท่ากับ 7% คือ *C. impressa* Nees ex Walp., *W. indica* L., *S. hamata*, (L.) Taub. *T. purpurea* (L.) Pers. และ *M. pigra* L. ($4.33-7.38\%$) Jasinskas *et al.* (2022) พบว่าวัชพืช *Sida* sp. มีปริมาณเถ้า 6.07% เป็น วัชพืชที่เหมาะสมสำหรับทำเชื้อเพลิงชีวภาพอัดแท่ง โดย ข้อกำหนดของมาตรฐานสำหรับเชื้อเพลิงชีวภาพจากไม้ ต้องมีเถ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.5% และสำหรับไม้ล้มลุก ต้องไม่เกิน 7%

จากการวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน พบว่าวัชพืชมี ปริมาณลิกนินอยู่ระหว่าง 4.52-16.94% วัชพืชที่มีปริมาณ ลิกนินสูงสุด คือ *L. leucocephala* (Lam.) de Wit ($16.94 \pm 0.44\%$) รองลงมา คือ *S. dulcis* L. ($12.89 \pm 0.28\%$) และ *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud. ($12.75 \pm 0.47\%$) วัชพืชที่มีลิกนินต่ำสุด คือ *R. tuberosa* L. ($4.52 \pm 0.59\%$) วัดฤทธิประเภทลิกโนเซลลูโลสมีลิกนินทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้น โยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ซึ่งลิกนินทนทาน ต่อการย่อยสลายมากจึงเป็นอุปสรรคต่อการผลิตเอทานอล (Polprasert, 2014) โดย Kongkeitkajorn *et al.* (2020) ทำ การผลิตเอทานอลจาก *Pennisetum purpureum* Schumach. ได้ปริมาณเอทานอล 44.7 กรัมต่อลิตร โดย *P. purpureum* Schumach. มีปริมาณลิกนินก่อนการปรับสภาพ 19.4% ซึ่ง

จากการวิเคราะห์ปริมาณลิกนินของวัชพืชทั้งหมด พบว่ามีปริมาณลิกนินต่ำกว่า *P. purpureum* Schumach.

จากการวิเคราะห์ปริมาณเฮมิเซลลูโลส พบว่าวัชพืชที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสอยู่ระหว่าง 4.83-27.05% วัชพืชที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงสุด คือ *C. pilosus* Vahl ($27.05 \pm 0.25\%$) รองลงมา คือ *C. impressa* Nees ex Walp. ($22.33 \pm 0.33\%$) และ *A. aspera* L. ($22.11 \pm 0.42\%$) วัชพืชที่มีเฮมิเซลลูโลสต่ำสุด คือ *A. poiretii* Spreng. ($4.83 \pm 0.17\%$) เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่ครอบคลุมนเซลลูโลส เปรียบเสมือนเกาะป้องกันทางกายภาพ ทำให้กีดขวางการเข้าทำงานของเอนไซม์ในการย่อยสลายเซลลูโลส (Sun *et al.*, 2021) Raud and Kikas (2020) ทำการผลิตเอทานอลจากวัชพืชผสม *Trifolium pratense* L. และ *Phleum pratense* L. โดยวัชพืชผสมมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสก่อนการปรับสภาพ 18.4% และหลังการปรับสภาพ พบว่าสามารถผลิตเอทานอลได้ 3.3-4.0 กรัมเอทานอลจาก 100 กรัมชีวมวล ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณเฮมิเซลลูโลสจากวัชพืชทั้งหมดพบวัชพืช 4 ชนิด ได้แก่ *C. pilosus* Vahl, *C. impressa* Nees ex Walp., *A. aspera* L. และ *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud. ที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงกว่าวัชพืช *P. purpureum* Schumach.

จากการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส พบว่าวัชพืชที่มีปริมาณเซลลูโลสอยู่ระหว่าง 13.41-44.69% วัชพืชที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงสุด คือ *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud. ($44.69 \pm 0.32\%$) รองลงมา คือ *T. angustifolia* L. ($42.06 \pm 0.15\%$) และ *W. indica* L. ($41.49 \pm 0.13\%$) วัชพืชที่มีเซลลูโลสต่ำสุด คือ *A. poiretii* Spreng. ($13.41 \pm 0.29\%$) เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส สามารถถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลกลูโคส เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นเอทานอล (Premjet, 2019) Campos *et al.* (2019) ทำการผลิตเอทานอลจากวัชพืช *P. purpureum* Schumach. ได้ปริมาณเอทานอล 45.5 กรัมต่อลิตร โดยวัชพืช *P. purpureum* Schumach. มีปริมาณเซลลูโลสก่อนการปรับสภาพและหลังการปรับสภาพ 38% และ 76.30% ตามลำดับ ซึ่งเป็นวัชพืชที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอลเพราะมีปริมาณของเซลลูโลสสูงจึงนำไปสู่การปลดปล่อยกลูโคสได้สูง ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสจากวัชพืชทั้งหมดพบวัชพืช 5 ชนิด ได้แก่ *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud., *T. angustifolia* L., *W. indica* L., *S. acuta* Burm.f. และ *L. Leucocephala* (Lam.) de Wit ที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงกว่าวัชพืช *P. purpureum* Schumach.



Figure 3 Average theoretical ethanol yield (L/Ton) of the top 10 from classification of weed species in Muang District, Tak Province

จากภาพที่ 3 แสดงสัดส่วนปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี (ลิตรต่อตัน) มากที่สุด 10 อันดับแรกจากการจัดจำแนกชนิดวัชพืช บริเวณอำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก จากการคำนวณปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีของวัชพืช พบว่ามีปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีอยู่ระหว่าง 131.99-480.41 ลิตรต่อตัน โดยวัชพืชที่มีปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีเรียงลำดับจากมากที่สุด 10 อันดับแรก ได้แก่ *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud. (480.41 ± 0.05 ลิตรต่อตัน) *T. angustifolia* L. (432.46 ± 5.44 ลิตรต่อตัน) *C. impressa* Nees ex Walp. (422.61 ± 1.37 ลิตรต่อตัน) *A. aspera* L. (401.85 ± 0.68 ลิตรต่อตัน) *C. pilosus* Vahl (399.84 ± 3.40 ลิตรต่อตัน) *S. acuta* Burm.f. (394.85 ± 0.18) *W. indica* L. (352.21 ± 2.15 ลิตรต่อตัน) *L. camara* L. (346.50 ± 2.52 ลิตรต่อตัน) *L. leucocephala* (Lam.) de Wit (333.09 ± 0.46 ลิตรต่อตัน) และ *S. hamata* (L.) Taub. (305.89 ± 2.70 ลิตรต่อตัน) สำหรับวัชพืชที่มีปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีต่ำสุด คือ *A. poiretii* Spreng. (131.99 ± 0.84 ลิตรต่อตัน) Kikas *et al.* (2016) พบว่าปริมาณผลผลิตเอทานอลขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลสหากปริมาณของเซลลูโลสสูงส่งผลให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลสูง เนื่องจากปริมาณผลผลิตเอทานอลต่อกิโลกรัมของชีวมวลชีวมวลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเซลลูโลส ซึ่งปริมาณผลผลิตเอทานอลจาก *C. sativa* L., *M. sacchariflorus* (Maxim.) Benth. & Hook.f. ex Franch., *H. annuus* L. และ *H. tuberosus* L. เท่ากับ 83.40 76.67 38.13 และ 37.76 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีปริมาณเซลลูโลสก่อนการปรับสภาพเท่ากับ 53.86% 42.00% 34.06% และ 25.99% ตามลำดับ Amirta *et al.* (2016) พบว่า *Macaranga gigantea* (Rchb.f. & Zoll.) Müll.Arg. สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้ โดยให้ปริมาณน้ำตาล 44.22% และให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี 273 ลิตรต่อตัน ซึ่งจากการคำนวณ

ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีพบวัชพืช 14 ชนิด ได้แก่ *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud., *T. angustifolia* L., *C. impressa* Nees ex Walp., *A. aspera* L., *C. pilosus* Vahl, *S. acuta* Burm.f., *W. indica* L., *L. camara* L., *L. Leucocephala* (Lam.) de Wit, *S. hamata* (L.) Taub., *S. dulcis* L., *U. lobata* L., *T. purpurea* (L.) Pers. และ *C. odorata* (L.) R.M.King & H.Rob. มีปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีสูงกว่าวัชพืช *M. gigantea* (Rchb.f. & Zoll.) Mull.Arg.

3.3 การสร้างสมการพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

3.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ศึกษาปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีกับตัวแปร

องค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ X1 คือ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) X2 คือ ปริมาณเถ้า (Ash Content) X3 คือ ปริมาณลิกนิน (Lignin Content) X4 คือ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose Content) และ X5 คือ ปริมาณเซลลูโลส (Cellulose Content) แสดงด้วยแผนภาพการกระจายของข้อมูลในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูลวัชพืชบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดตาก พบวัชพืช 18 วงศ์ จัดอยู่ใน 33 สกุล จำนวน 35 ชนิด พบว่าระหว่างปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีกับตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.01$) แสดงดังภาพที่ 4

ต่อจากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัชพืช ทั้ง 5 ตัวแปร กับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี แสดงดังตารางที่ 2

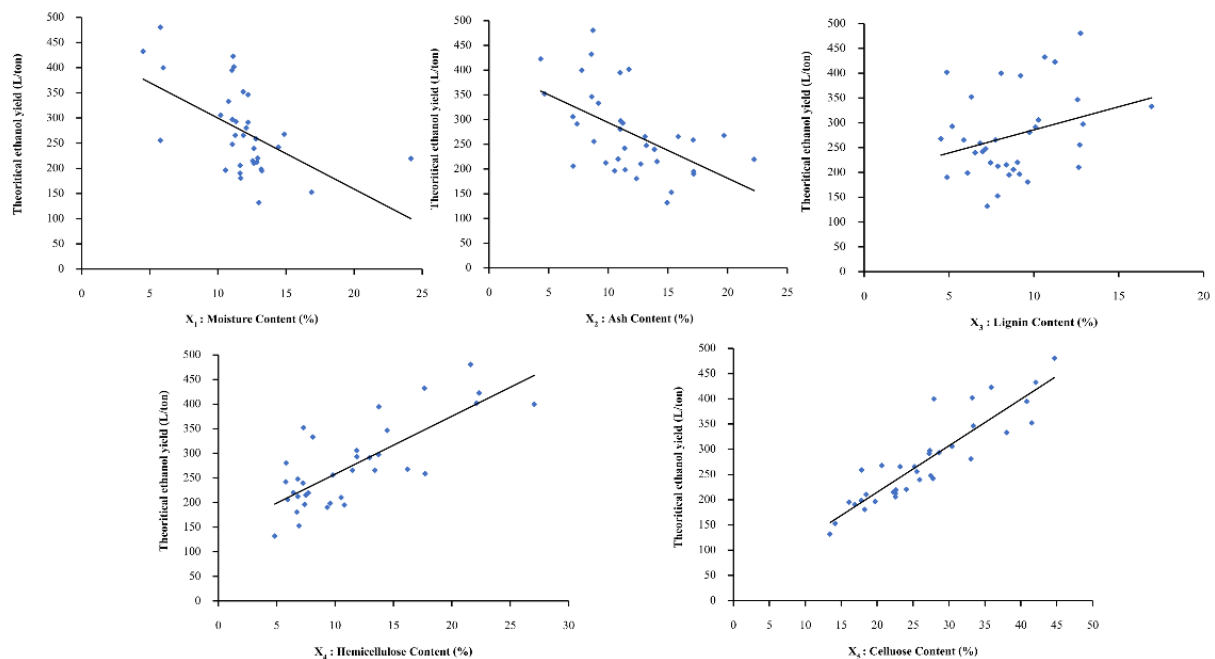


Figure 4 Scatter plot of the relationship between the moisture content, ash content, lignin content, hemicellulose content, cellulose content and theoretical ethanol yield

Table 2 Correlation coefficient between the chemical compositions of weeds and theoretical ethanol yields

Theoretical ethanol yield (L/Ton)			Theoretical ethanol yield (L/Ton)		
X ₁ : Moisture Content (%)	Pearson Correlation	-0.548**	X ₄ : Hemicellulose Content (%)	Pearson Correlation	0.768**
	Sig. (2-tailed)	0.001		Sig. (2-tailed)	0
X ₂ : Ash Content (%)	Pearson Correlation	-0.531**	X ₅ : Cellulose Content (%)	Pearson Correlation	0.899**
	Sig. (2-tailed)	0.001		Sig. (2-tailed)	0
X ₃ : Lignin Content (%)	Pearson Correlation	0.304			
	Sig. (2-tailed)	0.075			

**Correlation is significant at the 0.01($P \geq 0.01$)

Table 3 Correlation coefficient among the chemical compositions of weeds and theoretical ethanol yields for the study

	X ₁ : Moisture Content (%)	X ₂ : Ash Content (%)	X ₃ : Lignin Content (%)	X ₄ : Hemi- cellulose Content (%)	X ₅ : Cellulose Content (%)	Y: Theoretical ethanol yield (L/Ton)
X ₁ : Moisture Content (%)	1.000	.620**	-.352*	-.454**	-.470**	-.548**
X ₂ : Ash Content (%)		1.000	-.453**	-.210 ^{ns}	-.613**	-.531**
X ₃ : Lignin Content (%)			1.000	.076 ^{ns}	.382*	.304 ^{ns}
X ₄ : Hemicellulose Content (%)				1.000	.409*	.768**
X ₅ : Cellulose Content (%)					1.000	.899**
Y: Theoretical ethanol yield (L/Ton)						1.000

**Correlation is significant at the 0.01 ($P \geq 0.01$); *.Correlation is significant at the 0.05 ($P \geq 0.05$); ns is non-significant ($P > 0.05$)

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่า P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 พบว่า ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณเอมิเซลลูโลส และปริมาณเซลลูโลส มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยทางสถิติกับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี ($p < 0.01$) เว้นแต่ ปริมาณลิกนินที่ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาค่า P-Value ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 พบว่าตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัชพืชทุกตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เว้นแต่ X₂: ปริมาณเถ้ากับ X₄: ปริมาณเอมิเซลลูโลส X₃: ปริมาณลิกนินกับ X₄: ปริมาณเอมิเซลลูโลส และ X₃: ปริมาณลิกนินกับ Y: ปริมาณผลผลิต

เอทานอลตามทฤษฎี ที่ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (สำหรับค่า X₁ : ปริมาณความชื้นไม่นำมาวิเคราะห์เนื่องจากไม่มีผลต่อองค์ประกอบหลักทางเคมีในวัชพืชที่จะนำไปผลิตเป็นเอทานอล) จากผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยวิธี Stepwise พบว่ามีตัวแปรที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ ได้แก่ X₄: ปริมาณเอมิเซลลูโลส และ X₅: ปริมาณเซลลูโลส และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสและตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัชพืชอื่น ๆ พบว่าทุกตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง Y: ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีและตัวแปรหลัก

องค์ประกอบทางเคมีของพืชพืชอื่น ๆ ส่งผลให้อาจเกิดปัญหาสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรขึ้นไป (Multicollinearity Problem) ภายใต้ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการนำตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีของพืชพืชดังกล่าว มาใช้ร่วมกันในสมการพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี จากเหตุผลดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ X_5 : ปริมาณเซลลูโลสเป็นตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวที่ใช้ในสมการพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีมากที่สุด (0.899)

3.3.2 การสร้างสมการพยากรณ์การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง X_5 : ปริมาณเซลลูโลสและ Y : ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

การวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรโดยใช้วิธีขั้นตอนด้วยการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SPSS

1) ผลการทดสอบสมมุติฐาน (Assumption) เบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี ต้องทำการทดสอบความเหมาะสมของสมการพยากรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความเหมาะสมของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม ด้วยการหา (1) การตรวจสอบความผิดปกติทางสถิติของข้อมูล (Outlier) (2) ตัวแปรตามและค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Test of Normality) (3) ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า (Homoscedasticity) (4) ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละค่าเป็นอิสระกัน (Autocorrelation) และ (5) ตัวแปรอิสระแต่ละตัวต้องไม่มีความสัมพันธ์กัน (Multicollinearity) ได้ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4 ดังนี้

Table 4 Results of testing the suitability of the forecast equations

Meaning of the forecast equation	Results of data analysis
Outlier	it was found that data analysis of Cook's Distance value used was between 0-0.206 which was less than 1. It can be concluded that it was no abnormalities in the data used in the analysis.
Test of Normality	From the Boxplot and Scatter Plot, it was found that the error and dependent variables was normally distributed variables.
Homoscedasticity	It was found that the error was distributed in a constant manner from the Histogram diagram.
Autocorrelation	The Durbin-Watson value was 1.362 which was less than 1.5 indicating that autocorrelation has occurred. The independent variable used in the test had own internal relationship.
Multicollinearity	The equation had only one independent variable therefore it was no problem of multicollinearity.

Table 5 Result of multiple regression analysis

Model	R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate
1	0.899 ^a	0.807	0.802	38.0122

Table 6 The independent variable that is related to theoretical ethanol yield

	Unstandardized		Standardized	t	Sig.
	Coefficients		Coefficients		
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	30.599	21.699		1.410	0.168
Cellulose	9.211	0.783	0.899	11.764	0.000

การคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการพยากรณ์ ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีของวัชพืช มีรายละเอียดที่แสดงค่าต่าง ๆ คือ R² B Std. error beta t และ Sig. แสดงดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ซึ่งค่าต่าง ๆ มีความหมายดังนี้ ค่า R² หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ซึ่งจะแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (X) ที่มีต่อตัวแปรตาม (Y) B หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ พร้อมทั้งค่าคงที่ในการนำมาใช้สร้างสมการพยากรณ์ Std. error หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ beta หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ ในภาพคะแนนมาตรฐาน สำหรับสร้างสมการพยากรณ์ในภาพของคะแนนมาตรฐาน t และ Sig. หมายถึง ค่าสถิติที่และค่าความน่าจะเป็นของการทดสอบที่ (t-test) สำหรับทดสอบตัวแปรอิสระว่าตัวใดสามารถนำไปใช้ในสมการพยากรณ์ได้ (Intarapanich and Mungkalsiri, 2017) ในงานวิจัยนี้กำหนดระดับนัยสำคัญไว้ที่ 0.05 ซึ่งหมายความว่ายอมให้เกิดความคลาดเคลื่อน 5% หรือมีระดับความเชื่อมั่น 95%

2) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี

ในตารางที่ 6 พบว่าสมการพยากรณ์ที่ได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี โดยระหว่างตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ จากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยปริมาณเซลลูโลสอยู่ที่ระดับ 9.211 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด หรือค่า R² จากสมการพยากรณ์พบว่ามีความเท่ากับ 0.807 อธิบายได้ว่าความสามารถของตัวแปรปริมาณเซลลูโลส ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระนั้น สามารถอธิบายปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีซึ่งเป็นตัวแปรตามได้ร้อยละ 80.7 โดยสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ ดังนี้

$$Y = 30.599 + 9.211 (X) \quad (12)$$

เมื่อ X = ปริมาณเซลลูโลส

4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสำรวจวัชพืช องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาศึกษาหาความสัมพันธ์ โดยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสร้างสมการพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ ผลการวิจัยพบวัชพืชบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดตาก 18 วงศ์ ใน 33 สกุล จำนวน 35 ชนิด วัชพืชที่พบจัดอยู่ในวงศ์ Fabaceae มากที่สุด วัชพืชที่ให้ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าสูงสุดคือ *P. angulata* L. วัชพืชที่ให้ปริมาณเซลลูโลสและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีสูงสุดคือ *P. karka* (Retz.) Trin. ex Steud. วัชพืชที่ให้ปริมาณเอมิเซลลูโลสและปริมาณลิกนินสูงสุดคือ *C. pilosus* Vahl และ *L. leucocephala* (Lam.) de Wit ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัชพืชทั้ง 5 องค์ประกอบกับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี พบว่าปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณเอมิเซลลูโลส และปริมาณเซลลูโลส มีความความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ปริมาณลิกนินไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี เมื่อพิจารณาการทดสอบสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ พบว่าตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัชพืชทุกตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เว้นแต่ ปริมาณเถ้ากับปริมาณเอมิเซลลูโลส ปริมาณลิกนินกับปริมาณเอมิเซลลูโลส และปริมาณลิกนินกับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี ที่ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสและตัวแปรองค์ประกอบหลักทางเคมีของ

วิชาชีพอื่น ๆ พบว่าทุกตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปริมาณเซลลูโลสเป็นตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวที่ใช้ในสมการพยากรณ์ปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีมากที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรขึ้นไป เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์สมการพยากรณ์ที่ได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสและปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎี พบว่าความสามารถของตัวแปรปริมาณเซลลูโลส สามารถอธิบายปริมาณผลผลิตเอทานอลตามทฤษฎีซึ่งเป็นตัวแปรตามได้ร้อยละ 80.7 โดยสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ ดังนี้ $Y = 30.599 + 9.211 (X)$; เมื่อ X = ปริมาณเซลลูโลส

5. เอกสารอ้างอิง

- Abe, M.M., Martins, J.R., Sanvezzo, P.B., Macedo, J.V., Branciforti, M.C., Halley, P., Botaro, V.R. and Brienzo, M. 2021. Advantages and disadvantages of bioplastics production from starch and lignocellulosic components. **Polymers** 13: 2484.
- Ahorsu, R., Medina, F. and Constanti, M. 2018. Significance and challenges of biomass as a suitable feedstock for bioenergy and biochemical production: A review. **Energies** 11(12): 3366.
- Amirta, R., Mukhdlor, A., Mujiashi, D., Septia, E., Supriadi, S. and Susanto, D. 2016. Suitability and availability analysis of tropical forest wood species for ethanol production: a case study in East Kalimantan. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity** 17(2): 544-552.
- Barros-Rios, J., Romani, A., Garrote, G. and Orda, B. 2015. Biomass, sugar, and bioethanol potential of sweet corn. **GCB Bioenergy** 7: 153-160.
- Broda, M., Yelle, D.J. and Serwanska, K. 2022. Review: Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass-Challenges and Solutions. **Molecules** 27(24): 8717.
- Campos, B.B., Diniz, R.H.S., Silveira, F.A.da., Ribeiro, J.I., Fietto, L.G., Machado, J.C. and Silveira, W.B.da. 2019. Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumacher) is a promising feedstock for ethanol production by the thermotolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* CCT 7735. **Brazilian Journal of Chemical Engineering** 36(1): 43-49.
- Fatma, S., Hameed, A., Noman, M., Ahmed, T., Shahid, M., Tariq, M., Sohail, I. and Tabassum, R. 2018. Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Bioenergy Source for the Future. **Protein & Peptide Letters** 25(2): 1-16.
- Goering, H.K. and Van Soest, P.J. 1970. **USDA-ARS Agriculture Handbook 379 Forage Fiber Analyses: apparatus, reagent, procedures and some application**. United State Department of Agriculture Research Service, Washington, D.C.
- Howard, R. L., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, E. L. and Howard, S. 2003. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. **African Journal of Biotechnology** 2(12) : 602-619.
- Intarapanich, R. and Mungkalasiri, W. 2017. The equation of energy forecasting by statistical process control analysis: Case study of car audio industry. **Thai Science and Technology Journal** 25(5): 893-905. (in Thai)
- Jasinskis, A., Kleiza, V., Streikus, D., Domeika, R., Vaiciukevicius, E., Gramauskas, G. and Valentin, M.T. 2022. Assessment of Quality Indicators of Pressed Biofuel Produced from Coarse Herbaceous Plants and Determination of the Influence of Moisture on the Properties of Pellets. **Sustainability** 14(3): 1068.
- Kikas, T., Tutt, M., Raud, M., Alaru, M., Lauk, R. and Olt, J. 2016. Basis of energy crop selection for biofuel production: Cellulose vs. lignin. **International Journal of Green Energy** 13(1): 49-54.
- Kongkeitkajorn, M. B., Sae-Kuay, C. and Reungsang, A. 2020. Evaluation of Napier Grass for Bioethanol Production through a Fermentation Process. **Processes** 8(5): 567.
- Noda, K., Teerawatsakul, M., Prakongvongs, C. and Chaiwiratnukul, L. 1994. **Project Manual no.1 Major weeds in Thailand: Illustrated by color** (3rded). National Weed Science Research Institute Project. Japan International Cooperation

- Agency and Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Mass Medias, Bangkok.
- Pacheco, R. and Silva, C. 2019. Global warming potential of biomass-to-ethanol: Review and sensitivity analysis through a case study. **Energies** 12: 2535.
- Pearson, K. 1920. Notes on the history of correlation. **Biometrika** 13(1): 25-45.
- Polprasert, S. 2014. Pretreatment of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production. **Thai Science and Technology Journal** 25(5): 641-649. (in Thai)
- Prasertwasu, S., Khumsupan, D., Komolwanich, T., Chaisuwan, T., Luengnaruemitchai, A., Wongkasemjit, S. 2014. Efficient process for ethanol production from Thai Mission grass (*Pennisetum polystachion*). **Bioresource Technology** 163: 152-159.
- Premjet, S. 2019. Potential of Weed Biomass for Bioethanol Production, pp.83-98. In Peixoto Basso T. and Carlos Basso, L., eds. **Fuel Ethanol Production from Sugarcane**. IntechOpen, UK.
- Premjet, S., Pumira, B. and Premjet, D. 2013. Determining the potential of inedible weed biomass for bio-energy and ethanol production. **Bioresources** 8(1): 701-716.
- Raud, M. and Kikas, T. 2020. Perennial grasses as a substrate for bioethanol production. **Environmental and Climate Technologies** 24(2): 32-40.
- Rodbumrung, B. 2019. Diversity of Weed for Ethanol Production in Muang District Area, Tak Province. **Science and Technology RMUTT Journal** 9(2): 107-124. (in Thai)
- Shojaeiarani, J., Bajwa, D.S. and Bajwa S.G. 2019. Properties of densified solid biofuels in relation to chemical composition, moisture content, and bulk density of the biomass. **BioResources** 14(2): 4996-5015.
- Sun, S.F., Yang, J., Wang, D.W., Yang, H.Y., Sun, S.N. and Shi, Z.J. 2021. Enzymatic response of ryegrass cellulose and hemicellulose valorization introduced by sequential alkaline extractions. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts** 14: 72.
- The Secretariat of the Cabinet. 2023. **Guidelines for promoting use ethanol in other industries in addition to biofuels and liquor production: Resolution from executive committee of the Bio- Circular- Green Economy 2/2566**. The Secretariat of the Cabinet. Available Source: https://resolution.soc.go.th/PDF_UPLOAD/2566/P_408955_1.pdf, November 22, 2023. (in Thai)
- Vanichbuncha, K. 2018. **Statistics for research: Principles for selecting statistical techniques in research and description from SPSS (12thed)**. 3 Lada Limited Partnership, Bangkok. (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