



Enzyme Selection for Cobia Fish (*Rachycentron canadum*) Protein Hydrolysate Using a Multiple Criteria Decision-Making Approach

Thunchanok Sirimek^{1*}, Pimpun Pornchaloempong¹

¹Department of Food Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

*Corresponding author: Tel.: +66-9-7319-9578, E-mail: 64601068@kmitl.ac.th

Abstract

This study applied the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS), a Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) method, to determine the most suitable enzyme for producing protein hydrolysates from Cobia fish (*Rachycentron canadum*). Ten commercial enzymes—ProteAX, M “Amano” SD, A “Amano” 2SD, P “Amano” 6SD, Thermoase GL30, SD-NY10, SD-AY10, Papain W-40, Bromelain F, HF “Amano” 150SD—were evaluated at a concentration of 0.2% w w⁻¹ under controlled conditions 50°C for 4 hr. The assessment was based on yield, protein concentration, and key sensory attributes, including fishy odor and bitterness, which are critical for consumer acceptance. Given that the hydrolysates were intended for direct consumption in fish broth, sensory characteristics were prioritized. The results identified SD-NY10 as the optimal enzyme, yielding 58 ± 2.0%, with a protein concentration of 3.42 ± 0.27 mg ml⁻¹, and lower intensity scores for fishy odor 3.2 ± 0.24 and bitterness 3.1 ± 0.12, demonstrating the closest CL value 0.970110 alignment with the ideal solution.

Keywords: Fish protein hydrolysate (FPH), Enzyme hydrolysis, Sensory evaluation, TOPSIS

1 Introduction

Cobia (*Rachycentron canadum*), known as Pla Chon Talay in Thailand, is a commercially important marine fish species widely farmed in aquaculture across tropical and subtropical regions worldwide, its rapid growth rate makes it highly economically valuable and high nutrition value (Holt et al., 2007). Recently, Lauteri et al. (2023) reported that ultrasonic processing (60–90 min) improved the tenderization efficiency and firmness of Cobia (*Rachycentron canadum*), enhancing its suitability for high-end culinary applications such as sashimi or restaurant menus. However, sashimi is a delicate dish that must be prepared using extremely fresh seafood. Therefore, a diverse range of innovative processing strategies should be developed to enhance product value and address the varied demands of the market.

Fish protein hydrolysate (FPH) is produced by breaking down fish proteins into smaller peptides and amino acids with varying molecular weights, depending

on the extent of hydrolysis using enzymes, acids, or bases (Siddik et al., 2021). FPH has gained significant attention due to its nutritional value and bioactive properties (Chalamaiah et al., 2012). The characteristics and quality of FPH are strongly influenced by factors such as the type of proteases or chemicals used, as well as the temperature, pH, and duration of the hydrolysis process (Nazeer and Kulandai, 2012). Although protein hydrolysates, derived from enzymatic hydrolysis of sources like animal by-products and fish, have numerous applications, they often face the challenge of bitterness (Sujith and Hymavathi, 2011; Fu et al., 2019; Dauksas et al., 2004).

Enzymatic hydrolysis of proteins can improve their functional properties but often results in bitterness, limiting their use in food applications (Daher et al., 2020). This bitterness is primarily associated with hydrophobic amino acid residues in peptides (Idowu and Benjakul, 2019). Fishy flavor often makes products derived from fish less acceptable (Ganeko et al., 2008)

Received: January 21, 2025

Revised: March 17, 2025

Accepted: March 18, 2025

Available Online: June 24, 2025

Amino acids, especially essential ones, influence the fishy odor in fish protein hydrolysates. (Kouakou et al., 2014) Amino acids such as glutamic acid and aspartic acid, prevalent in myosin, contribute to umami flavors, which can mask fishy odors (Hu et al., 2022)

Multi-criteria decision-making (MCDM) is a method that evaluates the alternatives for selection or ranking and choosing the best alternative applicable across various fields like energy and business, it addresses complex decision-making problems across various fields. MCDM has methods that include ELECTRE, PROMETHEE, AHP, SAW, and TOPSIS (Taherdoost and Madanchian, 2023). This study focuses on the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method, which should have the shortest interval from the positive ideal solution and the farthest distance from the negative ideal solution (Hedayati et al, 2021)

Therefore, this study evaluated ten commercial enzymes from Amano Enzyme Inc. (Aichi, Japan) to identify the most suitable option for producing Cobia fish protein hydrolysate. These enzymes were selected due to their commercial availability and widespread use in the food and biotechnology industries, ensuring feasibility for large-scale production. The assessment was based on key quality parameters, including yield, protein concentration, and sensory attributes such as fishy odor and bitterness. When selecting the optimal food product, various critical factors must be carefully balanced, as some attributes may involve trade-offs.

2 Materials and methods

2.1 Raw material

The fish used in this study was Cobia (*Rachycentron canadum*), sourced from cage farming in Phuket, Thailand, with an age range of 12–15 months and an average whole fish weight of 6 ± 2 kg. The fillets, weighing 90–100 g per vacuum-sealed bag, were transported in a temperature-controlled vehicle maintained at -18 ± 2 °C to the FACTory Classroom, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. The transportation duration was approximately 15 hr. Upon arrival, the samples were stored at -18 ± 2 °C until further processing to produce

protein hydrolysate. The proximate composition of Cobia was analyzed according to AOAC (1993), revealing crude protein content of 19.51%, total fat 10.48%, ash 1.02%, and moisture 68.99%

2.2 Enzymatic hydrolysis

Fish protein hydrolysates (FPH) were produced following a modified method described by Roslan et al. (2014). Ten commercial enzymes, sourced from Amano Enzyme Inc., Aichi, Japan, were utilized in the production process, as detailed in **Table 1**.

Table 1 Type of enzymes.

No.	Enzymes	Preparation derived	Activity
1	ProteAX	Aspergillus oryzae	1,400 U g ⁻¹
2	M “Amano” SD	Aspergillus oryzae	40,000 U g ⁻¹
3	A “Amano”2SD	Aspergillus oryzae	100,000 U g ⁻¹
4	P “Amano” 6SD	Aspergillus melleus	600,000 U g ⁻¹
5	Thermoase GL30	Geobacillus stearothermophilus	300,000 U mL ⁻¹
6	SD-NY10	Bacillus amyloliquefaciens	70,000 U g ⁻¹
7	SD-AY10	Bacillus licheniformis	80,000 U g ⁻¹
8	Papain W-40	Papaya	400 U mg ⁻¹
9	Bromelain F	Pineapple	800 U mg ⁻¹
10	HF “Amano” 150SD	Aspergillus oryzae	150,000 U g ⁻¹

stored in sealed packaging at a temperature of 4 °C before use. Cobia fish were minced with 1:1 w v⁻¹ water and hydrolyzed at an enzyme concentration of 0.2% w w⁻¹. Then, it was incubated using an incubator shaker (Thermo Scientific, MaxQ 4000, U.S.) at 176 rpm at 50 °C for 4 hr. The enzyme was inactivated using a water bath (WNE Series, Germany) at 90 °C for 25 min, with a magnetic stirrer (2mag magmatic motion MIXcontrol 40, Germany). Centrifuged (UGAIYA, H2050R, Japan) at 10,000 rpm with 5 °C for 10 min to separate the supernatant and subsequently filtered using Whatman filter paper No. 4 (25µm). has been shown in **Figure 1**.

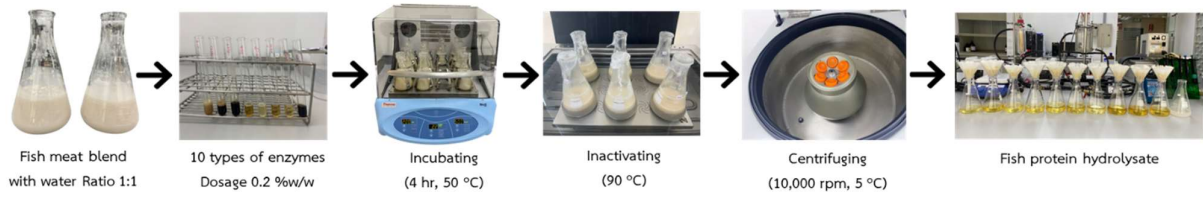


Figure 1 Sample preparation.

2.3 Yield

The yield of protein hydrolysate products was performed according to the method described by Prihanto et al. (2019). Defined as the percentage ratio of the amount of hydrolysate products produced to the number of raw materials used before hydrolysis. The yield is calculated using the following formula

$$\text{Yield (\%)} = A/B \times 100$$

Where A is protein hydrolysate (after centrifugation), and B is the weight of the sample after mixing (before incubation).

2.4 Protein concentration

Determine the protein concentration of supernatant by using Pierce™ BCA Protein Assay Kit (No. 23227), Thermo Fisher Scientific. Calibrator preparation was performed by dilution of 2 mg ml⁻¹ bovine serum albumin standard (BSA). The calibrator preparation and the assay processing were performed according to the manual (Thermo Fisher Scientific, 2024)

2.5 Sensory evaluation

Ten trained panelists, comprising staff from the FACTory Classroom Laboratory at KMITL, participated in the sensory analysis. Samples were randomly presented to each

panelist in blind-coded clear glass containers, with each sample consisting of 10 ml. The evaluation was conducted in two sessions.

In the first session, the panelist was asked to rate the samples on scale with sensory attributes including color, mouthfeel, and overall liking of the fish protein hydrolysates (FPH) were assessed using a 9-point Hedonic Scale, where 1 indicated "dislike extremely," 5 indicated "neither like nor dislike," and 9 indicated "like extremely."

In the second session, panelists performed a descriptive analysis to evaluate two specific attributes:

fishy odor and bitterness intensity. These were rated on a scale of 0 (no intensity) to 9 (highest intensity). Panelists were selected based on their sensitivity to fishy odors and flavors, familiarity with fish consumption, and ability to distinguish differences between FPH solutions.

2.6 TOPSIS evaluation method

Firstly, decision-making is arranged in rows and columns. A few variables of sensory (fishy odor and bitterness) are focused on, as the intention is to produce food products, and other qualities of FPH including yield, sensory evaluation (color, mouth feel, overall), and protein concentration are investigated.

The 5 steps of the method are conducted follow by Hedayati et al. (2021); Hedayati et al. (2022)

Step 1 Develop a decision matrix to prioritize and rank the options.

	C_1	...	C_j	...	C_n
A_1	r_{11}	...	r_{1j}	...	r_{1n}
...	...	...	...	...	...
A_j	r_{j1}	...	r_{jj}	...	r_{jn}
...	...	...	...	...	...
A_m	r_{m1}	...	r_{mj}	...	r_{mn}

Where A_j illustrates the alternatives $j=1,2,...,m$, C_j is the criterion $j=1,2,...,n$ and r_{ij} is the value of each alternative (A_j) and the criterion (C_j)

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum r_{ij}^2}} \quad (1)$$

Step 2 Calculate the normalized decision-making matrix N. The normalized value n_{ij} is calculated as (1)

$$V_{ij} = W_i \times n_{ij} \quad (2)$$

Step 3 Calculate the weighted normalized decision-making matrix where V_{ij} represents the weighted

normalized value. Weights are always set subjectively by experts.

$$A^+ = \{\{\max V_{ij} | j \in B, \{\min V_{ij} | j \in C\}\} \quad (3)$$

$$A^- = \{\{\min V_{ij} | j \in B, \{\max V_{ij} | j \in C\}\}$$

Step 4 Determine the negative and positive ideal solution. B is the factor that aims to maximize the objective of the experiment, associated with benefit criteria, and C is the factor that aims to minimize the objective of the experiment, associated with cost.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (4)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}$$

Where d_i^+ and d_i^- represent the distance of alternative A_i from the positive and negative ideal solutions, respectively.

$$C_L = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (5)$$

Where C_L presents relative closeness, $R_j \in [0, 1]$.

Step 5 Calculate the relative closeness to the ideal solution and compare R_j values to rank the alternatives. This implies that the value can range from 0 to 1, inclusive. After relative closeness was calculated for each alternative. The higher value of this index means that the alternative is in a better situation.

2.7 Statisticcal analysis

The analysis of variance (ANOVA) was conducted using a significant probability level of 95% ($p < 0.05$) and Duncan's new multiple-range test. The software IBM SPSS Statistics 29 (IBM SPSS, USA) was used to analyze the data.

3 Result and discussion

3.1 Yield and protein concentration of FPH

The present study presents the yield and protein concentration of FPH in **Table 2**. The highest yield and protein concentration were obtained from Thermoase GL30 has high activity, its yield $59 \pm 2.5\%$ is lower than Papain W-40 $65 \pm 1.0\%$ and Bromelain F $62 \pm 1.1\%$, likely due to substrate affinity with enzyme used. According to Noman et al. (2020) The protein hydrolysate yield obtained using papain and Alcalase 2.4 L was reported as 16.77% and 13.30%, respectively. This variation may be influenced by factors such as enzyme specificity, enzyme-substrate affinity, and experimental conditions. Differences in how each enzyme interacts with the substrate can affect the efficiency of hydrolysis, leading to variations in yield. Thus, different enzymes have varying specificities and cleavage patterns, which can impact the amount of peptides and amino acids released during hydrolysis (Abd El-Rady et al., 2023). FPH produced using Alcalase has shown protein concentrations ranging from 89.24% to 92.14%, depending on the specific conditions and raw materials (Dinakarkumar et al., 2022). According to Elavarasan et al (2014) using different proteolytic enzymes, with bromelain-derived hydrolysates showing the most desirable properties of the fish protein hydrolysates were highly dependent on the type of enzyme used, with the hydrolysate prepared using bromelain having the highest functional properties. The type of enzyme used significantly impacts the protein concentration of fish protein hydrolysates.

The conditions under which hydrolysis occur, such as temperature, pH, and time also play a critical role in determining the protein concentration in FPHs

Table 2 Quality properties of different types of enzymes.

Enzyme	Yield (%)	Protein conc. (mg ml ⁻¹) *	Color ¹	Mouthfeel ¹	Overall ¹	Fishy odor ²	Bitterness ²
ProteAX	60±2.0 ^{cd}	3.07±0.31 ^f	6.3±0.20 ^a	5.7±0.15 ^e	4.1±0.30 ^d	6.8±0.15 ^a	6.9±0.10 ^c
M “Amano” SD	57±1.0 ^f	2.88±0.20 ^g	6.1±0.15 ^c	5.6±0.24 ^e	4.7±0.24 ^b	3.7±0.20 ^g	5.3±0.25 ^g
A “Amano” 2SD	59±1.5 ^{de}	3.08±0.18 ^f	6.0±0.22 ^{cd}	5.2±0.15 ^g	3.7±0.20 ^f	5.3±0.26 ^e	6.4±0.15 ^e
P “Amano” 6SD	63±3.0 ^b	3.38±0.25 ^d	5.2±0.23 ^f	5.7±0.32 ^e	3.2±0.21 ^g	6.1±0.15 ^d	6.1±0.35 ^f
Thermoase GL30	59±2.5 ^{de}	3.60±0.15 ^b	6.2±0.35 ^b	5.7±0.21 ^e	3.0±0.18 ^h	6.5±0.35 ^c	7.3±0.20 ^b
SD-NY10	58±2.0 ^e	3.42±0.27 ^c	6.1±0.10 ^{bcd}	6.3±0.25 ^a	6.0±0.25 ^a	3.2±0.24 ^h	3.1±0.12 ^h
SD-AY10	57±2.0 ^f	3.09±0.34 ^f	4.4±0.28 ^g	5.8±0.23 ^d	3.8±0.25 ^e	5.3±0.26 ^e	6.7±0.28 ^d
Papain W-40	65±1.0 ^a	3.71±0.30 ^a	5.7±0.36 ^e	6.1±0.22 ^c	3.8±0.10 ^e	6.7±0.14 ^b	7.8±0.32 ^a
Bromelain F	62±1.1 ^{bc}	3.39±0.25 ^{cd}	6.0±0.26 ^d	6.2±0.20 ^b	3.9±0.15 ^e	6.8±0.12 ^a	7.8±0.24 ^a
HF “Amano” 150SD	56±1.2 ^g	3.28±0.20 ^e	6.1±0.21 ^{bcd}	5.4±0.15 ^f	4.4±0.27 ^c	5.1±0.22 ^f	6.9±0.21 ^c

*Protein concentration (mg/ml), ¹Testing by 9-point Hedonic Scale, ²Testing by descriptive analysis

Data are expressed as mean values ± standard deviation; Values followed by different letters in the same column are significantly different (P < 0.05)

3.2 Sensory evaluation

The results are presented in **Table 2**. The sensory attributes are mainly related to the consumer's acceptance. Developing hydrolysates with improved sensory characteristics, such as those enriched with specific amino acids, can further enhance their marketability (Wong et al., 2015). Thus, FPH offers promising benefits, but challenges such as bitterness and rancidity must be addressed to maximize their potential in food products. The results indicated that the SD-NY10 enzyme achieved the highest scores for mouthfeel and overall acceptability, with mean values of 6.3±0.25 and 6.0±0.25, respectively, which were significantly different at (P<0.05). On the other hand, the lowest scores were recorded for fishy odor and bitterness intensity, with mean values of 3.2±0.24 and 3.1±0.12, respectively, which were significantly different at (P<0.05). Additionally, enzyme activity alone does not solely determine sensory properties. For instance, although Thermoase GL30 exhibits high activity, it resulted in pronounced bitterness 7.3±0.2 and a strong fishy odor 6.5±0.35, leading to lower overall acceptability 3.0±0.18. In contrast, SD-NY10 demonstrated a more balanced hydrolysis pattern, yielding a higher overall acceptability score 6.0±0.25.

Therefore, the SD-NY10 enzyme was the preferred option among customers. According to Steinsholm et al. (2020) different enzymes, such as alcalase and bromelain, affect the sensory profile of FPH. For instance, the study on cod and salmon showed that

enzyme choice and hydrolysis time significantly influenced bitterness and other sensory attributes. Gan et al. (2022) investigated the significant impact of enzymatic hydrolysis on the flavor profiles of protein hydrolysates derived from tilapia skin, spine, and head. The study highlighted that those different commercial enzymes, such as Neutrase®, papain, bromelain, and Alcalase®, exhibit varying specificities, influencing the composition of peptides and free amino acids, which ultimately shape key flavor attributes, including umami, bitterness, sourness, and sweetness. Additionally, the degree of hydrolysis (DH) was found to have a proportional relationship with bitterness, emphasizing the importance of processing conditions and raw material composition in determining the sensory properties of protein hydrolysates. Meanwhile, Aspevik et al. (2021) found hydrolysates produced from herring were found to be the most intense flavor, while those made from salmon were considered more palatable. This indicates that the choice of fish species significantly influences sensory characteristics.

3.3 TOPSIS method

Choosing the ideal type of enzyme is challenging because the best properties vary depending on the different criteria being studied. Therefore, the TOPSIS approach was used to handle decision-making with multiple criteria, as it helps identify the best option. The factors including %yield, protein concentration, and sensory properties (color, mouthfeel, overall, fishy odor, and bitterness) were investigated. Firstly, normalized

matrices are created using actual values. Next, the matrices are weighted and normalized, with the weights (W) typically set subjectively by experts and the objective of production (Eq. (2)). The positive (A+) and negative (A-) ideal solution values of each criterion were determined using a weighted normalized decision matrix (Eq. (3)) are shown in **Table 3**

Table 3 Positive (A⁺) and negative ideal solution (A⁻) for the criteria.

Criteria	W	A ⁺	A ⁻
Yield (%)	0.2	0.021812	0.018792
Protein conc.	0.2	0.022553	0.017508
Color	0.05	0.005422	0.005422
Mouthfeel	0.05	0.005459	0.005459
Overall	0.1	0.005422	0.003787
Fishy odor	0.2	0.024527	0.011542
Bitterness	0.2	0.024261	0.009642

Using Eq. 4, the various distances are measured, indicating the position of the different alternatives for each factor from the ideal and negative ideal solutions. Whereas in the context of fishy odor and bitterness, these are attributes where lower scores are preferable. These distances are used in the calculation of relative closeness (Eq. 4). These distances were used for the calculation of relative closeness (CL values), the best alternative 0.970110 had the nearest distance to the positive ideal and the farthest distance to the negative ideal 0.036717 show in **Table 4**. According to the final rankings, enzyme SD-NY10 was the best due to the highest CL value obtained. This result is attributed to sensory properties due to the lowest general score for fishy odors 3.2 ± 0.24 and bitterness 3.1 ± 0.12 . The results show that the TOPSIS method can be effectively used in the food industry to simplify comparisons and decision-making.

Table 4 Ranking types of commercial enzymes by TOPSIS.

Enzyme	di ⁺	di ⁻	C _L	Rank
ProteAX	0.000348	0.000051	0.127874	7
M "Amano" SD	0.000083	0.000194	0.701305	2
A "Amano"2SD	0.000183	0.000052	0.222084	3
P "Amano" 6SD	0.000204	0.000050	0.197494	5
Thermoase GL30	0.000320	0.000024	0.069874	9
SD-NY10	0.000013	0.000407	0.970110	1
SD-AY10	0.000208	0.000046	0.182624	6
Papain W-40	0.000374	0.000036	0.087384	8
Bromelain F	0.000388	0.000015	0.036717	10
HF "Amano" 150SD	0.000203	0.000055	0.211891	4

4 Conclusion

In conclusion, the TOPSIS analysis, based on criteria including %yield, protein concentration, and sensory attributes (color, mouthfeel, overall acceptance, fishy odor, and bitterness), SD-NY10 was identified as the top-ranked enzyme with the highest consumer acceptance, demonstrating the closest CL value 0.970110 alignment with the ideal solution.

By implementing TOPSIS, the food industry can make more reliable, objective, and strategic enzyme selections, leading to improved efficiency, cost savings, and consumer satisfaction.

These findings suggest that FPH production can be further optimized by refining process parameters. Future studies should focus on optimizing enzyme concentration and incubation time to enhance production efficiency and product quality.

5 Acknowledgements

The authors also express their gratitude to FACTory Classroom, KMITL, for the financial support, and Amano Enzyme Asia Pacific Co., Ltd. for providing access to their laboratory. Your support is greatly appreciated.

6 References

- Abd El-Rady, T. K., Tahoun, A. A. M., Abdin, M., Amin, H. F. 2023. Effect of different hydrolysis methods on composition and functional properties of fish protein hydrolysate obtained from bigeye tuna

- waste. International Journal of Food Science and Technology, 58(12), 6552-6562.
- AOAC, 1993 AOAC Official methods of analysis (14th Ed.), II, Association of Official Analytical Chemistry, USA (1993)
- Aspevik, T., Steinsholm, S., Vang, B., Carlehög, M., Arnesen, J. A., Kousoulaki, K. 2021. Nutritional and sensory properties of protein hydrolysates based on salmon (*Salmo salar*), mackerel (*Scomber scombrus*), and herring (*Clupea harengus*) heads and backbones. *Frontiers in Nutrition*, 8, 695151.
- Chalamaiah, M., Hemalatha, R., Jyothirmayi, T. 2012. Fish protein hydrolysates: Proximate composition, amino acid composition, antioxidant activities and applications: A review. *Food chemistry*, 135(4), 3020-3038.
- Daher, D., Deracinois, B., Baniel, A., Wattez, E., Dantin, J., Froidevaux, R., Flahaut, C. 2020. Principal component analysis from mass spectrometry data combined to a sensory evaluation as a suitable method for assessing bitterness of enzymatic hydrolysates produced from micellar casein proteins. *Foods*, 9(10), 1354.
- Dauksas, E., Slizyte, R., Rustad, T., Storro, I. 2004. Bitterness in fish proteinhydrolysates and methods for removal. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 13(2), 101-114.
- Dinarkumar, Y., Krishnamoorthy, S., Margavelu, G., Ramakrishnan, G., Chandran, M. 2022. Production and characterization of fish protein hydrolysate: Effective utilization of trawl by-catch. *Food Chemistry Advances*, 1, 100138.
- Elavarasan, K., Naveen Kumar, V., Shamasundar, B. A. 2014. Antioxidant and functional properties of fish protein hydrolysates from fresh water carp (*C. Atla Catla*) as influenced by the Nature of Enzyme. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3), 1207-1214.
- Fu, Y., Chen, J., Bak, K. H., Lametsch, R. 2019. Valorisation of protein hydrolysates from animal by-products: perspectives on bitter taste and debittering methods: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(4), 978-986.
- Gan, R., He, Y., Li, Y. 2022. Structural characteristics of taste active peptides in protein hydrolysates from tilapia by-products. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(2), 1674-1687.
- Ganeko, N., Shoda, M., Hirohara, I., Bhadra, A., Ishida, T., Matsuda, H., Matoba, T. 2008. Analysis of volatile flavor compounds of sardine (*Sardinops melanostica*) by solid phase microextraction. *Journal of Food Science*, 73(1), S83-S88.
- Hedayati, S., Ansari, S., Javaheri, Z., Golmakani, M. T., Ansarifar, E. 2022. Multi-objective optimization of cakes formulated with fig or date syrup and different hydrocolloids based on TOPSIS. *LWT*, 171, 114088.
- Hedayati, S., Niakousari, M., Damyeh, M. S., Mazloomi, S. M., Babajafari, S., Ansarifar, E. 2021. Selection of appropriate hydrocolloid for eggless cakes containing chubak root extract using multiple criteria decision-making approach. *LWT*, 141, 110914.
- Holt, G. J., Faulk, C. K., Schwarz, M. H. 2007. A review of the larviculture of Cobia (*Rachycentron canadum*), a warm water marine fish. *Aquaculture*, 268(1-4), 181-187.
- Hu, Y., Xiao, N., Ye, Y., Shi, W. 2022. Fish proteins as potential precursors of taste-active compounds: an in silico study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(14), 6404-6413.
- Idowu, A. T., Benjakul, S. 2019. Bitterness of fish protein hydrolysate and its debittering prospects. *Journal of Food Biochemistry*, 43(9), e12978.
- Kouakou, C., Bergé, J. P., Baron, R., Lethuaut, L., Prost, C., Cardinal, M. 2014. Odor modification in salmon hydrolysates using the Maillard reaction. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 23(5), 453-467.
- Lauteri, C., Ferri, G., Piccinini, A., Pennisi, L., Vergara, A. 2023. Ultrasound technology as inactivation method for foodborne pathogens: A review. *Foods*, 12(6), 1212.
- Nazeer, R. A., Anila Kulandai, K. 2012. Evaluation of antioxidant activity of muscle and skin protein hydrolysates from giant kingfish, *Caranx ignobilis* (Forsskal, 1775). *International journal of food science & technology*, 47(2), 274-281.
- Noman, A., Noman, A., Ali, A. H., AL-Bukhaiti, W. Q., Mahdi, A. A., Xia, W. 2020. Structural and physicochemical characteristics of lyophilized Chinese sturgeon protein hydrolysates prepared by

- using two different enzymes. Journal of Food Science, 85(10), 3313–3322.
- Prihanto, A. A., Nurdiani, R., Bagus, A. D. 2019. Production and characteristics of fish protein hydrolysate from parrotfish (*Chlorurus sordidus*) head. PeerJ, 7, e8297.
- Roslan, J., Yunus, K. F. M., Abdullah, N., Kamal, S. M. M. 2014. Characterization of fish protein hydrolysate from tilapia (*Oreochromis niloticus*) by-product. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2, 312-319.
- Siddik, M. A., Howieson, J., Fotedar, R., Partridge, G. J. 2021. Enzymatic fish protein hydrolysates in finfish aquaculture: a review. Reviews in Aquaculture, 13(1), 406-430.
- Steinsholm, S., Oterhals, Å., Underhaug, J., Måge, I., Malmendal, A., Aspevik, T. 2020. Sensory assessment of fish and chicken protein hydrolysates. Evaluation of NMR metabolomics profiling as a new prediction tool. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68(12), 3881-3890.
- Sujith, P. A., Hymavathi, T. V. 2011. Recent developments with debittering of protein hydrolysates. As J Food Ag-Ind, 4, 365-381.
- Taherdoost, H., Madanchian, M. 2023. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. Encyclopedia, 3(1), 77-87.
- Thermo Fisher Scientific. 2024. Pierce™ BCA Protein Assay Kit (No. 23227). Thermo Fisher Scientific. Available at: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/23227>
- Wong, T. M., Kerr, P. S., Ghosh, P., Lombardi, J. F., Maldonado, Y., Lynglev, G. B., Oestergaard, P. R. 2015. U.S. Patent No. 9,034,402. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.



วิจัยและพัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง

Research and Development of an Automatic Variable Rate Fertilizer Applicator for Cassava

อานนท์ สายคำฟู^{1*}, วิชัย โอภาณุกุล¹, ประสาท แสงพันธุ์ตา¹, พินิจ จิรคคกุล², ธนพงศ์ แสนจัม¹, เอกภาพ ป่านภูมิ², รัฐภูมิ สุริยะโชติ¹

Arnon Saicomfu^{1*}, Wichai Opanukul¹, Prasart Sangphantha¹, Pinit Jirakkakul², Tanapong Sanchum¹, Akkaparp Panpoom², Ratthaphum Suriyachote

¹สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

²ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ตำบลบ้านทุ่ม อำเภอเมือง ขอนแก่น 40000

²Khon Kean Agricultural Engineering Research Center, Department of Agriculture, Ban Tum, Muang, Khon Kean 40000

*Corresponding author: Tel.: +66-8-6673-1028, Fax.: +66-25-792-757, E-mail: arnon.scf@gmail.com

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการผลิตพืชให้เหมาะสมกับความอุดมสมบูรณ์ของดินเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีตามความต้องการของพืชที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เช่น อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์ อัตราการหยอดปุ๋ย และการใช้สารกำจัดศัตรูพืช งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยและพัฒนา “เครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง” โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino mega 2560) ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง 24 V ขนาด 500 W ที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องหยอดปุ๋ยแบบ 3 ถัง โดยส่งผ่านสัญญาณแบบ PWM (Pulse Width Modulation) และใช้เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) วัดความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จากล้อจักร (Ground wheel) จากผลการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ย 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 พบว่าอัตราการหยอดมีความแม่นยำเฉลี่ย 91.55%, 90.26% และ 94.07% ตามลำดับ และจากการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยในแปลงมันสำปะหลัง พบว่า มีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 4.79 ไร่ hr^{-1} ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ 1.17 m s^{-1} ประสิทธิภาพเชิงพื้นที่ 75.43% และมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.69 l rai^{-1}

คำสำคัญ: เครื่องหยอดปุ๋ย, ระบบหยอดอัตโนมัติ, มันสำปะหลัง, การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน

Abstract

Plant production technology, according to the specific fertility of the site, is applying the technology as plant requirements and according to each location such as seed sowing rate, fertilizer sowing rate and pesticide control rate. The purpose of this study was to investigate and develop "an Automatic Variable Rate Fertilizer Applicator for Cassava." The micro-controller (Arduino mega 2560) controlled the speed of the DC motors (24 V, 500 W) which are driven to sow tree fertilizers for 3 tanks. This machine controlled through the PWM (Pulse Width Modulation) signal and used an encoder to measure the ground wheel speed. The results showed that the accuracy of the 46-0-0, 18-46 and 0-0-60 fertilizer rate tests were 91.55%, 90.26% and 94.07% respectively. In addition, testing of an automated variable rate fertilizer applicator in the cassava field revealed that the average field was 4.79 rai hr^{-1} at average travelling speed of tractor 1.17 m s^{-1} , average field efficiency was 75.43% and average fuel consumption was 0.69 l rai^{-1}

Keywords: Fertilizer applicator, Automatic variable rate, Cassava, Fertilizer usage based on soil analysis

Received: August 09, 2023

Revised: January 21, 2024

Accepted: April 24, 2025

Available Online: May 13, 2025

1 บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2565 มีพื้นที่เพาะปลูก 10,861,975 rai มีผลผลิต 34,068,005 ton โดยประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกมันสำปะหลังเป็นอันดับ 2 ของโลก สร้างมูลค่าการส่งออก 1.5 แสนล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) โดยที่ความต้องการผลผลิตมันสำปะหลังทั้งภายในประเทศและตลาดโลกยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในปี 2559-2561 กลับมีผลผลิตลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยปี 2561 มีผลผลิตลดลงจากปี 2559 ราว 5.76% (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) เนื่องจากเกิดการระบาดของแมลงและโรคพืช และผลกระทบจากความผันแปรของสภาวะอากาศโลกและฤดูกาลยังเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง รวมถึงปัจจัยการผลิตที่มีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เมื่อความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตและเพื่อให้ได้ผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่หรือการเกษตรแบบแม่นยำสูง (Precision Agriculture) เข้ามาช่วยในกระบวนการเพาะปลูกมันสำปะหลัง

แหล่งปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นดินทราย ดินร่วนทราย ซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำมากหรือที่เรียกว่าดินเลว จึงจำเป็นต้องใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มธาตุอาหารให้เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชที่จะช่วยสามารถทำให้มันสำปะหลังมีผลผลิตเพิ่มขึ้น กรมวิชาการเกษตรจึงมีคำแนะนำการใส่ปุ๋ยในการปลูกมันสำปะหลังตามค่าวิเคราะห์ดิน เพื่อให้เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังสามารถใช้ปุ๋ยได้ตรงตามความอุดมสมบูรณ์ของดินและตรงตามความต้องการของพืช อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนปัจจัยการผลิตในส่วนของปุ๋ยได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งต้นทุนการผลิตมันสำปะหลังทั้งหมดเฉลี่ย 6,650 baht rai⁻¹ ในส่วนนี้คิดเป็นต้นทุนของปุ๋ยเฉลี่ยมากถึง 1,634 baht rai⁻¹ หรือคิดเป็น 24.57% ของต้นทุนการผลิตมันสำปะหลังทั้งหมด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561; สำนักวิจัยและพัฒนาปัจจัยการผลิตผลการเกษตร, 2553) ดังนั้นหากเกษตรกรสามารถใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินได้ก็จะทำให้ลดต้นทุนในส่วนของการใส่ปุ๋ยได้อีกทางหนึ่ง โดยสามารถลดค่าปุ๋ยได้สูงสุดถึง 50% หรือคิดเป็นเงินจำนวน 830 baht rai⁻¹ และหากคิดจากพื้นที่การปลูกทั่วประเทศประมาณ 8.3 million rai จะทำให้ประเทศไทยลดการนำเข้าปุ๋ยที่ใช้ในไร่มันสำปะหลังได้สูงสุดเป็นมูลค่ามากถึง 6.8 พันล้านบาทต่อปี

ซึ่งในปี 2558 สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม (ชินธุและคณะ, 2558) ได้ทำการวิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย โดยเครื่องดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีในไร่อ้อย หากนำมาประยุกต์ใช้งานในไร่มันสำปะหลังยังมีข้อจำกัดของเครื่องทั้งในเรื่องของระยะปลูกระหว่างแถวและอัตราการใส่ปุ๋ยที่ความแตกต่างกันระหว่างการปลูกอ้อยกับการปลูกมันสำปะหลัง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ วิจัยและพัฒนาเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง ให้สามารถควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยได้ตรงตามค่าวิเคราะห์ดินหรือตามอัตราคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร โดยปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ให้ใส่ในอัตราตั้งแต่ 5-31 kg rai⁻¹, 4-17 kg rai⁻¹ และ 7-31 kg rai⁻¹ ตามลำดับ (สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตผลการเกษตร, 2553) และการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยดังกล่าวเป็นแบบวงปิด (Close Loop control System) ซึ่งจะมีการตรวจจับสัญญาณความเร็วรอบของเพลาที่กำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยป้อนกลับ (Feedback control) ไปยังสมองกลฝังตัวหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (micro-controller) เพื่อให้อัตราการหยอดปุ๋ยมีความแม่นยำมากขึ้น

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ออกแบบระบบควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย

การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัตินี้จะควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ยี่ห้อ Arduino รุ่น Mega2560 เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ขนาด 500 W ผ่าน DC Motor Drive จำนวน 3 ชุด คือ ควบคุมขับเคลื่อนเพลาหยอดปุ๋ยถึง N P และ K สำหรับปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ตามลำดับ ซึ่งปุ๋ยทั้ง 3 สูตรนี้จะใช้เป็นแม่ปุ๋ยที่นำมาผสมสำหรับการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน พร้อมติดตั้งโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encoder) ที่เพลาหยอดปุ๋ยจำนวน 3 ตัว สำหรับวัดความเร็วรอบเพลาหยอดปุ๋ยทั้ง 3 ถัง เพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับ (Feedback control) ของระบบควบคุม และใช้โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encoder) อีก 1 ตัว สำหรับวัดความเร็วรอบของล้อจักร (Ground wheel) แบบล้อยาง เพื่อให้การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยมีความสัมพันธ์กับความเร็วการเคลื่อนที่ ซึ่งล้อจักรดังกล่าวมีแรงเสียดทาน (Friction) ที่น้อยมากเนื่องจากไม่ได้ใช้ระบบส่งกำลังแบบเฟืองโซ่จากล้อจักร โดยจะใช้มอเตอร์กระแสตรงขับเคลื่อนเพลาและอุปกรณ์กำหนดปริมาณปุ๋ยแทน ซึ่งในส่วนของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงใช้โปรแกรม Arduino IDE สำหรับการเขียนภาษา C++ ซึ่งความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนเพลาและอุปกรณ์กำหนดจำนวนปุ๋ยควบคุมด้วยคำสั่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) โดยใช้หลักการปรับค่า Duty cycle ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องกำเนิดพัลส์พัลส์รวมใส่ปุ๋ยของบริษัทพรเจริญ (ช่างคิด) จำกัด มาดัดแปลงถึงใส่ปุ๋ยให้เป็นแบบ 3 ถัง ซึ่งมีอุปกรณ์กำหนดจำนวนปุ๋ยเป็นแบบล้อร่อง (fluted wheel) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และมีจำนวน 10 ร่อง แต่ละร่องมีขนาด 2 cm x 2.5 cm x 1.5 cm (กว้างxยาวxลึก) และสามารถปรับระยะของอุปกรณ์กำเนิดพัลส์แบบขาคี (Ripper) ให้ใช้งานในไร่มันสำปะหลังได้ตั้งแต่ระยะแถวปลูก 110-140 cm ซึ่งสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบควบคุมอัตโนมัติกับเครื่องหยอดปุ๋ย ดังแสดงแนวคิดใน Figure 1

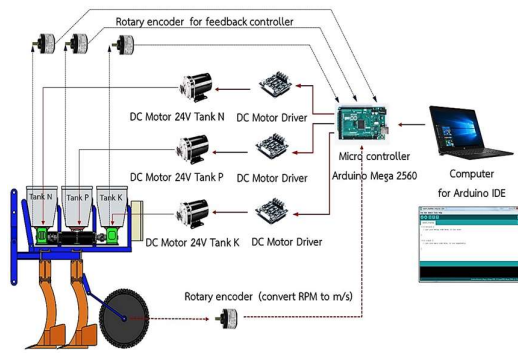


Figure 1 Concept of an automatic variable rate for fertilizer applicator.

2.2 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลายอดปุ๋ย (RPM)

จากการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับเพลายอดปุ๋ยด้วยคำสั่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) โดยสัญญาณดังกล่าวใช้หลักการปรับค่า Duty cycle นั้น จำเป็นต้องทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลายอดปุ๋ย (rpm) โดยกำหนดค่า PWM ตั้งแต่ 25, 50, 75 และ 100% ของค่า Duty cycle แล้วบันทึกค่าความเร็วรอบที่วัดได้ เพื่อนำมาใช้เป็นสมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

2.3 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลายอดปุ๋ย (rpm) กับอัตราการหยอดปุ๋ย

หลังจากที่ได้สมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แล้ว ต้องทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบของเพลายอดปุ๋ย (rpm) กับอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร โดยกำหนดความเร็วรอบของเพลายอดปุ๋ยตามที่มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดเกียร์ทดสอบสามารถขับเพลายอดได้ คือ ตั้งแต่ 5, 10, 20, 30 จนถึง 60 rpm จับเวลา 1 min แล้วบันทึกค่าน้ำหนักปุ๋ยให้อยู่ในหน่วย kg min^{-1} ซึ่งทำการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร ที่ความเร็วรอบของเพลายอดปุ๋ยต่าง ๆ กัน อย่างละ 3 ซ้ำ เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร ให้เป็นหน่วย kg rai^{-1} โดยได้กำหนดที่หน้ากว้างของเครื่องหยอดเท่ากับ 2.4 m (ระยะร่องมันสำปะหลัง 1.2 m หน้ากว้างการทำงานจำนวน 2 ร่องรวม 2.4m) และในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 1 m s^{-1} เนื่องจากเป็นความเร็วการทำงานของรถแทรกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับต่อพ่วงอุปกรณ์กำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยในไร่มันสำปะหลัง (อานนท์และคณะ, 2565)

2.4 ทดสอบความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ย

การทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยได้ใช้ปุ๋ยทั้ง 3 สูตร โดยกำหนดอัตราการหยอดไว้ 4 ระดับ คือ 5, 10, 20 และ 30 kg rai^{-1} ซึ่งเป็นอัตราการหยอดปุ๋ยต่ำสุดและสูงสุดตามคำแนะนำการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่มันสำปะหลังของกรมวิชาการเกษตร

แล้วทำการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยด้วยการพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น L345-II DT ใช้เกียร์ Low4 รอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm ความเร็วในการเคลื่อนที่ประมาณ 1.2 m s^{-1} โดยทำการทดสอบในแปลงที่มีระยะร่อง 1.2 m และมีความยาว 100 m คิดเป็นพื้นที่แปลงทดสอบ (2 row x 1.2 m x 100 m) เท่ากับ 240 m^2 หรือ 0.15 rai และทำการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร ที่อัตราการหยอดต่าง ๆ อย่างละ 3 ซ้ำ แล้วนำปุ๋ยแต่ละสูตรที่ออกจากเครื่องหยอดมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณเป็นความแม่นยำของการหยอดปุ๋ยตามอัตราที่กำหนด

2.5 ทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องหยอดปุ๋ย

ทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องหยอดปุ๋ยในแปลงทดสอบที่มีขนาด กว้าง 24 m และยาว 120 m ซึ่งลักษณะเนื้อดินแบบดินร่วนเหนียว โดยพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น L345-II DT ใช้เกียร์ Low4 รอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm ความเร็วในการเคลื่อนที่ประมาณ 1.2 m s^{-1}

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการออกแบบระบบควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย

การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติได้ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ผ่านชุดขับมอเตอร์ (DC motor drive) ซึ่งเป็นวงจรแบบ Switching Amplifier คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการปรับค่า Duty Cycle เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งเกิดการสูญเสียกำลังงานที่น้อยมาก และการควบคุมแบบนี้จะใช้งานได้ดีที่ความถี่ที่หรือความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (เอกชัย, 2552) ซึ่งในควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ขนาด 500 W จำนวน 3 ชุด คือ ควบคุมขับเพลายอดปุ๋ยทั้ง N P และ K สำหรับปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ตามลำดับ พร้อมติดตั้งโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encode) ที่เพลายอดปุ๋ยจำนวน 3 ตัว เพื่อใช้วัดเป็นสัญญาณป้อนกลับ (Feedback control) ของระบบควบคุม และใช้โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encode) อีก 1 ตัว วัดความเร็วรอบของล้อจักรแล้วแปลงเป็นความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

ทั้งนี้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยของแต่ละสูตรและระยะของระหว่างร่องมันสำปะหลังได้ และในส่วนของความเร็วของรถแทรกเตอร์สามารถวัดได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดตั้งกับล้อจักร ซึ่งระบบควบคุมจะทำการประมวลผลอัตราการหยอดปุ๋ยให้สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และระยะระหว่างแถวปลูก ดังแสดงอุปกรณ์การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยใน Figure 2 และแสดงแผนภาพระบบควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยใน Figure 3

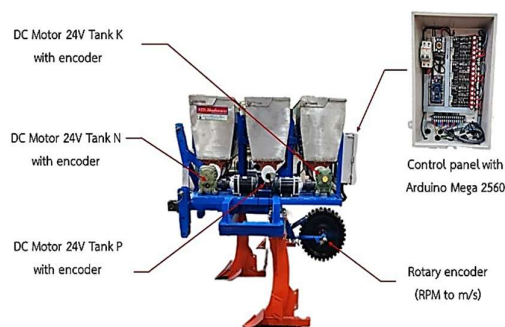


Figure 2 An automatic variable rate fertilizer applicator.

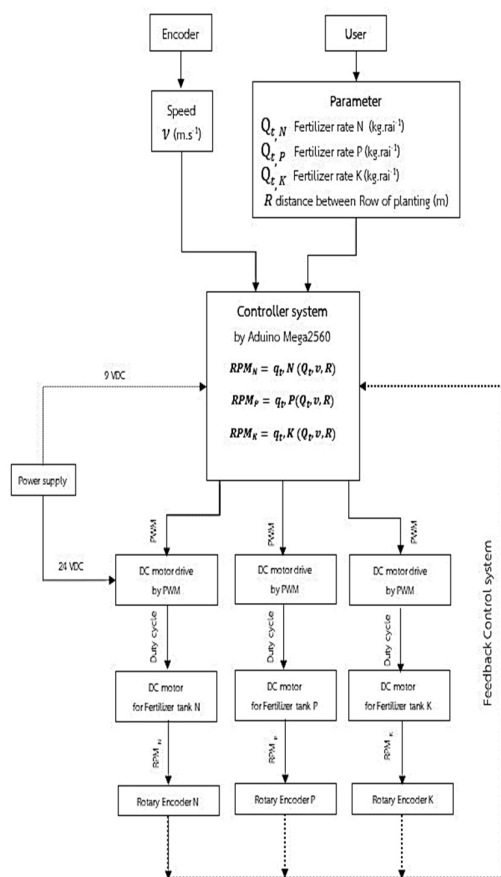


Figure 3 Flow chart of the controller system for fertilizer rate.

จากแผนงานการออกแบบระบบควบคุมข้างต้น สามารถนำมาเขียนสมการเบื้องต้นใช้สำหรับควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยให้สัมพันธ์กับความเร็วรถแทรกเตอร์และระยะของร่องปลูกมันสำปะหลังได้ โดยใช้แนวคิดและหลักการออกแบบให้เป็นระบบควบคุมแบบฟีดแบ็กเชิงเวลา (t) ดังสมการที่ 1 ถึง 3

$$RPM_N = q_t N(Q_t, v, R) \quad (1)$$

$$RPM_P = q_t P(Q_t, v, R) \quad (2)$$

$$RPM_K = q_t K(Q_t, v, R) \quad (3)$$

เมื่อ RPM_N คือ ความเร็วรอบของเพลายหยอดปุ๋ย N (rpm)

RPM_P คือ ความเร็วรอบของเพลายหยอดปุ๋ย P (rpm)

RPM_K คือ ความเร็วรอบของเพลายหยอดปุ๋ย K (rpm)

$q_t N$ คือ สมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย N

$q_t P$ คือ สมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย P

$q_t K$ คือ สมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ย K

Q_t คือ อัตราการหยอดปุ๋ย (kg rai^{-1})

v คือ ความเร็วของรถแทรกเตอร์ (m s^{-1})

R คือ ระยะระหว่างแถวปลูก (m)

ซึ่งสมการควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร นั้นจะสามารถหาได้จากกรรการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.2 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า PWM กับ ความเร็วรอบของเพลายหยอดปุ๋ย (RPM)

จากการออกแบบสมการควบคุมความเร็วรอบของเพลายหยอดปุ๋ยในแต่ละสูตรเบื้องต้นเรียบร้อยแล้ว และเนื่องจากเป็นการควบคุมด้วยการส่งสัญญาณ PWM จึงต้องทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลายหยอดปุ๋ย (RPM) โดยผลการทดสอบดังแสดงใน Figure 4 to 6

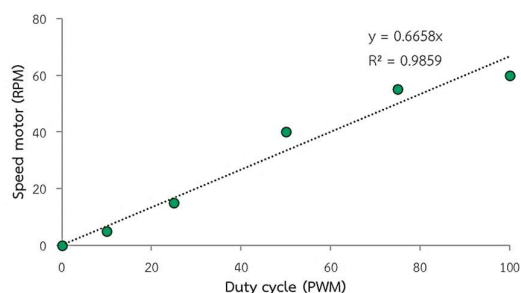


Figure 4 The relations between PWM and RPM of tank N.

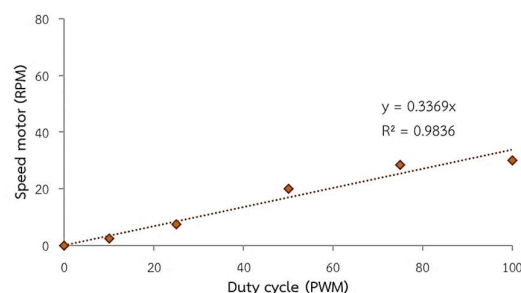


Figure 5 The relations between PWM and RPM of tank P.

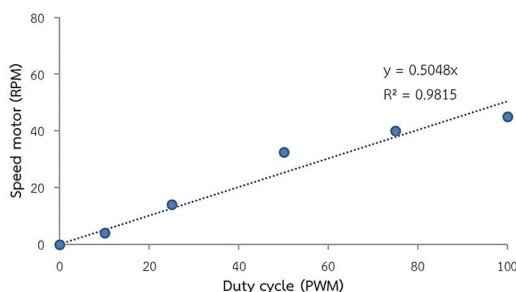


Figure 6 The relations between PWM and RPM of tank K

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของค่า Duty cycle (PWM) กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) ของปุ๋ยแต่ละสูตรจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากอัตราการใส่ปุ๋ยในแปลงของแต่ละสูตรมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ในดิน ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้อ้างอิงอัตราการใส่ปุ๋ยมันสำปะหลังตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร โดยปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ให้ใส่ในอัตราตั้งแต่ 5-31 kg rai^{-1} , 4-17 kg rai^{-1} และ 7-31 kg rai^{-1} ตามลำดับ จึงทำให้การออกแบบความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย N P และ K โดยใช้ชุดห้องเกียร์ทดรอบให้มีความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 60, 40 และ 50 rpm ตามลำดับ และส่งผลให้ความสัมพันธ์ของค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยแต่ละสูตรมีความแตกต่างกันนั่นเอง

3.3 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) กับอัตราการหยอดปุ๋ย

เมื่อได้ความสัมพันธ์ของค่า PWM กับความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) แล้ว จึงทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) กับอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร (46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60) โดยผลการทดสอบดังแสดงใน Figure 7 to 9

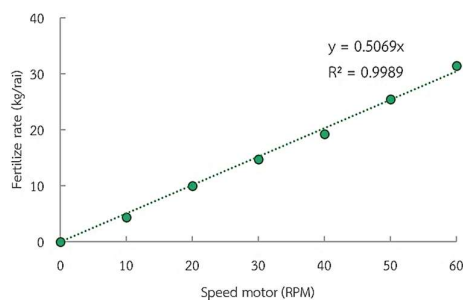


Figure 7 The relations between fertilizer rate (46-0-0) and speed motor of tank N

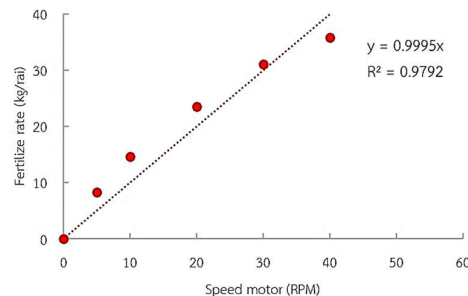


Figure 8 The relations between fertilizer rate (18-46-0) and speed motor of tank P

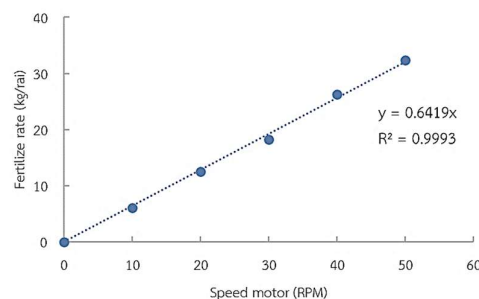


Figure 9 The relations between fertilizer rate (0-0-60) and speed motor of tank K

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ย (RPM) กับอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร มีความสัมพันธ์เป็นแบบสมการเส้นตรง (Linear equation) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาและพัฒนาระบบหยอดปุ๋ยอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่ย่อย (อานนท์และชัยยกร, 2562) และผลการทดสอบพบว่า ปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 มีอัตราการหยอดปริมาณสูงสุดเท่ากับ 31 kg rai^{-1} ที่ความเร็วรอบ 60 rpm, 37 kg rai^{-1} ที่ความเร็วรอบ 40 rpm และ 32 kg rai^{-1} ที่ความเร็วรอบ 50 rpm ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราที่เพียงพอสำหรับการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่มันสำปะหลัง

3.4 ผลการทดสอบความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ย

การทดสอบความแม่นยำของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบปรับอัตราการหยอดอัตโนมัติที่อัตราการหยอดต่างๆ ในแปลงทดสอบภาคสนามดังแสดงใน Figure 10 และผลการทดสอบดังแสดงใน Table 1



Figure 10 Fertilizer variable rate testing on field.

Table 1 The result of fertilizer rate testing on field.

Fertilizer	Fertilizer rate (kg rai ⁻¹)		Accuracy (%)	
	configured	the result	accuracy	average
46-0-0	5	5.6	89.29	91.55
	10	11.3	88.50	
	20	21.8	91.74	
	30	29	96.67	
18-46-0	5	5.8	86.21	90.26
	10	11.7	85.47	
	20	21.6	92.59	
	30	31	96.77	
0-0-60	5	5.4	92.59	94.07
	10	10.6	94.34	
	20	21.5	93.02	
	30	28.9	96.33	

จากผลการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ย พบว่า ปุ๋ย 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 มีความแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 91.55%, 90.26% และ 94.07% ตามลำดับ โดยความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ยทั้ง 3 สูตร มีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.6-1.7 kg rai⁻¹ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบระบบควบคุมสำหรับเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบแม่นยำที่มีค่าความคาดเคลื่อน ในสถานีทดสอบและในแปลงอ้อยเท่ากับ ± 1.3 kg rai⁻¹ และ ± 2.1 kg rai⁻¹ ตามลำดับ (สุชาติและวสุ, 2562) นอกจากนี้ยังพบว่า ผลการทดสอบมีอัตราการหยอดปุ๋ยสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากสมการที่ใช้ควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ในการทดสอบนี้ได้ทำการพ่วงเครื่องหยอดปุ๋ยในแปลงมันสำปะหลังจึงทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนในขณะที่ทำการทดสอบ และส่งผลโดยตรงให้ความหนาแน่นของปุ๋ยเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีผลอัตราการหยอดที่ทดสอบสูงกว่าอัตราที่กำหนดไว้

3.5 ผลการทดสอบความสามารถการทำงาน

การทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยแบบปรับอัตราการหยอดอัตโนมัติในแปลงมันสำปะหลัง ดังแสดงใน Figure 11 ซึ่งในแปลงทดสอบนี้ได้กำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 ในอัตรา 10, 6 และ 12 kg rai⁻¹ ตามลำดับ และผลการทดสอบดังแสดงใน Table 2



Figure 11 An automatic variable rate fertilizer application testing on casava field.

Table 2 The result of automatic variable rate fertilizer application testing on casava field.

Description	
Field test condition	
- Area (W x L)	24 x 125 m
- Soil moisture content (dry basis)	5.73%
- Surface texture of soil	clay loam
Result	
- Fertilizer rate 46-0-0 (10 kg rai ⁻¹)	10.9 kg rai ⁻¹
Accuracy (%)	(91%)
- Fertilizer rate 18-46-0 (6 kg rai ⁻¹)	6.7 kg rai ⁻¹
Accuracy (%)	(88.4%)
- Fertilizer rate 0-0-60 (12 kg rai ⁻¹)	13.6 kg rai ⁻¹
Accuracy (%)	(88.7%)
- Speed of tractor	1.17 m s ⁻¹
- Working width (planting: 2 row)	2.4 m
- Theory field capacity	6.35 rai hr ⁻¹
- Field capacity	4.79 rai hr ⁻¹
- Field efficiency	75.43%
- Fuel consumption	0.69 l rai ⁻¹

จากผลการทดสอบเครื่องใส่ปุ๋ยแบบปรับอัตราการหยอดอัตโนมัติในแปลงมันสำปะหลังที่มีระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 1.2 m และมันสำปะหลังมีอายุ 2 month โดยมีความสูงตั้งแต่ท้องร่องถึงยอดมันสำปะหลังตั้งแต่ 0.5-0.8 m ซึ่งในแปลงมันสำปะหลังมีความชื้นในดินเฉลี่ย 5.73% d.b. และความแข็งของดินที่วัดได้จากแรงกดมีค่าอยู่ในช่วง 25-40 kg cm⁻² ผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการทำงานของเครื่องต้นแบบพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ล้อสูงเฉลี่ยเท่ากับ 4.79 rai hr⁻¹ ประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 75.43% และมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.69 l rai⁻¹ ส่วนความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ย 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 มีค่าเท่ากับ 91%, 88.4% และ 87% ตามลำดับ

4 สรุป

เครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลังพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ล้อสูง สามารถปรับอัตราการหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินของกรมวิชาการเกษตร โดยมีถังปุ๋ยจำนวน 3 ถังสำหรับใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0, 18-46-0 และ 0-0-60 และสามารถปรับอัตราได้สูงสุด 31, 37 และ 32 kg rai⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราที่เพียงพอสำหรับการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่มันสำปะหลังและมีความแม่นยำของอัตราการหยอดปุ๋ยเฉลี่ย 91.55%, 90.26% และ 94.07% ตามลำดับ และจากการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินพ่วงรถแทรกเตอร์ล้อสูงพบว่า ความสามารถในการทำงานของต้นแบบเฉลี่ยเท่ากับ 4.79 rai hr⁻¹ ประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 75.43% โดยอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.69 l rai⁻¹ ซึ่งหากเกษตรกรนำเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติไปใช้งานในไร่มันสำปะหลังแล้วเลือกปรับอัตราการหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน ก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยได้ตรงตามความอุดมสมบูรณ์ของดินและตรงตามความต้องการของพืช อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนปัจจัยการผลิตในส่วนของปุ๋ยได้อีกทางหนึ่งด้วย

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยความสะดวกศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชลพบุรี ที่เอื้อเฟื้อแปลงวิจัยสำหรับการทดสอบเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติในไร่มันสำปะหลัง และขอขอบคุณบริษัทพรเจริญ (ช่างคิด) จำกัด ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์สำหรับการวิจัยเครื่องหยอดปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับไร่มันสำปะหลัง

6 เอกสารอ้างอิง

ชนิษฐ์ หวานณรงค์, อัศพล เสนาณรงค์, เวียง อากรสี, วีระ สุขประเสริฐ, อุทัย ธานี. 2561. วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 ประจำปี 2561, 245-249. ประจวบคีรีขันธ์: ศูนย์ประชุมนานาชาติจุฬารักษ์ วรนา หัวหิน โยเติ้ล แอนด์ คอนเวนชัน. 26-27 เมษายน 2561, หัวหิน, ประจวบคีรีขันธ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2561. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2561. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2562. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้าปี 2562. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2565. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตผลการเกษตร. 2553. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สุชาติ สีก้น, วสุ อุดมเพทยกุล. 2562. การพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมสำหรับเครื่องหยอดปุ๋ยอ้อยแบบแม่นยำ. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 ประจำปี 2562, 162-167. ชลบุรี: โรงแรมฮาร์ตโรค. 14-15 มีนาคม 2562, พัทยา, ชลบุรี.

อานนท์ สายคำฟู, ชัยยากรณ์ จันทร์สุวรรณ. 2562. การศึกษาและพัฒนาระบบหยอดปุ๋ยอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่อ้อย. รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 57 ประจำปี 2562, เล่มที่ 2, 215-222. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2562, จตุจักร, กรุงเทพฯ.

อานนท์ สายคำฟู, วิชัย โอภาณุกุล, ประสาท แสงพันธุ์ตา, พินิจ จิรคกุล, ธนพงศ์ แสนจุ่ม, เอกภาพ ปานภูมิ, อนุชา ชาวโชติ, สิทธิชัย ดาสี, นิรุต บุญญา. 2565. วิจัยและพัฒนาารถแทรกเตอร์ยกสูงสำหรับพ่วงอุปกรณ์กำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยในไร่มันสำปะหลัง. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 ประจำปี 2565, 130-138. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 18-19 สิงหาคม 2565, เมือง, เชียงใหม่.

เอกชัย มะการ. 2552. เรียนรู้ เข้าใจ ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัทอูทีที่ จำกัด.



การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะคืนทุนของเครื่องตัดสับสำหรับลดขนาดทางกายภาพฟางและตอซังแบบลากจูง Breakeven and Payback Period Analysis of a Shredder for Physical Reduction of Straw and Stubble

ไพโรจน์ นะเที่ยง^{1*}

Pairote Nathiang^{1*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์, อุดรดิตถ์ 53000

¹Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000

*Corresponding author: Tel.: +66-098-804-9275, E-mail: Pairote.n@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการใช้งาน จุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุนของเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงสำหรับจัดการฟางและตอซังหลังการเก็บเกี่ยวให้มีความยาวเฉลี่ย 50-100 mm ซึ่งจะช่วยลดอุปสรรคในการไถเตรียมดินและทำให้คลุกเคล้าฟางและตอซังลงในดินได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการใช้หลักการคิดค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง ผลการวิจัย พบว่า จุดคุ้มทุนของการใช้งานมีค่าเท่ากับ 127 rai year⁻¹ มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 10.84 month ซึ่งเมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาที่มีการใช้งานเพียง 2 month year⁻¹ ตามช่วงฤดูการทำนาปีละ 2 ครั้ง จึงใช้ระยะเวลา 5 years 25 days จึงจะทำให้เกษตรกรสามารถถึงจุดคุ้มทุนเมื่อเทียบกับเงินลงทุนค่าเครื่องจักรที่มีราคา 120,000 baht

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์, เทคโนโลยีเครื่องตัดสับ, ฟางและตอซัง

Abstract

This research aims to analyze the operating cost, break-even point, and payback period of a tractor-drawn straw and stubble chopper used for post-harvest management of rice straw and stubble to achieve an average length of 50–100 mm. This helps reduce obstacles during soil preparation and allows for uniform incorporation of straw and stubble into the soil. The analysis uses the straight-line depreciation method. The results showed that the break-even point of the machine was 127 rai year⁻¹, with a payback period of 10.84 months. However, given that the machine is used only 2 months year⁻¹ during the biannual rice cultivation seasons, the actual time required to reach the break-even point is 5 years and 25 days, based on an initial investment cost of 120,000 baht.

Keywords: Economic analysis, Shredder technology, Straw

1 บทนำ

ปัจจุบันในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวเกษตรกรทำนานิยมใช้เครื่องเกี่ยวมัดข้าวเป็นหลัก โดยเครื่องเกี่ยวมัดข้าวจะทิ้งเศษฟางไว้ในแปลงนามีขนาดความยาวมากกว่า 100 mm (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548) โดยจะรวมตัวและสะสมกันเป็นชั้นอยู่บนผิวดินทำให้ไม่สามารถเตรียมดินโดยใช้รถแทรกเตอร์ได้ตามปกติ (ชุดวิวัฒน์ และดิเรก, 2540) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Butt et al. (1986) และ ปณณวิชัย ทองคำ (2565) ที่พบว่าฟางที่ถูกสับให้มีความยาวเฉลี่ย 50-100 mm เป็นขนาดความยาวที่ทำให้การย่อยสลายได้อย่างเหมาะสม

รวมทั้งทำให้การคลุกเคล้าในดินเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอด้วย อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Gilbertson and Knight (1986) ที่ได้แบ่งความยาวของฟางออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดปัญหาในการคลุกเคล้าลงในดินว่า ฟางที่มีขนาดความยาว 0-50 mm โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับว่าไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการคลุกเคล้าลงในดิน ส่วนฟางที่มีขนาดความยาว 50-120 mm อาจก่อให้เกิดปัญหาบ้างทำให้จำนวนของวิธีการเตรียมดินลดลง และฟางที่มีขนาดความยาวมากกว่า 120 mm ไม่เหมาะสมกับวิธีการเตรียมดินวิธีการใด ๆ นอกจากการไถด้วยต้นกำลังและอุปกรณ์เตรียมดินขนาดใหญ่เพียงวิธีการเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องตัด

Received: April 02, 2024

Revised: June 05, 2024

Accepted: February 03, 2025

Available online: June 24, 2025

สับสำหรับลดขนาดทางกายภาพของฟางและตอซังแบบลากจูง สำหรับใช้เป็นเครื่องจักรกลการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวที่สามารถทำให้ฟางและตอซังมีขนาดสั้นลงโดยเฉลี่ย 50-100 mm ซึ่งเป็นความยาวที่ทำให้การคลุกเคล้าลงในดินทำได้ อย่างสม่ำเสมอและช่วยลดอุปสรรคในการไถเตรียมดิน อีกทั้งยังพบว่าการไถกลบฟางและตอซังลงที่มีการลดขนาดลงไปในดินในระยะความลึก 15 ถึง 20 cm ร่วมกับการหมักทางชีวภาพด้วยการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง เชื้อราไตรโครโดมา และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดเป็นระยะเวลา 100 day มีผลทำให้ค่าอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย (0.1-0.29%) อีกทั้งยังทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีของดินมีแนวโน้มเป็นกรดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังคงเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของต้นข้าว (ไพโรจน์, 2563)

โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาถึงต้นทุนในการใช้งาน รวมถึงวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมสำหรับนำไปใช้ในการประกอบการตัดสินใจสำหรับเกษตรกรเมื่อมีการนำเทคโนโลยีเครื่องตัดสับสำหรับลดขนาดทางกายภาพของฟางและตอซังแบบลากจูงไปใช้งานจริง โดยผู้วิจัยคาดหวังว่าเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับสถานประกอบการนี้จะเป็นตัวอย่างหนึ่งของการนำสิ่งประดิษฐ์ที่ได้จากงานวิจัยไปการใช้ประโยชน์และสามารถต่อยอดไปสู่เชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาด้านต้นทุนและวิเคราะห์จุดคุ้มทุนรวมทั้งระยะเวลาคืนทุนในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีต้นแบบเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดย ไพโรจน์ และคณะ (2561) ตามภาพที่ Figure 1 โดยมีส่วนประกอบสำคัญคือ (1) เฟลาส่งกำลังจากเพืองท้าย PTO รถแทรกเตอร์ (2) ชุดลูกกวักสำหรับเก็บฟางลอยและตอซัง (3) ชุดใบมีดสำหรับตัดตอซัง (4) เครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำขนาด 10 hp (5) ชุดใบมีดสำหรับตัด-สับ (6) ถังรับน้ำหนัก (7) ชุดปากเก็บฟางข้าวและตอซัง (8) ชุดเกลียวดูดเศษฟางและตอซัง (9) มูเล่-สายพานส่งกำลังจากเพืองท้าย PTO ของรถแทรกเตอร์ (10) แกนเฟลาส่งกำลังต่อกับเพืองท้าย PTO รถแทรกเตอร์ (11) โครงสร้างเหล็กตัวไอขึ้นรูป และ (12) ชุดต่อพ่วงติดท้ายรถแทรกเตอร์

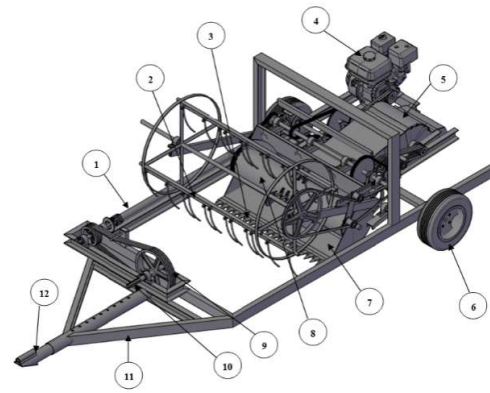


Figure 1 Schematic diagram of shredder for physical reduction of straw and stubble.

2.1 สมรรถนะการทำงานของเทคโนโลยีเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง

ผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงไปทดสอบในพื้นที่แปลงนาหลังการเก็บเกี่ยว 2 day โดยใช้รถแทรกเตอร์คูโบต้ารุ่น L3608 สำหรับลากจูงเครื่องตัดสับฟางและตอซัง ความเร็วในการขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ลากจูงใช้ความเร็วคงที่ 20 km hr⁻¹ (เกียร์ Low) ส่วนเครื่องยนต์ต้นกำลังที่ใช้สำหรับหมุนชุดโครงใบมีดที่ใช้ตัดสับฟางและตอซังทำงานในรอบคงที่ 2,000 r min⁻¹ ความเร็วรอบของชุดโครงใบมีด 1,800 r min⁻¹ ซึ่งเป็นความเร็วรอบสูงสุดของชุดโครงใบมีด ตามภาพที่ Figure 2 โดยทำการวัดกำลังการผลิตและอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบการหมุนของชุดเกลียวดูดสำหรับลำเลียงฟางและตอซังเข้าไปตัดสับ 3 ระดับ ในอัตราความเร็วรอบที่ 68, 84 และ 102 r min⁻¹ ตามภาพที่ Figure 3 โดยทำการทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้งต่อการทดลอง ซึ่งผลการทดสอบ แสดงไว้ในตารางที่ Table 1 และ Table 2 จากวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนปริมาณฟางและตอซังข้าวที่ความเร็วรอบชุดเกลียวดูดลำเลียงระดับต่าง ๆ พบว่าที่ความเร็วรอบของชุดเกลียวดูดลำเลียงที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณฟางและตอซังข้าวที่ตัดสับได้และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ความเร็วรอบการหมุนของชุดเกลียวดูดลำเลียงในอัตราความเร็วรอบที่ 68 r min⁻¹ สามารถสับย่อยฟางและตอซังได้ในปริมาณเฉลี่ย 145.20 kg hr⁻¹ ปริมาณการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ต้นกำลังเท่ากับ 780 ml hr⁻¹ หรือ 13.00 ml min⁻¹ ขนาดความยาวเฉลี่ย 20-50 mm ตามภาพที่ Figure 4 (1) ส่วนความเร็วรอบการหมุนของชุดเกลียวดูดลำเลียงในอัตราความเร็วรอบที่ 84 r min⁻¹ สามารถสับย่อยฟางและตอซังได้ในปริมาณเฉลี่ย 265.20 kg hr⁻¹ การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ต้นกำลังเท่ากับ 888 ml hr⁻¹ หรือ 14.80 ml min⁻¹ ขนาดความยาวเฉลี่ย 50-60 mm ตามภาพที่ Figure 4 (2) และที่ความเร็วรอบการหมุนของชุดเกลียวดูดลำเลียงในอัตราความเร็วรอบที่

102 r min⁻¹ สามารถสับย่อยฟางและตอซังได้ในปริมาณเฉลี่ย 450.00 kg hr⁻¹ การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ต้นกำลังเท่ากับ 972 ml hr⁻¹ หรือ 16.20 ml min⁻¹ ขนาดความยาวเฉลี่ย 80-100 mm ตามภาพที่ Figure 4 (3) ซึ่งเป็น

2.2 สมรรถนะการทำงานสูงสุดของเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง

ผลจากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าสมรรถนะการทำงานของเทคโนโลยีเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง ที่ใช้การลากจูงด้วยรถแทรกเตอร์คูโบต้ารุ่น L3608 ด้วยความเร็วคงที่ 20 km hr⁻¹ (เกียร์ Low) โดยเครื่องยนต์ต้นกำลังที่ใช้สำหรับหมุนชุดโครงใบมีดที่ใช้ตัดสับฟางและตอซังทำงานในรอบคงที่ 2,000 r min⁻¹ ความเร็วรอบของชุดโครงใบมีด 1,800 r min⁻¹ ซึ่งเป็นความเร็วรอบสูงสุด และใช้ความเร็วรอบสูงสุดของชุดเกียร์ชุดล่างในอัตรา 102 r min⁻¹ ปฏิบัติงานตัดสับฟางและตอซังในพื้นที่ขนาด 1 rai (1,600 m²) ในระยะเวลา 1 hr พบว่าสามารถตัดสับฟางและตอซังได้เป็นพื้นที่ 840 m² หรือเทียบได้เท่ากับ 0.5 rai ซึ่งเท่ากับว่าเครื่องตัดสับฟางและตอซังต้องใช้เวลาในการปฏิบัติงานเป็นระยะเวลา 2 hr จึงจะสามารถตัดสับฟางและตอซังในพื้นที่ 1 rai ได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าสมรรถนะการทำงานสูงสุดของเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงมีค่าเท่ากับ 0.5 rai hr⁻¹ คิดเป็น 4 rai day⁻¹ (เวลาปฏิบัติงาน 8 hr day⁻¹)



Figure 2 Measurement of the amount of straw and stubble cutting at different rotational speeds of the suction screw unit.



Figure 3 Suction screw set for transporting straw and stubble to be cut and chopped.



(1) Rotational speed 68 r min⁻¹ (2) Rotational speed 84 r min⁻¹



(3) Rotational speed 102 r min⁻¹

Figure 4 Lengths of straw and stubble cut by rotating the suction screw unit at different speeds.

Table 1 Production capacity and fuel consumption at different conditions.

Revolution		Replicate					Average
		1	2	3	4	5	
68 rpm	Capacity (kg hr ⁻¹)	150	144	138	150	144	145.2
	Oil (ml min ⁻¹)	12	13	14	13	13	13
84 rpm	Capacity (kg hr ⁻¹)	270	258	264	270	264	265.2
	Oil (ml min ⁻¹)	14	14	15	16	15	14.8
102 rpm	Capacity (kg hr ⁻¹)	450	450	456	444	450	450.0
	Oil (ml min ⁻¹)	17	16	15	17	16	16.2

Table 2 Analysis of variances of production capacity and fuel consumption.

Revolution	Capacity (kg hr ⁻¹)	Oil (ml min ⁻¹)
68 rpm	145.20 ± 5.02 ^a	13.00 ± 0.71 ^a
84 rpm	265.20 ± 5.02 ^b	14.80 ± 0.83 ^b
102 rpm	450.00 ± 4.24 ^c	16.20 ± 0.83 ^c
F-test	**	**
%cv	45.27	10.52

Note: a,b,c = significant (p < 0.05) by independent sample t-test, ns = not significant

3 ผลและวิจารณ์

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง ใช้หลักการของ Hunt (1976) เมื่อคิดค่าเสื่อมราคาเป็นแบบเส้นตรง (Straight-Line Method) โดยคำนวณหาต้นทุนการใช้งาน จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนเมื่อมีการนำไปใช้เพื่อการจัดการฟางและตอซังหลังการเก็บเกี่ยว จากสมการคำนวณต้นทุน ดังนี้

$$Ac = (Fc/A) + (1/Ct) [R\&M+F+O+Lo+L1] \quad (1)$$

$$Fc = D + I \quad (2)$$

$$D = (P-S)/N \quad (3)$$

$$I = [(P+S)/2] (r/100) \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้

Ac = ต้นทุนการใช้งานเครื่องจักร Baht rai⁻¹

Fc = ต้นทุนคงที่ Baht year⁻¹

A = พื้นที่การใช้งานใน 1 ปี Rai

Ct = ประสิทธิภาพของเครื่องจักร Rai hr⁻¹

D = ค่าเสื่อมราคา Baht year⁻¹

I = ดอกเบี้ย Baht year⁻¹

สมการคำนวณระยะเวลาคืนทุนในการใช้งานเทคโนโลยีเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง โดยให้ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period, PBP) คือ ช่วงระยะเวลาจากการเริ่มลงทุนถึงเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิ (Net Benefits) ของการดำเนินงานมีค่าเท่ากับการลงทุน

$$PBP = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน}}{\text{ผลประโยชน์สุทธิ - ต้นทุนแปรผัน}} \quad (5)$$

3.1 การคำนวณหาต้นทุนการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง

ราคาเครื่อง (P) = 120,000 Baht

อายุการใช้งาน (N) = 10 Year

มูลค่าซาก (S) = 0 Baht

อัตราดอกเบี้ย (r) = 4.5% year⁻¹

(อ้างอิงจากธนาคาร SME Bank ประเภทสินเชื่อดอกเบี้ยต่ำสำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม: 2567)

ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา (R&M) = 1.2% ของราคาเครื่อง/100 hr = 0.012x120,000/100 = 14.40 Baht hr⁻¹

ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถแทรกเตอร์ (F₁) = ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 2 l rai⁻¹ ราคาเฉลี่ย 30 Baht เท่ากับ 60 Baht rai⁻¹ (ทำงาน 4 rai day⁻¹) เท่ากับ 8 l day⁻¹ หรือ 1.0 l hr⁻¹ คิดเป็น 30 Baht hr⁻¹ หรือ 240 Baht day⁻¹

ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ (F₂) = ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 972 ml hr⁻¹ หรือ 0.972 l hr⁻¹ ราคาเฉลี่ย 30 Baht (ทำงาน 8 hr day⁻¹) ใช้น้ำมันเท่ากับ 7.77 l day⁻¹ หรือ 0.972x30 = 29.16 Baht hr⁻¹ หรือ 233 Baht day⁻¹

ค่าน้ำมันหล่อลื่น (O) = 10% ของราคาน้ำมันเชื้อเพลิง

$$= 0.1 \times 59.1$$

$$= 5.91 \text{ Baht hr}^{-1}$$

ค่าแรงงานคนขับ(Lo) = 300 Baht day⁻¹ หรือชั่วโมงละ 37.5 Baht hr⁻¹ (เวลาทำงาน 8 hr day⁻¹)

ค่าแรงงานผู้ช่วย(L1) = 0 Baht day⁻¹ (ไม่ใช้ผู้ช่วย)

ประสิทธิภาพการทำงาน (Ct) = 4 Rai day⁻¹ หรือ 0.5 Rai hr⁻¹

จากสมการที่ 3 D = (P-S)/N

$$= (120,000-0)/10$$

$$= 12,000 \text{ Baht year}^{-1}$$

จากสมการที่ 4 I = [(P+S)/2](r/100)

$$= [(120,000+0)/2](4.5/100)$$

$$= 2,700 \text{ Baht year}^{-1}$$

แทนค่า D และ I ในสมการที่ 2 Fc = D + I

$$= 12,000+2,700$$

$$= 14,700 \text{ Baht year}^{-1}$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ในสมการที่ 1

$$Ac = (Fc/A) + (1/Ct) [R\&M + F + O + Lo + L1]$$

$$= (14,700/A) + (1/0.5)[14.40+59.1+5.91+37.5+0]$$

$$= (14,700/A) + 2[116.91]$$

$$= (14,700/A) + 233.82$$

การคำนวณหาค่าต้นทุนของการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง (Ac) ทำได้โดยการแทนค่าพื้นที่การใช้งานเครื่องต่อปี (A) โดยผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบกับกรณีรถแทรกเตอร์ที่มีอัตราค่าจ้างในราคา 350 Baht rai⁻¹

3.2 การคำนวณหาจุดคุ้มทุนการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง

การคำนวณหาจุดคุ้มทุนการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง สามารถคำนวณด้วยการแทนค่าต้นทุนการไถกลบฟางและตอซังหลังการเก็บเกี่ยวด้วยการใช้รถแทรกเตอร์ที่มีอัตราค่าจ้างในราคา 350 Baht rai⁻¹ แล้วจึงคำนวณค่า (A) ออกมาได้ดังนี้

$$Ac = (14,700/A) + 233.82$$

$$350 = (14,700/A) + 233.82$$

$$A = 14,700 / (350 - 233.82)$$

$$= 14,700 / 116.18$$

$$= 126.52 \text{ Rai year}^{-1} \text{ หรือ } 127 \text{ Rai year}^{-1}$$

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าจุดคุ้มทุนของการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงมีค่าเท่ากับ 127 Rai year⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีรถแทรกเตอร์และตอซังหลังการเก็บเกี่ยวด้วยรถแทรกเตอร์

3.3 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period, PBP)

การใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง

สามารถคำนวณด้วยการแทนค่าจากจำนวนเงินลงทุนในส่วนของค่าเครื่องจักรที่มีราคา 120,000 Baht จากนั้นจึงทำการคำนวณตามสมการเพื่อหาระยะเวลาคืนทุน ดังนี้

$$1. \text{ เงินลงทุน (ค่าเครื่องฯ)} = 120,000 \text{ Baht}$$

2. ผลตอบแทนจากการใช้งานเฉลี่ยต่อปี โดยกำหนดให้มีการใช้งานในช่วงระยะเวลาในการทำงาน 2 month year⁻¹ (กำหนดตามช่วงฤดูการทำนาปีละ 2 ครั้ง)

3. อัตราการทำงานของเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงมีสมรรถนะการทำงานเฉลี่ย 4 Rai day⁻¹ หรือคิดเป็น 0.5 Rai hr⁻¹ (ทำงานวันละ 8 hr day⁻¹, เดือนละ 20 day, ปีละ 2 month)

4. อัตราค่าจ้างเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง ราคา 400 Baht rai⁻¹ สามารถทำงานได้ $4 \times 20 = 80$ Rai month⁻¹

5. อัตราผลตอบแทน (รายได้) $80 \times 400 = 32,000$ Baht month⁻¹ เมื่อครบระยะเวลา 2 month จะทำให้มีรายได้ $32,000 \times 2 = 64,000$ Baht year⁻¹

6. การคำนวณหาต้นทุนการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง (ต้นทุนแปรผัน month⁻¹) ประกอบด้วย

6.1 ค่าดอกเบี้ย 4.5% year⁻¹ = 225 Baht

6.2 ค่าบำรุงรักษา 1.2% = 2,304 Baht

6.3 ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง = 9,460 Baht

6.4 ค่าน้ำมันหล่อลื่น 10% = 946 Baht

6.5 ค่าแรงงานคนขับ = 6,000 Baht

6.6 ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด (100 Baht day⁻¹) = 2,000 Baht

ดังนั้นต้นทุนค่าใช้จ่ายในการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงจึงคิดเป็น 20,935 Baht month⁻¹

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \frac{120,000}{32,000 - 20,935} \\ &= 10.84 \text{ month} \end{aligned}$$

จากผลของการศึกษาถึงต้นทุนในการใช้งาน รวมถึงการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนเพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมสำหรับนำไปใช้ในการประกอบการตัดสินใจสำหรับเกษตรกรเมื่อมีการนำเทคโนโลยีเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงไปใช้งานจริงจึงพบว่ามียุทธศาสตร์การคืนทุนเท่ากับ 10.84 month หรือเทียบเท่าเป็นระยะเวลา 5 years 25 days จะทำให้เกษตรกรสามารถถึงจุดคุ้มทุนเมื่อเทียบกับเงินลงทุนค่าเครื่องจักรที่มีราคา 120,000 Baht (โดยเทียบกับช่วงระยะเวลาที่มีการใช้งานเพียง 2 month year⁻¹ ตามช่วงฤดูกาลทำนาปีละ 2 ครั้ง) ทั้งนี้ปัจจัยหลักที่อาจจะมีผลต่อระยะเวลาคืนทุนของการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง คือ ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง อัตราค่าจ้างค่าเดินทาง และประสิทธิภาพในการทำงานที่ต้องใช้เวลาในการเก็บฟางและตัดตอซังเพื่อนำไปสับย่อยเป็นระยะเวลาประมาณ 2 hr ถึงจะสามารถตัดสับฟางและตอซังได้ในพื้นที่ 1 Rai (กรณีฟางลอยหนาและตอซังสูง) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อระยะเวลาคืนทุนในการใช้งานเครื่องจักร ดังนั้นหากมีการผันแปรของต้นทุนค่าใช้จ่ายในการใช้งานเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงจากปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากปัจจัยหลักไม่

มากนักก็จะไม่ส่งผลต่อค่าความถูกต้องของระยะเวลาคืนทุนในการใช้งานตามที่ได้คำนวณเอาไว้

4 สรุป

เทคโนโลยีเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูง ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาขึ้นจัดอยู่ในกลุ่มของเครื่องจักรกลการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมสำหรับเกษตรกรทำนาที่ต้องการลดการเผาทำลายหรือเก็บฟางและตอซังออกจากแปลงนาหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อนำฟางและตอซังในแปลงนามาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงบำรุงดินเพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารพืชเพื่อช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและลดต้นทุนการทำนาได้ในอนาคต ผลจากการทดสอบสมรรถนะการทำงาน พบว่าเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงมีสมรรถนะการทำงานสูงสุดเท่ากับ 0.5 rai hr⁻¹ หรือเท่ากับ 4 rai day⁻¹ (ปฏิบัติงาน 8 hr day⁻¹) โดยใช้เงื่อนไขการใช้งานที่เหมาะสมด้วยการลากจูงโดยรถแทรกเตอร์คูโบต้ารุ่น L3608 ความเร็วคงที่ 20 km hr⁻¹ (เกียร์ Low) ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต้นกำลังที่ใช้สำหรับหมุนชุดโครงใบมีดทำงานในรอบคงที่ 2,000 r min⁻¹ ความเร็วรอบของชุดโครงใบมีดที่ใช้ตัดสับฟางและตอซัง 1,800 r min⁻¹ การหมุนของชุดเกลียวดูดฟางและตอซังเข้าไปหาชุดโครงใบมีดในอัตราความเร็ว 102 r min⁻¹ สามารถสับย่อยฟางและตอซังได้ในปริมาณเฉลี่ย 450.00 kg hr⁻¹ มีปริมาณการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ต้นกำลังเท่ากับ 972 ml hr⁻¹ หรือ 16.20 ml min⁻¹ ขนาดความยาวของฟางและตอซังที่ตัดสับได้เฉลี่ย 80-100 mm ซึ่งเป็นขนาดความยาวที่ทำให้การย่อยสลายได้อย่างเหมาะสม รวมทั้งทำให้การคลุกเคล้าในดินเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เมื่อคำนวณต้นทุนการใช้งานพบว่าจุดคุ้มทุนของการใช้งานมีค่าเท่ากับ 127 Rai year⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบกับกรรการไถกลบฟางและตอซังหลังการเก็บเกี่ยวด้วยรถแทรกเตอร์ ซึ่งเมื่อเกษตรกรที่นำเครื่องตัดสับฟางและตอซังแบบลากจูงไปใช้งานจะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 10.84 month ซึ่งเมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาที่มีการใช้งานเพียง 2 month year⁻¹ ตามช่วงฤดูกาลทำนาปีละ 2 ครั้ง ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลารั้ง 5 years 25 days จึงจะทำให้เกษตรกรสามารถถึงจุดคุ้มทุนเมื่อเทียบกับเงินลงทุนค่าเครื่องจักรที่มีราคา 120,000 Baht

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ที่สนับสนุนงบประมาณที่ใช้เป็นทุนวิจัย และขอขอบคุณนายบัณฑิต มีรอด ประธานกลุ่มเกษตรกรทำนาอินทรีย์ ตำบลไผ่ล้อม อำเภอลับแล จังหวัดอุดรดิตถ์ ที่ให้ใช้พื้นที่สำหรับเก็บข้อมูลซึ่งมีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6 เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มือจัดการตอซัง สร้างดินยั่งยืน พื้นที่
สิ่งแวดล้อม. กรมพัฒนาที่ดินกระทรวงเกษตรและสหกรณ์
ชุดวิวัฒน์ วรรณสาย, ดิเรก อินตาพรม. 2540. ผลของการ
จัดการฟางข้าวต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิต
ข้าว. วารสารเกษตรนเรศวร 3(1), 30-35
- ปณณวิทย์ ทองคำ. 2565. การออกแบบและพัฒนาเครื่องตัด
ฟางข้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
ปทุมธานี: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ไพโรจน์ นะเที่ยง, จันเพ็ญ ชุมแสง, กันต์ อินทวงศ์. 2561.
เครื่องตัดสับสำหรับลดขนาดทางกายภาพของฟางและตอ
ซังข้าวแบบลากจูง. วารสารเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 3(1),
43-48.
- ไพโรจน์ นะเที่ยง. 2563. ประสิทธิภาพการไถกลบฟางและตอ
ซังแบบตัดสับร่วมกับการหมักทางชีวภาพต่อสมบัติทาง
เคมีของดินนาบางประการ. สักทองวารสารวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี 8(1), 31-44.
- ศิริเชษฐ์ กองแก้ว, สิงห์รัฐ ชารี, ประไพพรรณ สิริกุล,
บัณฑิต ทองสร้อย, ฤกษ์ชัย ผลโพธิ์. 2564. การพัฒนาและ
ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดวัชพืชในแปลง
ข้าวโพดหวาน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 27(2), 12-18.
- สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม. 2559. รายงานผล
การศึกษาการใช้ชีวมวลฟางข้าว ใบและยอดอ้อย ลำต้น
ข้าวโพด เพื่อผลิตพลังงานทดแทน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- Butt, S., Quick, G. 1986. Handling straw and chaff
residue at harvest. The reader's digest, Kondinin
and districts farm improvement group. 384-388.
- Gilbertson, G. H., A.C. Knight. 1986. Straw chopping.
Agricultural Eng. 41(4), 120-125.
- Hunt D. 1976. Farm Power and Machine Management.
7th Edition. Iowa State University Press Ames,
Iowa.



การจำลองการตอบสนองของข้าว กข43 ต่อวิธีการปลูกและความอุดมสมบูรณ์ของดินด้วยแบบจำลอง AquaCrop

Modeling RD43 Rice Responses to Planting Methods and Soil Fertility Using Aqua Crop Model

นนท์ธิดา เปล่งวุฒิไกร¹, ณรงค์ศักดิ์ พิมใจใส¹, เอกสิทธิ์ ไชยสิทธิ์กุลชัย^{1*}

Nontida Plengwuttikrai¹, Narongsak Phimchaisai¹, Ekasit Kositsakulchai^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม 73140

¹Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Sean, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140

*Corresponding author: Tel.: +66-(0)3435-1897, E-mail: ekasit.k@ku.th

บทคัดย่อ

การจัดการน้ำและธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพถือเป็นหัวใจสำคัญของการทำนาข้าวให้ได้ผลดี ทั้งนี้ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของข้าว ปริมาณผลผลิต ตลอดจนประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร งานศึกษานี้เป็นการทดลองปลูกข้าวในถังเพื่อศึกษาผลต่อชีวมวล ผลผลิต และการใช้น้ำของข้าวพันธุ์ กข43 จากปัจจัยวิธีการปลูกแบบหว่านน้ำตามและแบบปักดำ และปัจจัยระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินตามปริมาณการใส่ปุ๋ยเคมี 3 ระดับ ประกอบด้วย ปริมาณตามคำแนะนำ ($75.94 \text{ kg N ha}^{-1}$) ครึ่งหนึ่งของคำแนะนำ และไม่ใส่ปุ๋ย และประเมินสมรรถนะแบบจำลอง AquaCrop ในการจำลองการตอบสนองของข้าวต่อความเครียดจากการปรับความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปรับเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลอง AquaCrop โดยใช้ผลการทดลอง ทั้งที่ปรับวิธีการปลูกและระดับการใส่ปุ๋ย จากผลการศึกษา พบว่า ทั้งวิธีการปลูกและระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อชีวมวล ผลผลิต และการใช้น้ำของข้าว แบบจำลอง AquaCrop จำลองวิธีการปลูกและการตอบสนองของข้าวต่อระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยสมรรถนะของแบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ที่ดีกรณีความอุดมสมบูรณ์ของดินสูง แต่แบบจำลองประมาณความเสียหายของผลผลิตต่ำกว่าความเป็นจริงกรณีการขาดธาตุอาหารรุนแรง ผลการศึกษาช่วยให้การใช้งานแบบจำลองในสภาพแวดล้อมของไทยและข้าวสายพันธุ์ไทยน่าเชื่อถือมากขึ้น

คำสำคัญ: ข้าว, ผลผลิต, การใช้น้ำ, ความอุดมสมบูรณ์ของดิน, การจำลองพืช

Abstract

Effective water and nutrient management are crucial for successful rice cultivation, substantially impacting plant growth, yield and resource efficiency. The present study examined the effects of planting methods (direct seeding and transplanting) and fertilizer levels (recommended rate at $75.94 \text{ kg N ha}^{-1}$, half of the recommended rate and no fertilizer) on RD43 rice and evaluated the AquaCrop model's ability to simulate rice responses to soil fertility stress. The model was calibrated using data from pot-based experiments with varying planting methods and fertilizer applications. Results showed that planting methods and soil fertility significantly affected rice biomass, yield and water use. The AquaCrop model effectively simulated planting methods and performed well under high fertility, but underestimated the impact of nutrient deficiency. This study improves the reliability of the AquaCrop model for use with Thai rice cultivars.

Keywords: Rice, Yield, Evapotranspiration, Soil Fertility, Crop modeling

1 บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย โดยเกษตรกรทำนาปลูกข้าวคิดเป็น 65% ของครัวเรือนเกษตรกรทั้งหมด

(Rice Department and Department of Internal Trade, 2019) และมีการใช้ที่ดินในการเกษตรสำหรับนาข้าว 46% ของพื้นที่เกษตรกรรม (68.73 ล้านไร่) (Royal Irrigation Department, 2019) การทำนาปลูกข้าวอาจแตกต่างกันตาม

Received: September 01, 2024

Revised: May 17, 2025

Accepted: May 19, 2025

Available online: June 26, 2025

สภาพพื้นที่ซึ่ง Watanabe (2019) จำแนกเป็น 4 ลักษณะ คือ (1) พื้นที่ลุ่มเขตชลประทาน (irrigated lowland) (2) พื้นที่ลุ่มเกษตรน้ำฝน (rain-fed lowland) (3) พื้นที่น้ำท่วมถึง (flood prone) และ (4) พื้นที่ดอน (upland) พื้นที่นาข้าวของไทยส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ลุ่มเกษตรน้ำฝนซึ่งผลผลิตข้าวผันแปรไปตามสภาพภูมิอากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณน้ำฝน ในการทำนาปลูกข้าว นอกจากการจัดการน้ำที่เหมาะสมแล้ว ยังต้องมีการจัดการธาตุอาหารให้มีความสัมพันธ์กับความอุดมสมบูรณ์ของดินเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีทั้งปริมาณและคุณภาพ

ในปัจจุบัน คนไทยมีความใส่ใจดูแลสุขภาพมากขึ้น การเลือกรับประทานอาหารโดยเฉพาะประเภทคาร์โบไฮเดรต จึงเป็นสิ่งจำเป็น (Thadamatakul et al., 2021) ข้าวพันธุ์ กข43 เป็นทางเลือกของกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการคุมน้ำหนักและผู้ป่วยเบาหวาน ข้าวพันธุ์นี้เป็นลูกผสมระหว่างข้าวเจ้าหอมสุพรรณบุรีกับข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มีลักษณะเด่น คือ อายุการเก็บเกี่ยวสั้น (95 วัน) ไม่ไวต่อช่วงแสง และต้านทานปานกลางต่อโรคใบไหม้และเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล (Nagprachaya et al., 2017) มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ถูกย่อยเร็ว (rapidly available glucose) ต่ำ ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index) ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำ (Vasusans et al., 2017) ถึงแม้ว่า ข้าวพันธุ์ กข43 เป็นทางเลือกที่น่าสนใจของเกษตรกร แต่ข้าวสายพันธุ์นี้ยังค่อนข้างใหม่ มีรายงานการศึกษาจำกัดโดยเฉพาะด้านการจัดการน้ำและธาตุอาหาร รวมถึงการประเมินสมรรถนะสำหรับการจำลองการปลูกพืช

การจำลองการปลูกพืชด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของพืชกับปัจจัยแวดล้อมทั้งดิน น้ำ และภูมิอากาศ ผลการจำลองสถานการณ์เป็นข้อมูลสำคัญที่ช่วยลดความเสี่ยงในการตัดสินใจการผลิตทางการเกษตร โดยสามารถทดสอบฉากทัศน์เพื่อการปรับการจัดการเพาะปลูกตามปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจเปลี่ยนแปลงไปในอนาคต (Phimchaisai and Kositsakulchai, 2023) ในประเทศไทย มีการศึกษาและประยุกต์แบบจำลองการปลูกพืชมานานกว่า 30 ปี (Kositsakulchai et al., 2007) มีรายงานการใช้งานแบบจำลองพืชสำหรับข้าวหลายแบบจำลอง อาทิ DSSAT (Pannangpetch et al., 1991; Mankeb, 1993; Marled and Kositsakulchai, 2021), ORYZA (Wikarmpapraharn and Kositsakulchai, 2010), SWAP (Kositsakulchai et al., 2007), SWAT (Phimchaisai and Kositsakulchai, 2023), SWAT+ (Kakarndee and Kositsakulchai, 2020, 2023)

แบบจำลอง AquaCrop เป็นอีกแบบจำลองหนึ่งที่สามารถจำลองการเติบโตพืชและผลผลิตที่ตอบสนองต่อการใช้น้ำ (Steduto et al., 2009) แบบจำลองนี้พัฒนาและเผยแพร่โดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ หรือ FAO (Raes et al., 2009) ทั้งนี้ Steduto et al. (2012) ได้แนะนำให้ใช้ในการประเมินผลผลิตที่ตอบสนองต่อน้ำทดแทนวิธีการดั้งเดิมที่เสนอโดย Doorenbos and Kassam (1979) แบบจำลองนี้มี

ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ที่ใช้งานง่าย ต้องการข้อมูลพื้นฐานไม่มากแต่สามารถจำลองผลได้อย่างน่าเชื่อถือ (Hsiao et al., 2009) ถึงแม้ว่า แบบจำลอง AquaCrop ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นและมีรายงานการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์และทดสอบการตอบสนองของผลผลิตต่อน้ำและธาตุอาหาร (Amiri et al., 2014; Amiri, 2016; Akumaga et al., 2017) เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ค่อนข้างใหม่จึงมีรายงานการศึกษาภายใต้สภาพแวดล้อมในประเทศไทยไม่มากนักและยังไม่พบรายงานการเปรียบเทียบพารามิเตอร์พืชของพันธุ์ข้าวไทย (Plengwuttikrai and Kositsakulchai, 2020)

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินสมรรถนะของแบบจำลอง AquaCrop ในการจำลองการตอบสนองของข้าวพันธุ์ กข43 ต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลการปลูกข้าวทดลองในถังด้วยวิธีปลูกแบบหว่านน้ำตามและแบบปักดำ ในสภาพความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ต่างกันจากปริมาณการใส่ปุ๋ยเคมี

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การปลูกข้าวทดลอง

สถานที่: การปลูกข้าวทดลองนี้ ดำเนินการที่แปลงทดลองภาคีวิศกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม (latitude 14°02'12.40 N, longitude 99°57'41.90" E) (Figure 1)

แผนการทดลองและปัจจัยที่ศึกษา: วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยจัดทรีตเมนต์แบบแฟคทอเรียล 2x3 (2x3 Factorial in CRD) ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษาดังนี้:

1. ปัจจัยวิธีการปลูก (planting methods): มี 2 วิธี ได้แก่ การหว่านน้ำตาม (wet direct sowing: WS) และ การปักดำ (transplanting: TP)

2. ปัจจัยระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน (soil fertility levels): กำหนดโดยการใส่ปุ๋ยเคมี 3 ระดับ ดังนี้:

- N1 (อัตราแนะนำ): ใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture, 2004) แบ่งใส่ 2 ครั้ง ดังนี้ ครั้งที่ 1 (20 วันหลังปลูก–20 days after planting, DAP20): ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 35 kg rai^{-1} (เทียบเท่า 1.72 g pot^{-1} หรือ 218.75 kg ha^{-1}) ครั้งที่ 2 (40 วันหลังปลูก–DAP40): ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 อัตรา 15 kg rai^{-1} (เทียบเท่า 0.74 g pot^{-1} หรือ 93.75 kg ha^{-1}) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ข้าวได้รับในระดับ N1 คือ 75.94 kg N ha^{-1} (คำนวณจาก $(0.15 \times 218.75) + (0.46 \times 93.75)$)

- N2 (ครึ่งอัตราแนะนำ): ใส่ปุ๋ยในลักษณะเดียวกับ N1 (แบ่งใส่ 2 ครั้งตามช่วงเวลาเดียวกัน) แต่ใช้อัตราส่วนผสมของปุ๋ยแต่ละครั้งเพียง 50% ของอัตราแนะนำ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ข้าวได้รับในระดับ N2 คือ 38.13 kg N ha^{-1}

- N3 (ไม่ใส่ปุ๋ย): ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีตลอดการทดลอง

จำนวนซ้ำและหน่วยทดลอง: แต่ละทรีตเมนต์ผสม (combination of factor levels) มีจำนวน 3 ซ้ำ (replications) ต่อหนึ่งชุดการทดลอง การทดลองนี้ดำเนินการจำนวน 2 ชุดการทดลองพร้อมกัน โดยแต่ละชุดการทดลองประกอบด้วย 18 หน่วยทดลอง (ถังปลูก) (คำนวณจาก 2 วิธีปลูก $\times$ 3 ระดับปุ๋ย $\times$ 3 ซ้ำ = 18 ถังต่อชุด) ดังนั้น จึงมีหน่วยทดลองรวมทั้งสิ้น 36 ถังปลูก ตลอดการทดลอง (18 ถังต่อชุด $\times$ 2 ชุดการทดลอง)

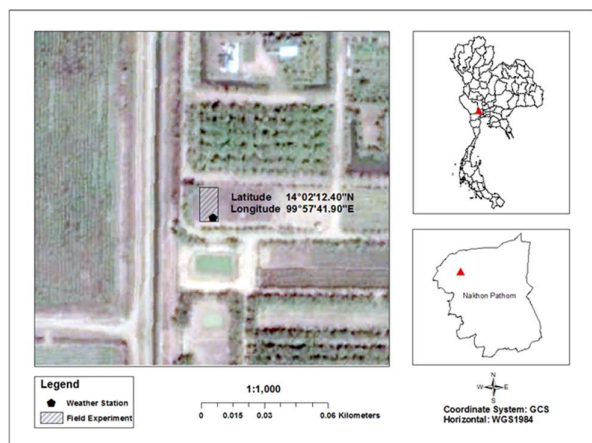


Figure 1 Location of experimental field at Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom.

การจัดการปลูกข้าวในหน่วยทดลอง: การทดลองนี้ใช้ข้าวพันธุ์ กข43 ซึ่งปลูกในถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยม (ขนาดกว้าง 28 cm, ยาว 28 cm และสูง 35 cm) โดยแต่ละถังบรรจุดินที่ใช้ในการทดลองให้มีความสูงจากก้นถัง 20 cm ตลอดระยะเวลาการทดลอง ได้มีการควบคุมและรักษาระดับน้ำขังให้มีความสูงคงที่ประมาณ 5 cm เหนือผิวดิน เพื่อให้มั่นใจว่าต้นข้าวไม่ประสบภาวะขาดน้ำ

การดำเนินการปลูกมีรายละเอียด ดังนี้ วิธีการหว่านน้ำตม (WS) เริ่มโดยทำการหว่านเมล็ดพันธุ์ข้าว กข43 โดยตรงลงในถังทดลองในวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2562 ส่วน วิธีการปักดำ (TP) เริ่มโดยทำการเพาะเมล็ดพันธุ์ข้าว กข43 เพื่อเตรียมต้นกล้าในแปลงอนุบาลในวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2562 หลังจากนั้นเมื่อต้นกล้ามีอายุครบ 20 วัน จึงย้ายต้นกล้ามาปักดำลงในถังทดลอง

การเก็บเกี่ยวผลผลิตของข้าวทั้งสองวิธีการปลูก ได้ดำเนินการพร้อมกันในวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2562

การเก็บรวบรวมข้อมูล: ในการทดลองได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลในด้านต่างๆ ดังนี้:

1. ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ตรวจวัดอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ (automatic weather station) ซึ่ง

ติดตั้งอยู่ ณ บริเวณแปลงทดลองตลอดช่วงการปลูก (เดือน พฤษภาคม-ตุลาคม พ.ศ.2562) (ดังแสดงใน Figure 2) ข้อมูลที่บันทึกประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝนรายวัน อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดประจำวัน ความเร็วลมเฉลี่ย ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย

2. ข้อมูลสมบัติของดิน ได้จากการเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ปลูกข้าวในถังทดลองเพื่อนำส่งวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี ณ ห้องปฏิบัติการปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประกอบด้วย

- สัดส่วนอนุภาคดิน (particle fraction): ประกอบด้วยทราย : ทรายแป้ง : ดินเหนียว ในสัดส่วน 84% : 14.9% : 0.3%

- ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density): 1.94 g cm^{-3}

- สมบัติของน้ำในดิน (soil water properties) ได้แก่ ค่าการนำน้ำของดินในสภาพอิ่มตัว (saturated hydraulic conductivity: Ksat), ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร (volumetric water content: VWC) ที่จุดอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation: SAT), ที่ความชื้นชลประทาน (field capacity: FC), และที่จุดเหี่ยวเฉาถาวร (permanent wilting point: PWP)

3. ข้อมูลปริมาณน้ำและการใช้น้ำของข้าว มีการบันทึกข้อมูลทุกวันเวลา 7.00 น. ประกอบด้วย ปริมาณน้ำชลประทานที่ให้ (irrigation water applied) ซึ่งบันทึกปริมาณน้ำที่เติมลงในแต่ละถังทดลองเพื่อควบคุมและรักษาระดับน้ำขังให้มีความสูงคงที่ประมาณ 5 cm เหนือผิวดิน และการใช้น้ำของข้าว (rice consumptive use of water) ประเมินเป็นรายวันจากระดับน้ำที่ลดลงในแต่ละถังก่อนที่จะมีการเติมน้ำกลับสู่ระดับที่กำหนด โดยถือว่าปริมาณน้ำที่ลดลงนี้ คือ ปริมาณการใช้น้ำของข้าว (rice evapotranspiration) ในแต่ละวัน เนื่องจากการทดลองได้ดำเนินการในถังปลูกจึงไม่มีการสูญเสียน้ำจากการซึมลงดิน

4. ข้อมูลพัฒนาการของข้าวได้จากการสังเกตและบันทึกระยะพัฒนาการที่สำคัญต่าง ๆ ของข้าว โดยนับจากวันเริ่มปลูก (day after planting: DAP) ได้แก่ ระยะงอก (emergence), ระยะกำเนิดช่อดอก (panicle initiation), ระยะออกดอก (anthesis) และระยะสุกแก่ทางสรีระวิทยา (physiological maturity)

5. ข้อมูลชีวมวลและผลผลิต ดำเนินการเมื่อข้าวสุกแก่ทางสรีระวิทยา จึงได้เก็บตัวอย่างของส่วนเหนือดินทั้งหมด จากนั้นนำมาแยกองค์ประกอบออกเป็น ส่วนใบ ลำต้น และรวง ทำการชั่งน้ำหนักสดของแต่ละองค์ประกอบ แล้วนำไปอบในตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 75°C เป็นเวลา 48 hr (Suwanwong, 2004) เพื่อวิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของผลผลิต (dry-grain yield) และน้ำหนักแห้งของชีวมวลส่วนเหนือดิน (dry above-ground biomass)

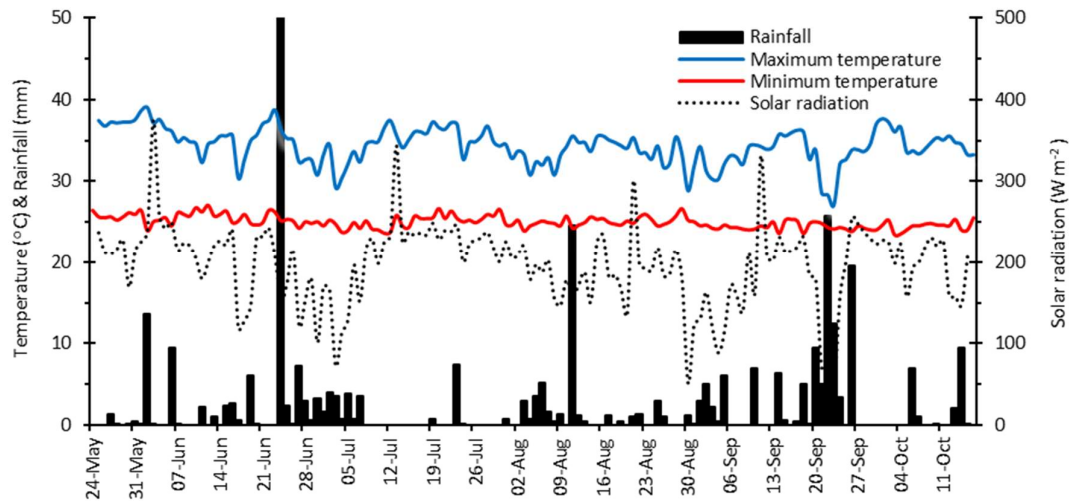


Figure 2 Daily meteorological data at the experimental field (May 24, 2019–October 15, 2019).

2.2 การเตรียมแบบจำลอง AquaCrop

การศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลอง AquaCrop version 7.0 เพื่อจำลองการเติบโตและการตอบสนองของข้าวพันธุ์ กข43 ต่อปัจจัยต่าง ๆ การเตรียมข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลองประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ดังนี้

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (Section Climate) ประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน (rainfall–ไฟล์.PLU) และ อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุด (minimum and maximum temperature–ไฟล์.Tnx) ใช้ข้อมูลรายวันจากเครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติที่ติดตั้ง ณ แปลงทดลอง ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิง (reference evapotranspiration–ไฟล์.ETo) คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) จากข้อมูลที่ตรวจวัดจากเครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศใช้ไฟล์ข้อมูลมาตรฐานที่มาพร้อมแบบจำลอง AquaCrop (GlobalAverage.CO2)

ข้อมูลพืช (Section Crop) ใช้ไฟล์พารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับข้าวนาสวน (lowland หรือ paddy rice) ของ AquaCrop (PaddyRiceGDD.CRO) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์พืชสำหรับจำลองการเติบโตและพัฒนาการพืชด้วยหน่วยอุณหภูมิสะสม (Growing Degree Day: GDD หรือ Heat Unit) การปรับพารามิเตอร์พืชได้ปรับพารามิเตอร์บางส่วนได้รับการปรับค่าเบื้องต้นเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของข้าวพันธุ์ กข43 และสภาพการปลูกจากการทดลอง ได้แก่ ความหนาแน่นของต้นข้าว (Plant density = 382 plants m⁻² กำหนดจาก 30 ต้นต่อถึงขนาด 784 cm²) ขนาดพื้นที่ใบปกคลุมดินเริ่มต้น (initial canopy cover: CCo, WS=1 cm²/plant, TP=2.5 cm²/plant)

ข้อมูลดิน (Section Soil) กำหนดให้เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย โดยอ้างอิงจากไฟล์ SandLoam.SOL ชั้นดินในแบบจำลองมี 2 layers ดังนี้ ดินชั้นบนหนา 0.20 m (PWP=20.0%, FC=37.0%, SAT=48.3%, Ksat=1466.4 mm day⁻¹) และดิน

ชั้นล่างหนา 0.01 m (สมบัติของน้ำในดินชั้นล่างส่วนใหญ่เหมือนกับดินชั้นบน แต่กำหนดให้ค่า Ksat=0 mm day⁻¹ เพื่อจำลองสภาวะถ่วงกันที่ที่ไม่มีการซึมลึกลงดิน (deep percolation))

ข้อมูลการจัดการเพาะปลูก (Section Management) ประกอบด้วย

- การจัดการน้ำในแปลง (Field Management) กำหนดความสูงคันนา (Bund height) ไว้ที่ 0.15 m (15 cm) ซึ่งสอดคล้องกับความสูงของขอบคันนาที่เหลือน้ำระดับผิวดิน

- การจัดการชลประทาน (Irrigation Management) ใช้วิธีการให้น้ำแบบคงที่ปริมาณ 50 mm ทุกครั้งเมื่อระดับน้ำในถังลดลงจนเหลือความลึกน้ำข้างเหนือผิวดินเพียง 10 mm โดยใช้เกณฑ์นี้ตลอดช่วงการเพาะปลูก

- การจัดการความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Fertility Management) กำหนดเพื่อให้แบบจำลองสามารถจำลองการตอบสนองของข้าวต่อระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่แตกต่างกัน (N1, N2, N3) จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบระดับความเครียดจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Soil fertility stress levels) ใน AquaCrop ให้สอดคล้องกับปริมาณไนโตรเจนที่ให้ในแต่ละทรีตเมนต์ปุ๋ยในการทดลองจริง

2.3 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์และการจำลองการผลิตข้าว

กระบวนการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลองดำเนินการเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังนี้:

1. การประมาณค่าชีวมวลเต็มศักยภาพ (potential biomass: BMx) จากการจำลองการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ กข 43 ในสภาวะสมบูรณ์แบบที่พืชไม่มีความเครียดจากปัจจัยแวดล้อมใดๆ (non-stressed conditions) เพื่อประมาณค่าชีวมวลสูงสุดที่พืชสามารถผลิตได้ (BMx) สำหรับวิธีการหว่านน้ำตม (WS) ผลการจำลองให้ค่า BMx=15,131 kg ha⁻¹ สำหรับวิธีการปักดำ (TP) ผลการจำลองให้ค่า BMx=16,139 kg ha⁻¹

2. การคำนวณสัดส่วนชีวมวลสัมพัทธ์และการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน เริ่มจากการนำข้อมูลน้ำหนักชีวมวลแห้งเหนือดินที่ได้จากการทดลองของแต่ละทรีตเมนต์ (N1, N2, N3) มาคำนวณค่าสัดส่วนชีวมวลสัมพัทธ์ (relative biomass) โดยเปรียบเทียบกับค่า BMx ของแต่ละวิธีการปลูก ซึ่งได้ผลดังนี้

- วิธี WS: N1=49%, N2=30%, N3=12% (เทียบกับ BMx ของ WS)

- วิธี TP: N1=38%, N2=25%, N3=11% (เทียบกับ BMx ของ TP)

จากนั้น ทำการปรับแก้พารามิเตอร์ในแบบจำลอง AquaCrop ที่ควบคุมการตอบสนองของพืชต่อความเครียดจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน (soil fertility stress response) โดยใช้ค่าสัดส่วนชีวมวลสัมพัทธ์ของทรีตเมนต์ N3 (กลุ่มที่ไม่ใส่ปุ๋ย) ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด เป็นจุดอ้างอิงสำหรับสภาวะความเครียด (หรือเป็นฐานล่างของกราฟการตอบสนอง) (Figure 3)

3. การจำลองสถานการณ์ทั้งหมดและการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง ดำเนินการหลังจากปรับเทียบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความอุดมสมบูรณ์ของดินเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการจำลองการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวสำหรับทุกทรีตเมนต์ผสม (กล่าวคือ ทั้ง 2 วิธีการปลูก $\times$ 3 ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน) นำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง (เช่น ผลผลิตข้าวเปลือกแห้ง, ชีวมวลเหนือดินทั้งหมด) มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์กับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริงจากการทดลอง โดยมุ่งเน้นการประเมินความแม่นยำในการทำนายผลผลิตเป็นสำคัญในลำดับแรก

4. ลักษณะของกระบวนการปรับเทียบเป็นการดำเนินการแบบปรับแก้ด้วยตนเองและทำซ้ำหลายครั้ง (manual and iterative process) จนกว่าผลการจำลองจะมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองในระดับที่น่าพอใจ เนื่องจากในปัจจุบันแบบจำลอง AquaCrop ยังไม่มีกลไกหรือเครื่องมือสำหรับการปรับเทียบพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ (automated calibration tools)

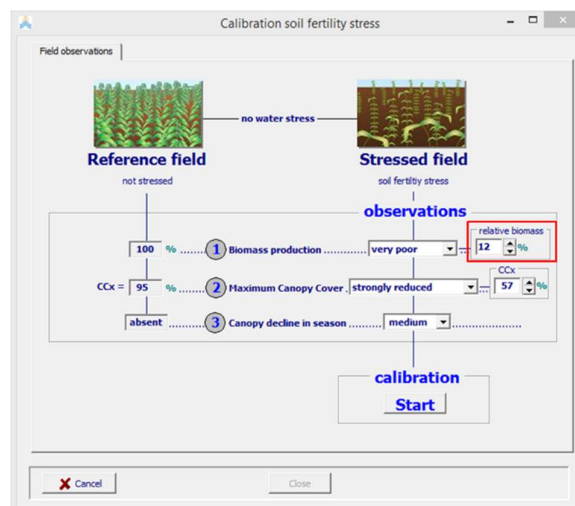


Figure 3 Calibration of AquaCrop parameters in response to soil fertility stress.

3 ผลและวิจารณ์

3.1 การปลูกทดลองข้าว กข43

การทดลองนี้เป็นการศึกษาแบบสองปัจจัยเพื่อศึกษาผลของวิธีการปลูก (การหว่านน้ำตม [WS] และ การปักดำ [TP]) และระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน (N1, N2, N3) ต่อปริมาณชีวมวลส่วนเหนือดิน (above-ground biomass) ผลผลิตเมล็ดข้าวเปลือกแห้ง (dry grain yield) และปริมาณการใช้น้ำ (evapotranspiration [ET]) ของข้าวพันธุ์ กข43 (Table 1)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) (Kutner et al., 2005) โดยใช้โปรแกรม R (R Core Team, 2024) แสดงให้เห็นว่า ทั้งวิธีการปลูกและความอุดมสมบูรณ์ของดินมีผลต่อชีวมวลอย่างมีนัยสำคัญ ($F(1, 30) = 10.98, p < 0.01$; $F(2, 30) = 216.68, p < 0.01$ ตามลำดับ) ชีวมวลเฉลี่ยของการปลูกแบบหว่านน้ำตมสูงกว่าการปักดำอย่างมีนัยสำคัญ (WS (50.16 g pot^{-1}) > TP (45.15 g pot^{-1}), $p < 0.01$) ส่วนความอุดมสมบูรณ์ของดินมีผลต่อชีวมวลอย่างมีนัยสำคัญ ($N1 (60.29 \text{ g pot}^{-1}) > N2 (36.00 \text{ g pot}^{-1}) > N3 (14.81 \text{ g pot}^{-1})$, $p < 0.01$) ปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างสองปัจจัยนี้บ่งชี้ว่าผลของความอุดมสมบูรณ์ต่อชีวมวลนั้นแตกต่างกันไปตามวิธีการปลูก ($F(2, 30) = 3.52, p < 0.05$)

สำหรับผลผลิต พบว่า ทั้งสองปัจจัยมีผลต่อผลผลิตข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($F(1, 30) = 6.44, p < 0.05$ และ $F(2, 30) = 97.27, p < 0.01$ ตามลำดับ) วิธีปลูกแบบหว่านน้ำตมให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่าการปักดำอย่างมีนัยสำคัญ (WS (19.11 g pot^{-1}) > TP (16.41 g pot^{-1} , $p < 0.05$) ส่วนความอุดมสมบูรณ์ของดินมีผลต่อผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ($N1 (24.61 \text{ g pot}^{-1}) > N2 (16.38 \text{ g pot}^{-1}) > N3 (6.53 \text{ g pot}^{-1}$, $p < 0.01$) ไม่พบผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ ($F(2, 30) = 2.08, p > 0.05$)

สำหรับการใช้น้ำของข้าว (ET) ทั้งสองปัจจัยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อ ET เช่นเดียวกัน ($F(1, 30) = 10.247, p < 0.01$;

$F(2, 30) = 171.093$, $p < 0.01$ ตามลำดับ) ET ของวิธีการหว่านน้ำตามสูงกว่าการปักดำอย่างมีนัยสำคัญ (WS (513.48 mm) > TP (489.16 mm), $p < 0.01$) ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อ ET (N1 (618.6 mm) > N2 (529.7 mm) > N3 (444.5 mm), $p < 0.01$) โดยมีปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญสำหรับ ET ($F(2, 30) = 4.705$, $p < 0.05$) ซึ่งบ่งชี้ว่าผลของความอุดมสมบูรณ์ต่อ ET นั้นแตกต่างกันไปตามวิธีการปลูก

3.2 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์พืชสำหรับข้าวพันธุ์ กข43

พารามิเตอร์พืชที่ใช้ในแบบจำลอง AquaCrop สำหรับการจำลองข้าวพันธุ์ กข43 ได้รับการรวบรวมและเปรียบเทียบค่าดังแสดงรายละเอียดใน Table 2 โดยพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ (A) พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ

การเจริญเติบโตและการพัฒนาการโดยทั่วไปของพืช และ (B) พารามิเตอร์ที่ควบคุมการตอบสนองของพืชต่อความเครียดเนื่องจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน

กระบวนการเปรียบเทียบพารามิเตอร์เริ่มต้นจากการใช้ค่ามาตรฐาน (default values) ที่มีอยู่ในแบบจำลอง จากนั้นจึงปรับแก้ค่าเหล่านี้โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการจัดการเพาะปลูกจริง การสังเกตลักษณะและการเจริญเติบโตของพืช และข้อมูลจากการเก็บตัวอย่างในการทดลอง สำหรับพารามิเตอร์ "วิธีการปลูก" (Crop establishment method) ในไฟล์พืช (*.CRO) ได้กำหนดให้สอดคล้องกับวิธีการทดลอง คือ เลือกเป็น sown crop (crop is sown=1) สำหรับวิธีหว่านน้ำตาม และ transplanted crop สำหรับวิธีปักดำ (crop is sown=0)

Table 1 Effects of planting methods and soil fertility levels on RD43 rice biomass, yield, and evapotranspiration.

Fertility Level	Planting Method	Biomass (g pot ⁻¹)	Yield (g pot ⁻¹)	Evapotranspiration (mm)
N1	WS	58.28 ± 1.75	27.29 ± 1.32	628.24 ± 6.41
	TP	48.08 ± 1.72	21.69 ± 1.35	605.29 ± 13.89
N2	WS	36.00 ± 3.16	17.46 ± 2.21	557.88 ± 13.18
	TP	31.58 ± 1.73	15.33 ± 1.11	504.33 ± 7.00
N3	WS	14.81 ± 1.04	6.53 ± 0.60	442.84 ± 6.12
	TP	14.39 ± 0.75	6.16 ± 0.36	446.34 ± 5.04

Note: Fertility levels are defined by the nitrogen application rate: N1(75.94 kg ha⁻¹), N2(38.13 kg ha⁻¹), N3(0 kg ha⁻¹). Planting Method included wet direct sowing (WS) and transplanting (TP).

Table 2 AquaCrop parameters for RD43 rice under the wet sowing (WS) and the transplanting (TP).

Crop Parameter	Default	WS	TP	Units
(A) Growth and development				
Crop is sown	0	1	0	-
Base temperature	8	8	8	°C
Upper temperature	30	30	30	°C
Canopy growth coefficient (CGC)	0.12257	0.14571	0.07675	day ⁻¹
Canopy decline coefficient (CDC)	0.09330	0.09556	0.09556	day ⁻¹
Maximum rooting depth	0.5	0.5	0.5	m
Maximum canopy cover (CCx)	0.95	0.95	0.95	
Normalized water productivity (WP*)	19	19	19	g m ⁻²
Reference harvest index (Hlo)	43	43	43	%
Days from sowing to emergence	3	3	3	day
Days from sowing to flowering	65	59	59	day
Days from sowing to start senescence	73	67	67	day
Days from sowing to physiological maturity	104	98	98	day
Length of the flowering stage	19	18	18	day
Canopy size of seeding	6	1	2.5	cm ²
Plants density	1,000,000	3,820,000	3,820,000	Plants ha ⁻¹
(B) Response to soil fertility stress				
Considered soil fertility stress for calibration of stress response	50	88	88	%
Shape factor (SF) for canopy expansion	25	5.09	6.45	-
SF for maximum canopy cover	25	1.57	1.18	-
SF for crop water productivity	25	2.74	3.23	-
SF for decline of canopy cover	25	6.84	6.84	-

ในส่วนของการพารามิเตอร์การเติบโตและการพัฒนาการของพืช (Table 2A) พารามิเตอร์ที่ใช้ค่ามาตรฐาน เนื่องจากเป็นค่าที่มีแนวโน้มแตกต่างกันน้อยระหว่างข้าวแต่ละสายพันธุ์ ได้แก่ อุณหภูมิที่เป็นขีดจำกัดของการเติบโต (base and upper temperature) ความลึกราก (rooting depth) สัดส่วนร่มใบสูงสุด (CCx) ผลผลิตภาพของน้ำ (WP*) และดัชนีเก็บเกี่ยวอ้างอิง (Hlo)

พารามิเตอร์ที่ปรับค่าตามข้อมูลจากการทดลองเป็นลักษณะเริ่มต้นของพืช ได้แก่ ร่มใบขณะงอก (canopy size of seeding) ความหนาแน่นพืช (plant density) และ ระยะพัฒนาการของพืชที่อ้างอิงจากข้อมูลการสังเกตและบันทึกจากการทดลองสำหรับข้าวพันธุ์ กข43 ได้แก่ วันที่ข้าวงอก (emergence), วันที่เริ่มออกดอก (start of flowering), วันที่ใบเริ่มร่วงโรย (start of senescence), วันที่สุกแก่ทางสรีรวิทยา (physiological maturity) และระยะเวลาช่วงออกดอก (length of flowering stage) ส่วนพารามิเตอร์สัดส่วนการคลุมดินของใบหรือร่มใบ (canopy cover) มีการปรับค่าเล็กน้อยทั้งสัมประสิทธิ์การขยายตัว (CGC) และสัมประสิทธิ์การลดลง (CDC)

ในส่วนของการพารามิเตอร์การตอบสนองของข้าวต่อความเครียดจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Table 2B) การเปรียบเทียบอ้างอิงจากสัดส่วนของผลผลิตที่ได้จากการทดลองจริงในแต่ละระดับความอุดมสมบูรณ์ดินเทียบกับผลผลิตเต็มศักยภาพที่จำลองได้กรณีไม่มีความเครียดจากปัจจัยแวดล้อม มีการปรับค่าเกณฑ์ความสมบูรณ์ของดินสำหรับการปรับเทียบการตอบสนองต่อความเครียด (considered soil fertility stress for calibration of stress response) ซึ่งบ่งบอกถึงระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่พืชเริ่มไม่แสดงการลดลงของชีวมวลอีกต่อไปเมื่อได้รับปุ๋ยเพิ่ม โดยปรับจากค่ามาตรฐาน 50% เป็น 88% ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับสถานะการทดลองที่ระดับ N1 (อัตราแนะนำ) ที่อาจยังไม่ได้แสดงถึงสถานะที่ดินอุดมสมบูรณ์สูงสุดจนพืชไม่ตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของปุ๋ย

ส่วนแฟคเตอร์รูปร่างของการตอบสนอง (Shape Factor: SF) สำหรับความเครียดจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีการปรับจากค่ามาตรฐานให้สะท้อนลักษณะการตอบสนองของข้าวพันธุ์ กข43 ต่อระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินทั้งสามระดับ (N1, N2, N3) ที่

ใช้ในการทดลองจริง รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบแล้วแสดงใน Table 2B

3.3 การจำลองการตอบสนองของข้าวต่อความอุดมสมบูรณ์

แบบจำลอง AquaCrop สามารถจำลองชีวมวล และ ผลผลิตข้าวในเกณฑ์น้ำพอใจทั้งวิธีปลูกแบบหว่านน้ำตาม (WS) และแบบปักดำ (TP) (Table 3) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณี N1 ซึ่งความอุดมสมบูรณ์ของดินดี ชีวมวลจากการจำลองใกล้เคียงกับผลจากการปลูกทดลอง ทั้งกรณีวิธีปลูก WS และ TP (WS, +5.2%; TP, +2.9%) ผลผลิตต่ำกว่าการปลูกทดลอง (WS, -3.0%; TP -1.9%) ส่วนการใช้น้ำของข้าว (ET) แบบจำลองให้ผลลัพธ์ต่ำกว่าผลการปลูกทดลองมาก (WS, -43.0%; TP, -31.3%)

เมื่อความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลงแบบจำลอง AquaCrop สามารถจำลองการตอบสนองของข้าวได้ แต่แบบจำลองประเมินผลกระทบต่อน้ำและผลผลิตต่ำกว่าความเป็นจริง ในกรณี N2 ซึ่งความอุดมสมบูรณ์ของดินปานกลางถึงค่อนข้างต่ำ แบบจำลองประมาณค่าชีวมวล +36.7% ถึง +46.8% ส่วนผลผลิต +21.2% ถึง +30.0% ในขณะที่กรณี N3 ซึ่งความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำมาก แบบจำลองประมาณค่าทั้งชีวมวลและผลผลิตสูงเกินไป

สำหรับการใช้น้ำของข้าว ความแตกต่างระหว่างผลจากแบบจำลองกับผลการปลูกทดลองน้อยลงเมื่อความอุดมสมบูรณ์

ของดินลดต่ำลง (N2, -21.7% ถึง -29.6%; N3 -11.5% ถึง -12.2%) ความแตกต่างที่น้อยลงนี้อาจเป็นผลจาก ET ที่ลดลงในการทดลองและอาจไม่ใช่เพราะแบบจำลองประมาณค่า ET ได้แม่นยำขึ้น ET

3.4 การวิจารณ์ผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญของทั้งวิธีการปลูก (WS, TP) และความอุดมสมบูรณ์ของดิน (N1, N2, N3) ต่อชีวมวลส่วนเหนือดิน ผลผลิต และ การใช้น้ำของข้าว กข 43 การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ ANOVA แบบสองทางยืนยันผลนี้ โดยพบผลกระทบหลักและปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญสำหรับตัวแปรต่าง ๆ

สำหรับชีวมวล การหว่านน้ำตามแสดงค่าเฉลี่ยที่สูงกว่าการปักดำอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าการหว่านโดยตรงอาจให้ข้อได้เปรียบในการสะสมชีวมวลภายใต้เงื่อนไขที่ทดสอบ ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่แตกต่างกันยังมีผลกระทบอย่างมากต่อชีวมวล โดยการใส่ปุ๋ยตามอัตราที่แนะนำ (N1) ส่งผลให้มีชีวมวลสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยในอัตราที่ลดลง (N2) และไม่ใส่ปุ๋ย (N3) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างวิธีการปลูกและระดับความอุดมสมบูรณ์บ่งชี้ว่าผลของความอุดมสมบูรณ์ต่อชีวมวลแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเทคนิคการปลูกที่ใช้

Table 3 Comparison between experimental data and AquaCrop model simulation: (A) Biomass, (B) Yield, (C) Rice Evapotranspiration.

Fertility Level	Planting Method	Experiment	AquaCrop	Difference (%)
(A) Biomass (tonne/ha)				
N1	WS	7,434	7,856	5.7
	TP	6,132	6,311	2.9
N2	WS	4,591	6,278	36.7
	TP	4,027	5,911	46.8
N3	WS	1,889	6,729	256.3
	TP	1,835	5,911	222.1
(B) Yield (tonne/ha)				
N1	WS	3,481	3,378	-3.0
	TP	2,766	2,714	-1.9
N2	WS	2,228	2,699	21.2
	TP	1,956	2,542	30.0
N3	WS	833	2,893	247.2
	TP	786	2,542	223.4
(C) ET (mm)				
N1	WS	628.2	358.0	-43.0
	TP	605.3	416.0	-31.3
N2	WS	557.9	393.0	-29.6
	TP	504.3	395.0	-21.7
N3	WS	442.8	389.0	-12.2
	TP	446.3	395.0	-11.5

ในการทำงานเดียวกัน ผลผลิตได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากทั้งวิธีการปลูกและความอุดมสมบูรณ์ของดิน การหว่านน้ำตมให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่าการปักดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของวิธีการหว่านน้ำตมในแง่ของผลผลิตภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินต่อผลผลิตนั้นมีความชัดเจนมาก โดย N1 นำไปสู่ผลผลิตที่สูงกว่า N2 และ N3 อย่างมีนัยสำคัญ การไม่มีปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างวิธีการปลูกและความอุดมสมบูรณ์ของดินต่อผลผลิตบ่งชี้ว่าผลของความอุดมสมบูรณ์ของดินต่อผลผลิตนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันสำหรับทั้งสองวิธีการปลูก

การใช้น้ำของข้าว (ET) ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากทั้งสองปัจจัยเช่นกัน การหว่านน้ำตมส่งผลให้ค่าเฉลี่ย ET สูงกว่าการปักดำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแตกต่างในรูปแบบการใช้น้ำระหว่างสองวิธี ความอุดมสมบูรณ์ของดินมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อ ET โดยพบ ET ที่สูงกว่าภายใต้ N1 เมื่อเทียบกับ N2 และ N3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างวิธีการปลูกและความอุดมสมบูรณ์สำหรับ ET ชี้ให้เห็นว่าการตอบสนองของ ET ต่อระดับการใช้น้ำนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการปลูกด้วย

เมื่อพิจารณาที่ระดับ N1 (การใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำ) ผลผลิตที่ได้ โดยเฉพาะจากวิธีการหว่านน้ำตม มีความใกล้เคียงกับผลผลิตที่เคยมีรายงานสำหรับข้าวพันธุ์ กข43 ในการศึกษาอื่นๆ (Kongpolprom et al., 2015, Nagprachaya et al., 2017) ซึ่งช่วยยืนยันศักยภาพในการให้ผลผลิตของข้าวพันธุ์นี้ภายใต้การจัดการที่เหมาะสม ข้อสังเกตประการหนึ่งคือ การปักดำในสภาพถึงทดลองอาจมีข้อจำกัดด้านกายภาพ เช่น ระยะปลูกที่กำหนดไว้ตายตัว ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแตกกอและการขยายทรงพุ่มของต้นข้าวได้ เมื่อเทียบกับการปลูกในสภาพแปลงนาจริง สำหรับค่า ET ที่สังเกตได้ในการทดลองนี้ พบว่ามีค่าต่ำกว่ารายงานสำหรับข้าวนาปรังในภาคกลางเล็กน้อย (Chumpagern et al., 2008) ความแตกต่างนี้อาจเป็นผลมาจากการทดลองในระบบปิดของถังปลูกที่ไม่มีการสูญเสียน้ำจากการซึมลึก ซึ่งแตกต่างจากสภาพแปลงนาทั่วไป

แบบจำลอง AquaCrop แสดงประสิทธิภาพได้ดีในการจำลองชีวมวลและผลผลิตภายใต้สภาวะความอุดมสมบูรณ์สูง (N1) ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพของแบบจำลองในการจำลองการเจริญเติบโตของพืชได้ค่อนข้างแม่นยำเมื่อปัจจัยแวดล้อมไม่ก่อให้เกิดความเครียดรุนแรงต่อพืช อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลง (N2 และ N3) แบบจำลองมีแนวโน้มที่จะ

ประเมินผลกระทบจากความเครียดเนื่องจากขาดธาตุอาหารได้ต่ำกว่าความเป็นจริง กล่าวคือ แบบจำลองมักจะให้ค่าชีวมวลและผลผลิตที่จำลองได้นั้นสูงกว่าค่าที่ตรวจวัดได้จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่ขาดธาตุอาหารรุนแรง (N3) ซึ่งชี้ให้เห็นข้อจำกัดของแบบจำลองในการจำลองสภาวะความเครียดจากธาตุอาหารในระดับที่รุนแรง ความคลาดเคลื่อนในการจำลองปริมาณการใช้น้ำ (ET) โดยเฉพาะในพรีเทนเมนต์ N1 ที่แบบจำลองให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริงค่อนข้างมาก เป็นประเด็นที่น่าพิจารณา แม้ว่าความคลาดเคลื่อนนี้อาจมีสาเหตุจากหลายปัจจัย เช่น ความแม่นยำในการวัดค่า ET จริงในถังทดลอง หรือความแตกต่างระหว่างการจำลองสภาพในถังกับการใช้น้ำในสภาพแปลงจริง แต่ก็ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการตรวจสอบและปรับปรุงวิธีการวัดหรือการจำลอง ET ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น

ชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง AquaCrop ที่ได้ปรับเทียบสำหรับข้าวพันธุ์ กข43 ในการศึกษา (Table 2) ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีคุณค่าสำหรับการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในการจำลองสถานการณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับข้าวพันธุ์นี้ในอนาคต การปรับค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาการ รวมถึงการตอบสนองต่อความเค็มจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยอ้างอิงจากข้อมูลการทดลองจริง ย่อมช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสำหรับการใช้งานในบริบทของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ควรตระหนักว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยความเครียดอื่นๆ (อาทิ การขาดน้ำ ความเค็ม หรืออุณหภูมิสุดขีด) ในศึกษานี้ยังคงใช้ค่ามาตรฐานของแบบจำลองเป็นหลัก ดังนั้น หากต้องการนำแบบจำลองไปใช้ในสถานการณ์ที่พืชอาจเผชิญกับความเครียดเหล่านี้อย่างชัดเจน อาจจำเป็นต้องมีการปรับเทียบพารามิเตอร์ในกลุ่มดังกล่าวเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่แม่นยำยิ่งขึ้น

โดยรวมแล้ว แบบจำลอง AquaCrop แสดงให้เห็นศักยภาพที่ดีในการเป็นเครื่องมือช่วยทำนายการตอบสนองของข้าวพันธุ์ กข43 ต่อวิธีการปลูกและระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่ไม่มีความเครียดจากธาตุอาหารรุนแรง อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของแบบจำลองในการจำลองสภาวะที่มีความเครียดจากธาตุอาหารในระดับปานกลางถึงสูง รวมถึงการจำลองปริมาณการใช้น้ำ ยังเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาและปรับปรุงเพิ่มเติมในการวิจัยในอนาคต

4 สรุป

ผลการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า ทั้งปัจจัยวิธีการปลูก (การหว่านน้ำตามและการปักดำ) และปัจจัยระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน (ซึ่งควบคุมโดยปริมาณปุ๋ยที่แตกต่างกัน) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการสะสมชีวมวลส่วนเหนือดิน การสร้างผลผลิตเมล็ดข้าวแห้ง และปริมาณการใช้น้ำของข้าว กข43

ในส่วนของการประเมิน แบบจำลอง AquaCrop พบว่าแบบจำลองสามารถตั้งค่าให้จำลองความแตกต่างระหว่างวิธีการ

ปลูกทั้งสองแบบได้ และแสดงสมรรถนะที่ดีในการจำลองปริมาณชีวมวลและผลผลิตภายใต้สภาวะที่ดินมีความอุดมสมบูรณ์สูง (N1) อย่างไรก็ตาม เมื่อดินมีความอุดมสมบูรณ์ในระดับต่ำถึงต่ำมาก (N2 และ N3) แบบจำลองมีแนวโน้มที่จะประเมินค่าชีวมวลและผลผลิตสูงกว่าความเป็นจริง

การปรับเทียบชุดพารามิเตอร์สำหรับข้าวพันธุ์ กข43 ที่ดำเนินการในการศึกษานี้ ช่วยเสริมสร้างความเชื่อมั่นในการนำแบบจำลอง AquaCrop ไปประยุกต์ใช้กับพันธุ์ข้าวของไทยได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น สำหรับการวิจัยในอนาคต เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองในการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางต่อไปนั้น ควรให้ความสำคัญกับการดำเนินการปรับเทียบเพิ่มเติมและการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองภายใต้สภาพแวดล้อมการเพาะปลูกที่หลากหลายและสมจริงยิ่งขึ้น เช่น การทดลองในสภาพแปลงนาจริง รวมถึงการศึกษาการตอบสนองต่ออัตราปุ๋ยในช่วงที่กว้างขึ้นและปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ขอขอบคุณกรมอุตุนิยมวิทยาที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล

6 เอกสารอ้างอิง

- Akumaga, U., Tarhule, A., Yusuf, A. A. 2017. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and forest meteorology* 232, 225-234.
- Allen, R. G. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Amiri, E. 2016. Calibration and testing of the Aquacrop model for rice under water and nitrogen management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3), 387-403.
- Amiri, E., Rezaei, M., Rezaei, E. E., Bannayan, M. (2014). Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *Journal of Plant Nutrition* 37(11), 1749-1769.
- Chumpagern, P. et al. 2008. Water use efficiency for dry season rice production in the Central Plain. *Thai Rice Research Journal*, 2(2), 29-39.

- Department of Agriculture. 2004. Rice. Technical Document No. 8/2547. Bangkok: Department of Agriculture. (in Thai)
- Doorenbos, J., Kassam, A. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal* 101(3), 448-459.
- Kakarndee, I., Kositsakulchai, E. 2020. Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddy field dominated basin, northeast Thailand. In: *Proceeding of the 13th TSAE International Conference & 21st TSAE National Conference*. Bangkok: Thai Society of Agricultural Engineering. 30-31 July 2020, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Kakarndee, I., Kositsakulchai, E. 2023. Impact of climate change on water balance in Lam Siao basin using SWAT+ model. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 29(2), 14-24. (in Thai)
- Kongpolprom, N. et al. 2015. Effect of using high-quality organic fertilizer and tailor-made fertilizer based on analysis on growth and yield of KDML105 Rice. *Advanced Science*, 15(1), 66-77. (in Thai)
- Kositsakulchai, E. et al. 2007. Crop-growth simulation model for the assessment of yield and crop water use in irrigation-service area. Nakhon Pathom: Royal Irrigation Department and Kasetsart University. (in Thai)
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., Li, W. 2005. *Applied linear statistical models*. McGraw-hill.
- Mankeb, P. 1993. Calibration of genetic coefficients of paddy rice (*Oryza sativa* L.) for validation of the CERES-Rice model in Northern Thailand. Master Thesis. Chiang Mai: Chiang Mai University.
- Marled, A., Kositsakulchai, E. 2021. Spatial water productivity for rice production in Chainat province. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 27(1), 16-24. (in Thai)
- Nagprachaya, S. et al. 2017. RD43, a non-glutinous rice variety. *Thai Rice Research Journal*, 8(2), 26-44. (in Thai)
- Pannangpetch, K., Laohasiriwong, S., Vorasoot, N. 1991. Determination of physiological characteristics to simulate growth of rice variety RD6. *Simulation Systems Analysis for Rice Production (SARP)*, 102-108.
- Phimchaisai, N., Kositsakulchai, E. 2023. Calibration and performance evaluation of SWAT model on rice yield and evapotranspiration simulation in the Greater Mae Klong Irrigation Project Area. *Journal of Science and Technology Kasetsart University* 12(1), 1-14. (in Thai)
- Plengwuttikrai, N., Kositsakulchai, E. 2020. Application of AquaCrop model for simulation of the RD43 rice cultivation under different soil fertilities. In: *Proceeding of the 13th TSAE International Conference & 21st TSAE National Conference*. Bangkok: Thai Society of Agricultural Engineering. 30-31 July 2020, Nakhon Ratchasima, Thailand. (in Thai)
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.
- Rice Department, Department of Internal Trade. 2019. Comprehensive rice production and marketing plan for the fiscal year 2019/2020. Operational Plan. Bangkok: Rice Department and Department of Internal Trade. (in Thai)
- Royal Irrigation Department. 2019. Annual Report 2019. Bangkok: Royal Irrigation Department. (in Thai)
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy journal* 101(3), 426-437.
- Steduto, P. et al. 2012. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Suwanwong, S. 2004. Plant analysis. Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)

- Thadamatakul, P. et al. 2021. Three rice varieties of Thailand on blood glucose control. Thai Journal of Parenteral and Enteral Nutrition, 29(1), 24-33. (in Thai)
- Vasusans, A. et al. 2017. RD43 Rice variety: Medium glycemic index rice for niche market. Thai Rice Research Journal, 8, 9. (in Thai)
- Watanabe, T. 2019. Paddy Fields as Artificial and Temporal Wetland. In: Ondrašek, G. (Ed.), Irrigation in Agroecosystems. London, UK: IntechOpen.
- Wikarnpapraharn, C., Kositsakulchai, E. 2010. Evaluation of ORYZA2000 and CERES-Rice models under potential growth condition in the Central Plain of Thailand. Thai Journal of Agricultural Science, 43, 17-29.



การศึกษาและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง

Study and Development of a Tractor-Mounted Inter-Row Weeding and Fertilizing Implement for Cassava Cultivation

สหัทธ ชลาชัย¹, ลักขณา พิทักษ์¹, เรวัตน์ เต็มกล้า^{1*}

Sahapat Chalachai¹, Lakkana Pitak¹, Rewat Termkla^{1*}

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์, สุรินทร์ 32000

¹Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Surin 32000

*Corresponding author: Tel.: +66-8-7677-1762, E-mail: rewat.te@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานโดยการพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2,000 rpm ใช้เกียร์ Low-1, Low-2, Low-3 และ High-1 ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 2.84, 3.34, 3.80 และ 4.38 km hr⁻¹ ตามลำดับ ในพื้นที่การทดสอบ 162 m² พบว่า ความสามารถในการทำงานทางไร่จริงเฉลี่ยเท่ากับ 0.60, 0.94, 1.17 และ 2.40 rai hr⁻¹ ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการทำงานเชิงไร่เท่ากับ 82.18, 82.41, 74.83 และ 83.02% ตามลำดับ ค่าอัตราการสิ้นเปลืองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ 10-14% ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าสามารถลดต้นทุนของอุปกรณ์ได้อีกเพื่อประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชเฉลี่ยเท่ากับ 88.63, 86.52, 85.52 และ 86.41% ที่ความเสียหายของต้นมันสำปะหลังเฉลี่ยเท่ากับ 4.44, 5.88, 9.00 และ 13.04% อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 2.36, 3.50, 3.64 และ 4.50 L rai⁻¹ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า เกียร์ Low-1 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชสูงที่สุด และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของต้นมันสำปะหลัง รวมถึงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง มีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: เครื่องกำจัดวัชพืช, พ่วงท้ายรถแทรกเตอร์, ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืช

Abstract

The present research aimed to study and developed a weeding and fertilizing implement for application in cassava inter-rows. Performance evaluation was conducted by attaching the implement to a tractor operating at an engine speed of 2,000 rpm, using gears Low-1, Low-2, Low-3, and High-1, corresponding to traveling speeds of 2.84, 3.34, 3.80, and 4.38 km·hr⁻¹, respectively. The field testing was carried out on an area of 162 m². The actual field capacities were found to be 0.60, 0.94, 1.17, and 2.40 rai·hr⁻¹, respectively, with field efficiencies of 82.18, 82.41, 74.83 and 83.02%. The results indicated that field efficiency remained relatively constant as speed increased, with the highest efficiency observed at High-1 gear. Slip ratios were similar across all gears and remained below the standard threshold of 10–14%, suggesting that the implement's weight could potentially be reduced to improve fuel efficiency. The average weeding efficiencies were 88.63, 86.52, 85.52 and 86.41%, while the average crop damage rates were 4.44, 5.88, 9.00 and 13.04%, respectively. Fuel consumption rates were 2.36, 3.40, 3.64, and 4.50 L·rai⁻¹, respectively. These findings reveal that the implement achieved the highest weeding efficiency when operated in Low-1 gear. However, as travel speed increased, crop damage and fuel consumption also increased.

Keywords: Weeding machine, Tractor-mounted, Weed control efficiency

Received: July 15, 2024

Revised: May 24, 2025

Accepted: May 27, 2025

Available online: June 26, 2025

1 บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารที่สำคัญอันดับที่หกของโลก รองจากอ้อย ข้าวโพด ข้าว ข้าวสาลี และมันฝรั่ง เป็นพืชอาหารที่สำคัญในภูมิภาคเขตร้อนโดยเฉพาะในแอฟริกาและอเมริกาใต้ ในขณะที่ประเทศในเอเชียที่บริโภคมันสำปะหลังมากคืออินโดนีเซีย และอินเดีย มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มยืนต้นกึ่งไม้สูงสามารถปลูกได้ง่าย เจริญเติบโตได้ในดินที่มีธาตุอาหารต่ำ และทนทานต่อความแห้งแล้ง อีกทั้งยังมีความสามารถอย่างมากในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพอากาศที่แตกต่างกัน มันสำปะหลังจึงมีความสำคัญต่อเกษตรกรรายย่อยจนถึงแปลงปลูกขนาดใหญ่ (Burns et al., 2010; El-Sharkawy, 2003)

สำหรับประเทศไทยมันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ โดยพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทยมีทั้งสิ้นประมาณ 10.86 ล้านไร่ กระจายอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ และภาคกลาง ตามลำดับ โดยในปี 2565 มีผลผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศประมาณ 34.07 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร, 2565) ด้านการส่งออกในช่วง 9 เดือนของปี 2565 ไทยส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังแล้วรวม 8.73 ล้านตัน มูลค่า 115,478.55 ล้านบาท โดยส่งออกเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูป ได้แก่ มันเส้นและมันอัดเม็ด แป้งมันสำปะหลังดิบและแปรรูป รวมถึงสาคุและกากมัน เท่ากับ 36, 62 และ 2% ตามลำดับ (กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์, 2565)

สำหรับการผลิตมันสำปะหลังของเกษตรกรโดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอนย่อย ๆ หลายขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมดิน การปลูก การบำรุงรักษา การจัดการวัชพืช การจัดการด้านโรค-แมลง การเก็บเกี่ยว และรวบรวมหัวมันขึ้นรถบรรทุก ซึ่งเกษตรกรจะนำเครื่องจักรกลเกษตรเข้ามาช่วยดำเนินการในบางขั้นตอน แต่โดยทั่วไปยังคงใช้แรงงานคนทำงานเป็นหลัก (Thangdee and Wongpichet, 2012) โดยเฉพาะขั้นตอนการบำรุงรักษาและการจัดการวัชพืช ที่มีสัดส่วนแรงงานถึง 65% ของแรงงานทั้งหมดในการผลิตมันสำปะหลัง ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น ประกอบกับปัญหาด้านจำนวนแรงงานที่ลดลง ส่งผลให้เกษตรกรต้องรับภาระต้นทุนในการผลิตที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลผลิตมันสำปะหลังจะมีผลผลิตต่ำเนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความแห้งแล้งและศัตรูพืช ศัตรูพืชที่มีสาเหตุสำคัญประการหนึ่งเกิดจากการรบกวนของวัชพืช โดยวัชพืชเป็นศัตรูพืชสำคัญที่แข่งขันกับพืชเพื่อหาสารอาหาร น้ำ แสงสว่าง และคาร์บอนไดออกไซด์ และบางชนิดถึงกับผลิตสารที่ยับยั้งการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืช (Phaphenit and Poonpaiboonpipat, 2023) การแพร่กระจายของวัชพืชจึงถือเป็นความเสี่ยงที่สำคัญ และเป็นปัจจัยหลักในการปลูกมันสำปะหลัง

เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียผลผลิต การควบคุมวัชพืชภายในแปลงถึงสิบหกสัปดาห์แรกหลังการปลูกมันสำปะหลังมีความสำคัญอย่างยิ่ง การไถพรวนดินอย่างเหมาะสมเป็นวิธีหนึ่งในการควบคุม

วัชพืชซึ่งเป็นวิธีแรกและดีที่สุดที่ใช้ในการทำให้เมล็ดวัชพืชอยู่ในสถานะที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการงอก ในขณะเดียวกันก็เป็นการเติมอากาศในดิน เพิ่มความพรุนของดินและปรับปรุงการซึมผ่านดินของราก (Schwartz-Lazaro and Copes, 2019) อย่างไรก็ตาม การเตรียมดินและกำจัดวัชพืชอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องมือแบบดั้งเดิมเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการสูญเสียความอุดมสมบูรณ์ของดิน เนื่องจากทำให้ดินถูกแสงแดดและลม นอกจากนี้ หากเกษตรกรมีการใช้สารเคมีในการควบคุมวัชพืชในระยะยาว และมากเกินไปจะเป็นการลดปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เมื่อเทียบกับการใช้ตัวเลือกการควบคุมวัชพืชด้วยเครื่องจักร (Islami, 2017) ดังนั้นการนำตัวเลือกการควบคุมวัชพืชแบบบูรณาการมาใช้อย่างเหมาะสมอาจช่วยในการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการพังทลายของดิน เครื่องกำจัดวัชพืชสามารถแบ่งได้เป็นแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟโดยขึ้นอยู่กับว่ามีแหล่งพลังงานหรือไม่ (Rask and Kristoffersen, 2007) ซึ่งการกำจัดวัชพืชแบบแอคทีฟสามารถทำงานโดยหลักเลี้ยงต้นกล้าอ่อนของพืชและการกำจัดวัชพืชไปพร้อม ๆ กัน การกำจัดวัชพืชดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็นการแกว่ง การหมุน และแบบผสม (Tillett et al., 2008) อย่างไรก็ตาม ความท้าทายในการออกแบบคือการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งกำลังและลดจำนวนชิ้นส่วนประกอบ เครื่องกำจัดวัชพืชมักจะติดตั้งอยู่ด้านหลังรถแทรกเตอร์ ขณะที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ เครื่องกำจัดวัชพืชจะทำหน้าที่พรวนดินเพื่อกำจัดวัชพืชต่อไป (Chang et al, 2021)

Selvan et al. (2015) ได้พัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชเพื่อตอบสนองความต้องการในการกำจัดวัชพืชของมันสำปะหลังที่ปลูกในรูปแบบเนินดินในพื้นที่เนินเขาโดยไม่ทำลายหัวที่ปลูกใต้เนินดิน เครื่องจักรใช้ต้นกำลังเป็นเครื่องยนต์เบนซิน มีความสามารถในการกำจัดวัชพืชระหว่างแถวทั้งสองทิศทางด้วยประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชที่ยอมรับได้ 92.8% และประสิทธิภาพในการทำงาน 79.0% เช่นเดียวกับ Gbabo et al. (2019) ได้ออกแบบ สร้าง และประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดวัชพืชแนวอนซึ่งขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์เบนซินขนาด 6 hp. ทดสอบเครื่องที่ระดับความชื้นในดิน 16% และความลึกการทำงาน 35 mm. ผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนใบมีดจาก 1,000 rpm. เป็น 2,500 rpm. นอกจากนี้ การเพิ่มความเร็วของผู้ปฏิบัติงานจาก 0.54 km hr⁻¹ เป็น 1.26 km hr⁻¹ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชจาก 90.8% เป็น 97.6% จากนั้นจะลดลงเป็น 52.3% ที่ความเร็วเพิ่มขึ้น 1.62 km hr⁻¹ นอกจากนี้ประสิทธิภาพใบมีดและหญ้าก็มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรสำหรับประเทศไทย วชิรินทร์ และพิศมาส (2558) ได้พัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชระหว่างแถวมันสำปะหลังโดยใช้รถไถเดินตามเป็นต้นกำลัง เครื่องต้นแบบประกอบด้วยชุดพรวน 3 ชุดดังนี้ ชุดพรวนกำจัดวัชพืชหลักแบบปัก ชุดพรวนกำจัดวัชพืชรองแบบพรวนซี่ตรง และชุดพรวนยกร่องแบบหัวหมูปักแยก ผลการ

ทดสอบสมรรถนะการทำงานพบว่า ความเร็วการกำจัดวัชพืชที่เหมาะสมที่สุดคือ 2.60 km hr^{-1} โดยการทดสอบยืนยันผลสรุปได้ว่า มีอัตราการทำงาน $0.85 \text{ ไร่-คน/ชั่วโมง}$ ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืช 95.65% และความสูญเสียที่เกิดกับมันสำปะหลัง 5.41% และงานวิจัยของประสาธ (2558) พัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ย โดยเครื่องต้นแบบต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก (30-45 แรงม้า) ผู้ปฏิบัติงานจะโยกบังคับไถพรวนดิน เพื่อกำจัดวัชพืชที่อยู่ระหว่างต้นบนร่องปลูกมันสำปะหลัง จากนั้นเครื่องจะโรยปุ๋ยบนร่องมันสำปะหลังในอัตรา $20-60 \text{ kg rai}^{-1}$ แล้วจากนั้นปุ๋ยจะถูกกลบด้วยส่วนกำจัดวัชพืชระหว่างร่อง ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ในแปลงมันสำปะหลังอายุ 1-2 เดือน มีประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชประมาณ $90-97\%$ มีความสามารถในการทำงานประมาณ 1 rai hr^{-1} มีอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันประมาณ $1.5-1.7 \text{ L rai}^{-1}$ และมีประสิทธิภาพการทำงานเชิงพื้นที่ 83%

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เครื่องกำจัดวัชพืชส่วนใหญ่ที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นยังเป็นเครื่องมือที่ใช้ต้นก้างขนาดเล็ก และมีการใช้เพื่อกำจัดวัชพืชเพียงอย่างเดียว ทำให้ความสามารถในการทำงานไม่มากเท่าที่ควร ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษา พัฒนา และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำจัดวัชพืชในร่องมันสำปะหลังแบบติดถังปุ๋ยพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพในการทำงานจริงในร่องมันสำปะหลัง เพิ่มความรวดเร็วในการพรวนดินกำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยมันสำปะหลัง ลดต้นทุนการผลิต และลดการใช้แรงงานคนได้

2 อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลังมีแนวคิดการออกแบบให้สามารถทำงานได้ทั้ง 3 ขั้นตอนในการทำงานครั้งเดียว ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 ไถงานทำหน้าทีไถกลบวัชพืชบนสันร่องลงในร่องมันสำปะหลัง ขั้นตอนที่ 2 ถังปุ๋ยทำหน้าที่หว่านปุ๋ยหลังจากไถงาน และขั้นตอนที่ 3 ไถหัวหมูจะทำหน้าที่ไถสาดดินเข้าโคนต้นดั้งเดิม โดยกระบวนการศึกษามีขั้นตอนและแนวคิดดังแสดงใน Figure 1

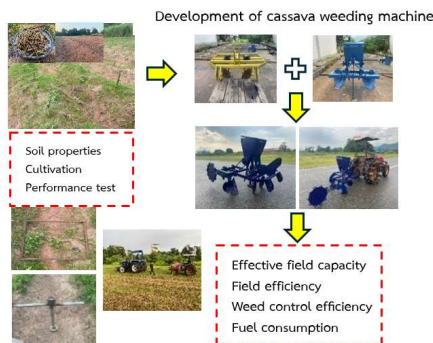


Figure 1 Schematics for development and testing of a cassava weeding machine.

2.1 ศึกษาวิธีการปลูกมันสำปะหลัง

จากการศึกษาการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์ในปัจจุบันพบว่า เกษตรกรจำนวนมากนิยมปลูกมันสำปะหลังมีระยะห่างระหว่างต้นที่ 60-100 cm และระยะห่างระหว่างแถว 120-130 cm โดยระยะห่างระหว่างร่องที่ 120 cm เป็นระยะที่เหมาะสมในการปลูกมันสำปะหลังที่จะนำเครื่องจักรเข้าทำงานเพื่อลดความยากลำบากในการทำงานของเกษตรกร ซึ่งสอดคล้องกับกรมวิชาการเกษตรที่กล่าววาระยะที่เหมาะสมของร่องมันสำปะหลังมีขนาดเท่ากับ 120 cm (สมลักษณ์, 2551) ดัง Figure 2



Plant spacing: 60–100 cm Row spacing: 120–130 cm

Figure 2 Study of cassava cultivation.

การศึกษาระยะการเจริญเติบโตของต้นมันสำปะหลังในช่วงสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 6 โดยการวัดระยะความยาวของต้นมันสำปะหลังพบว่าสัปดาห์ 1-5 สามารถทำการกำจัดวัชพืชในร่องมันสำปะหลังได้ โดยที่ต้นมันสำปะหลังไม่ได้รับความเสียหายจากการใช้เครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง และพบว่าสัปดาห์ที่ 6 เนื่องจากการคร่อมร่องของรถแทรกเตอร์ ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อใบต้นมันสำปะหลัง แต่ต้นมันสำปะหลังสามารถแตกใบขึ้นใหม่ได้

2.2 เครื่องกำจัดวัชพืชในร่องมันสำปะหลัง

2.2.1 รถแทรกเตอร์

รถแทรกเตอร์ซึ่งใช้เป็นต้นก้าง เป็นรถแทรกเตอร์ ยันมาร์ EF352T ขนาด 35 hp. มีระบบขับเคลื่อน 4WD เครื่องดีเซล มีความกว้างของล้อหน้า 26 cm. ความกว้างล้อหลัง 35 cm. ความกว้างตัวรถแทรกเตอร์ 132 cm. และความยาวทั้งหมดของรถแทรกเตอร์ 277 cm. แขนยกอุปกรณ์ 3 จุด การไหลน้ำมันปั๊มไฮดรอลิก 23 L min^{-1} น้ำหนักยกสูงสุดที่ปลายแขนยก 1,000 kg. และความเร็วรอบ PTO เท่ากับ 540 rpm. ที่รอบเครื่องยนต์ 2,000 rpm. และมีความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เกียร์ Low-1, Low-2, Low-3 และ High-1 เฉลี่ยที่ 2.84, 3.34, 3.80 และ 4.38 km hr^{-1} ตามลำดับ ลักษณะการต่อพ่วงแสดงได้ดัง Figure 3



Figure 3 Tractor-mounted cassava weeding machine.

2.2.2 เครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง

ส่วนประกอบเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลังมีดัง Figure 4



Figure 4 Components of cassava weeding machine.

จาก Figure 3 เครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง มีส่วนประกอบและหน้าที่ในการทำงานดังต่อไปนี้

หมายเลข 1. ล้อขับ จะหมุนตามความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ควบคุมการทำงานชุดเฟืองโซ่ส่งกำลังไปยังถังปุ๋ย

หมายเลข 2. ชุดเฟืองโซ่ ทำหน้าที่ถ่ายทอดกำลังไปยังถังปุ๋ย

หมายเลข 3. ถังปุ๋ย สามารถบรรจุปุ๋ยได้ 50 kg

หมายเลข 4. ผานหัวหมู ทำหน้าที่โยกดินจากกลางร่องขึ้นไปยังสันร่องต้นมันสำปะหลัง

หมายเลข 5. ใบจาน ทำหน้าที่เกลบวัชพืชจากสันร่องลงกลางร่องมันสำปะหลัง

หมายเลข 6. โครงเหล็ก ทำหน้าที่ยึดอุปกรณ์ต่างๆ

2.3 การเจริญเติบโตของวัชพืชและคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน

2.3.1 การเจริญเติบโตของวัชพืช

วิธีการจะสุ่มเก็บตัวอย่างวัชพืชในแปลง จะสุ่มเก็บในรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 50x50 cm โดยเก็บตัวอย่างวัชพืชใส่ถุงพลาสติก บริเวณหัวแปลง กลางแปลง และท้ายแปลง บริเวณละ 3 จุด ทั้งหมด 9 จุด จากตัวอย่าง จะพบว่า ทุกสัปดาห์วัชพืชจะมีการเจริญเติบโตรวดเร็ว ดังนั้นจำเป็นต้องเข้าทำความสะอาดแปลง การทดลองนี้จะดำเนินการกำจัดวัชพืชในช่วงสัปดาห์ที่ 1-5 เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อรากและใบของต้นมันสำปะหลัง โดยอัตราการเจริญเติบโตของวัชพืชแสดงใน Table 1

Table 1 Cassava growth stages results.

Growth stage (Week)	Cassava height (cm)
1	10.70 ± 0.82
2	14.00 ± 1.70
3	21.50 ± 3.31
4	28.90 ± 3.35
5	34.10 ± 2.88
6	39.60 ± 3.50

2.3.2 การหาความชื้นในดิน

วิธีวัดโดยน้ำหนัก (Gravimetric method) เป็นเทคนิคที่เป็นธรรมชาติและเก่าแก่ที่สุด Rasheed et al., (2022) ในวิธีนี้มั่นใจได้ว่าการวัดปริมาณน้ำถูกต้องและไม่เกี่ยวข้องกับชนิดของดินและความเค็มเมื่อชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินเรียบร้อยแล้วนำเข้าตูบลดความชื้นโดยใช้ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hr. แล้วนำตัวอย่างดินออกมาชั่งน้ำหนักหลังอบอีกครั้ง นำค่าน้ำหนักตัวอย่างดินก่อนอบและหลังอบมาคำนวณหาความชื้นดินต่อไป โดยใช้สมการที่ 1

$$S_w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ S_w คือเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำในดิน(%)

M_1 คือน้ำหนักดินก่อนอบ(g) M_2 คือน้ำหนักดินหลังอบ(g)

2.3.3 การหาความต้านทานการแทงทะลุของดิน

ทดสอบโดยเครื่อง Cone penetrometer ใช้หัวทดสอบขนาด 3 cm² กดและอ่านค่าตัวเลขในการทดสอบ ทดสอบในระดับความลึก 5, 10 และ 15 cm บันทึกค่าที่อ่านได้ในแต่ละจุดและนำมาคำนวณหาความต้านทานการแทงทะลุของดินในสมการที่ 2 (ประเทือง และเจตพล, 2555)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

โดยที่ σ คือความต้านทานของแรงกดของดิน (N.cm⁻²)

F คือแรงกดที่อ่านได้จากเครื่องมือ (N)

A คือขนาดพื้นที่ของหัวทดสอบ (cm²)

2.3.4 หาค่าแรงตัดเฉือนภายในดิน

การทดสอบโดยเครื่อง Shear annulus โดยใช้หัวกรูปรวยขนาด 2 cm กดและหมุนดินให้ขาด อ่านค่าตัวเลขในการทดสอบ โดยพื้นที่ทดสอบมีจำนวนรวมทั้งหมด 9 จุด บริเวณหัวแปลง กลางแปลง และท้ายแปลง บริเวณละ 3 จุด ทดสอบในระดับความลึก 5, 10 และ 15 cm บันทึกค่าที่อ่านได้ในแต่ละจุด

2.3.5 การจำแนกเนื้อดิน

ดินประกอบด้วยส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุ และส่วนของดินแร่ (Inorganic part) ส่วนของดินแร่สามารถจะแยกออกจากกันได้โดยใช้ขนาดของอนุภาค ซึ่งเรียกว่า Soil separate แบ่งออกได้

เป็นทราย (Sand) ดินร่วน (Silt) และดินเหนียว (Clay) และอนุภาคทั้ง 3 ชนิดนี้จะทำให้เกิดเนื้อดินชนิดต่าง ๆ ขึ้น (ภาคภูมิ, 2565) ดัง Figure 5

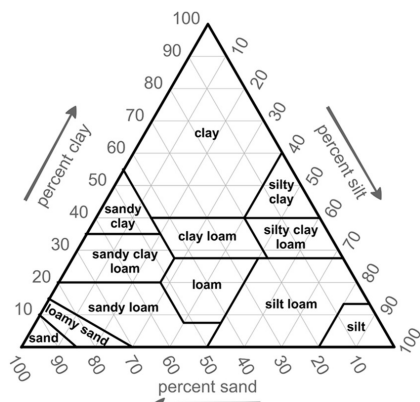


Figure 5 Soil textural triangle and textural classes.

2.4 ศึกษาสมรรถนะการทำงานของต้นกำลัง

2.4.1 การหาความเร็วที่เหมาะสมในการใช้งาน

วิธีการหาความเร็วที่เหมาะสมในการใช้งานรถแทรกเตอร์จะใช้การปักหลักเส้นตรงกึ่งกลางของแปลงห่างกันเป็นระยะทาง 20 m คำนวณหาความเร็วโดยใช้ระยะทาง 20 m หารด้วยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านหลักเส้น 20 m ได้เป็นความเร็วในการทำงานมีหน่วยเป็น $m s^{-1}$ และบันทึกผลการทดสอบ

2.4.2 การหาลังดูดลากของรถแทรกเตอร์

ใช้รถแทรกเตอร์ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ต่อโซ่ลากรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทำการทดสอบ ดังแสดงใน Figure 6 การควบคุมสภาพแวดล้อม ระยะทาง วัสดุ อุปกรณ์ต่อพ่วง และน้ำหนักบรรทุกทุกให้เหมือนกัน เพื่อให้เปรียบเทียบผลได้อย่างเที่ยงตรงในการทดสอบ โดยความเร็วรอบของรถแทรกเตอร์ที่ 2,000 rpm. ที่เกียร์ Low-1, Low-2, Low-3 และ High-1 เคลื่อนที่ผ่านหลักเส้นตรงกึ่งกลางของแปลงห่างกันระยะ 20 m. หารด้วยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่



Figure 6 Field measurement of tractor drawbar power.

ดำเนินการทดสอบโดยติดเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลังกับรถแทรกเตอร์โดยยกเครื่องท่อนแรงไม่ให้ไถตาดิน และแบบวางให้ตาดิน บันทึกรผลการทดสอบโดยผลต่างของแรงดูดลากทั้ง 2 แบบ ที่ได้จะเป็นแรงดูดลากที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำจัดวัชพืชนำมาหาแรงดูดลากจำเพาะ (Specific draft

force) ในสมการที่ 3 และคำนวณหาลังดูดลากของรถแทรกเตอร์ (Drawbar Power) (ปิยะพงษ์ และคณะ, 2561) จากสมการที่ 4

$$\text{Specific draft force (kN.m}^{-2}\text{)} = \frac{F_d}{wxd} \quad (3)$$

โดยที่ F_d คือแรงดูดลากที่เกิดขึ้น (kN)

w คือความกว้างการทำงาน (m)

d คือความลึกการทำงาน (m)

$$\text{Power (kW)} = FV \quad (4)$$

โดยที่ F คือแรงดูดลากในแนวระดับ (kN)

V คือความเร็วในการทำงานของแทรกเตอร์ ($m.s^{-1}$)

2.4.3 การหาค่าการลื่นไถล

ปิยะพงษ์ และคณะ (2561) กล่าวว่า การลื่นไถลของล้อรถแทรกเตอร์มีความสำคัญอย่างมากต่อความสามารถในการทำงานเชิงไร่ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน และอายุการใช้งานของรถแทรกเตอร์ วิธีการทดสอบการลื่นไถลตามมาตรฐานการทดสอบของ RNAM (1983) (Smith et al., 1994) ดัง Figure 7

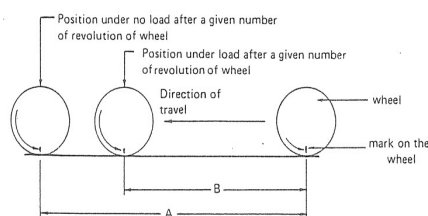


Figure 7 Measurement of wheel slip.

สามารถคำนวณหาค่าร้อยละการลื่นไถลของล้อดังแสดงในสมการที่ 5

$$\text{Percentage wheel slip} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ A คือระยะทางรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ได้เมื่อล้ออย่างหมุนครบ 10 รอบ (m)

B คือระยะทางรถแทรกเตอร์ที่ต่อพ่วงกับเครื่องกำจัดวัชพืชเคลื่อนที่ได้เมื่อล้ออย่างหมุนครบ 10 รอบ (m)

2.5 การทดสอบเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง

ในการทดสอบเครื่องจักรกลเกษตรสภาพพื้นที่จริงเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องจำเป็นต้องมีการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยมีค่าผลดังนี้

2.5.1 ความสามารถในการทำงานเชิงไร่

ความสามารถทางทฤษฎี (Theoretical field capacity, TFC) คือ อัตราการทำงานที่เครื่องจักรกลสามารถทำงานได้เต็มที่

ในเวลาที่กำหนดกับระยะความกว้างของเครื่องจักร (ปิยะพงษ์ และคณะ, 2563)

$$TFC = L \times V \quad (6)$$

โดยที่ TFC คือความสามารถทางทฤษฎี (rai hr^{-1})

L คือความกว้างของการทำงาน (m)

V คือความเร็วในการเคลื่อนที่ (m s^{-1})

ความสามารถในการทำงานจริง (Effective Field Capacity: EFC) คือการวัดปริมาณพื้นที่ที่เครื่องจักรกลสามารถทำงานได้จริงในหน่วยเวลา โดยสามารถแสดงผลเป็นไร่ เฮกตาร์ หรือ เอเคอร์ และในบางกรณีอาจวัดจากน้ำหนักผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้เป็นตันต่อหน่วยเวลา (Smith et al., 1994)

$$EFC = \frac{A}{T} \quad (7)$$

โดยที่ EFC คือความสามารถทำงานจริง (rai hr^{-1})

A คือจำนวนพื้นที่ (rai)

T คือจำนวนชั่วโมง (hr)

2.5.2 ประสิทธิภาพในการทำงานเชิงไร่ (Efficiency Field, EFF)

Smith et al. (1994) กล่าวว่าอัตราส่วนของความสามารถในการทำงานจริงต่อความสามารถทางทฤษฎี ซึ่งเป็นเครื่องช่วยให้เห็นว่ามีการใช้เวลาไปเท่าใด เมื่อเทียบกับเวลาที่ต้องเสียรถ

$$EFF = \frac{TFC}{EFC} \times 100 \quad (8)$$

โดยที่ EFF คือ ประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ (%)

2.5.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืช

การกำจัดวัชพืชหรือการควบคุมวัชพืชจะต้องเกิดประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชและต้องทราบจำนวนวัชพืชทั้งก่อนและหลังการกำจัดวัชพืชทั้งก่อนและหลังการกำจัดวัชพืช (ศิริเจริญ และคณะ, 2564) จากสมการ ดังนี้

$$E_w = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (9)$$

E_w คือประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืช (%)

W_1 คือการสุ่มนับวัชพืชในพื้นที่ 50x50 cm. ก่อนการกำจัดวัชพืช (ต้น)

W_2 คือการสุ่มนับวัชพืชในพื้นที่ 50x50 cm. หลังการกำจัดวัชพืช (ต้น)

2.5.4 อัตราความเสียหายของต้นมันสำปะหลัง

ระดับความเสียหายของพืชหลังจากการที่มีการกำจัดวัชพืชชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือ ซึ่งสามารถประเมินความเสียหายโดยการนับจำนวนต้นมันสำปะหลังตามความยาวของ

แถวก่อนและหลังการกำจัดวัชพืช ข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยแต่ละแถวการทดลองมีต้นมันสำปะหลังจำนวน 50 ต้น

2.5.5 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นอัตราส่วนของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเวลา สามารถหาได้ดังนี้ (รุ่งเรือง และคณะ, 2553)

$$\text{Fuel consumption (L.hr}^{-1}\text{)} = \frac{V}{T} \quad (10)$$

โดยที่ V คือปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง (L)

T คือเวลาการทำงาน (hr)

3 ผลการวิจัย

3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินในแปลงทดสอบ

การทดสอบดินในแปลงทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของดินสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบงานวิจัยและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืช ได้ผลการศึกษา ดังนี้

Table 2 Results on soil properties testing.

Soil Property	Location / Depth	Result	Unit
Moisture Content	Head of plot	11.28±2.07	%
	Middle of plot	9.87±2.12	%
	End of plot	8.28±1.15	%
Shear Strength	5 cm depth	15.67±3.12	kPa
	10 cm depth	61.89±3.26	kPa
	15 cm depth	95.33±4.18	kPa
Cone Penetration Resistance	5 cm depth	133.33±0.65	N.m ⁻²
	10 cm depth	400.00±1.05	N.m ⁻²
	15 cm depth	820.00±1.28	N.m ⁻²
Soil Particle Distribution (Texture)	Sand	35.27	%
	Silt	38.83	%
	Clay	25.88	%

เมื่อพิจารณาจากจาก Table 2 พบว่า คุณสมบัติของดินในแปลงทดสอบพบว่าความชื้นดินหัวแปลง มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือดินบริเวณกลางแปลง และท้ายแปลง มีค่าเฉลี่ย 11.28±2.07, 9.87±2.12 และ 8.28±1.15% แรงตัดเฉือนภายในดินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความลึกของดินเพิ่มมากขึ้น มีค่าเท่ากับ 15.67±3.12, 61.89±3.26 และ 95.33±4.18 kPa. ตามลำดับ เช่นเดียวกับค่าแรงต้านทานการแทงทะลุของดินมีค่าเฉลี่ย 133.33±0.65, 400.00±1.05 และ 820.00±1.28 N m⁻² โดย

พบว่า ดินในแปลงทดสอบส่วนมากจะเป็นดินเหนียว และเมื่อนำค่าเฉลี่ยอัตราส่วนอนุภาคดินไปเปรียบเทียบกับตารางสามเหลี่ยมพบว่า ดินในแปลงทดสอบเป็นดินร่วนเหนียว ทั้งนี้ความแตกต่างของดัชนีคุณสมบัติดินไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรกลการเกษตร

3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องจักรกลการเกษตรพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง

การทดสอบสมรรถนะในการทำงานของต้นกำลังเมื่อดำเนินการติดเครื่องจักรกลการเกษตรแบบติดถังปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง ได้ผลการศึกษาดังนี้

Table 3 Results on tractor performance testing

Gear No.	Travelling speed (km.hr ⁻¹)	Force (kN)	Power (kW)	Specific force (kN.m ⁻²)
Low - 1	2.84	4.00	3.14	17.09
Low - 2	3.34	6.16	5.75	26.35
Low - 3	3.80	6.66	7.02	28.49
High - 1	4.38	7.16	8.72	30.62

จาก Table 3 แสดงผลการทดสอบแรงฉุดลากของเครื่องจักรกลการเกษตรพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2,000 rpm. ที่เกียร์ Low-1, Low-2, Low-3 และ High-1 ได้ค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากที่ 4.00, 6.16, 6.66 และ 7.16 kN ตามลำดับ กำลังฉุดลากเฉลี่ยที่ 3.14, 5.75, 7.02 และ 8.72 kW ตามลำดับ และมีแรงฉุดลากจำเพาะเฉลี่ยที่ 17.09, 26.35, 28.49 และ 30.62 kN m⁻² ตามลำดับ โดยผลทดสอบพบว่า เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลเกษตรเพิ่มขึ้น แรงฉุดลาก กำลังฉุดลาก และแรงฉุดลากจำเพาะจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงต้านจากการทำงาน และอุปกรณ์ต่อพ่วงเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานเชิงไร่

3.3.1 ความสามารถในการทำงานเชิงไร่ของเครื่องจักรกลการเกษตรพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง

ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรกลการเกษตรพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง มีดังต่อไปนี้

Table 4 Results on efficiency assessment.

Gear No.	Area (m ²)	TFC (rai.hr ⁻¹)	EFC (rai.hr ⁻¹)	EFF (%)	wheel slip (%)
Low - 1	162	0.76	0.60	82.18	6.54
Low - 2	162	1.13	0.94	82.41	9.86
Low - 3	162	1.56	1.17	74.83	8.79
High - 1	162	2.89	2.40	83.02	8.23

จาก Table 4 แสดงผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลการเกษตรพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง โดยประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ที่ดีที่สุดที่เกียร์ High-1 มีค่าเท่ากับ 83.02% ใกล้เคียงกับ งานวิจัยของประสาธ (2558) ที่พัฒนาเครื่องจักรกลการเกษตรและใส่ปุ๋ย ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ที่ 83% ค่าอัตราการสิ้นเปลืองที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ 10-14% ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าสามารถที่จะลดน้ำหนักของอุปกรณ์ลงได้อีกเพื่อเป็นการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

3.3.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืช

จากการทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรกลการเกษตรพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง สามารถหาประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืชได้ดัง Figure 8

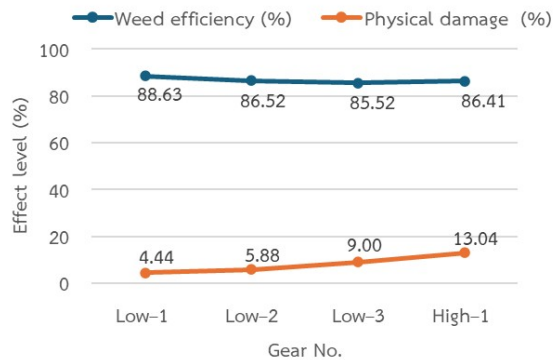


Figure 8 Efficiency of weed control in cassava fields.

จาก Figure 8 แสดงผลการทดสอบหาประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืช ที่เกียร์ Low-1, Low-2, Low-3 และ High-1 มีประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชเฉลี่ยเท่ากับ 88.63, 86.52, 85.52 และ 86.41% ความเสียหายของต้นมันสำปะหลังเฉลี่ยเท่ากับ 4.44, 5.88, 9.00 และ 13.04% และมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 2.36, 3.50, 3.64 และ 4.50 L rai⁻¹ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าที่เกียร์ Low-1 ความเร็วในการเคลื่อนที่ 2.84 km hr⁻¹ มีประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืช

สูงที่สุด สอดคล้องกับวัชรินทร์ และพิศมาส (2558) ที่พบว่าความเร็วการกำจัดวัชพืชที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ที่ค่าประมาณ 2.60 km hr⁻¹ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะมีเปอร์เซ็นต์ความ

เสียหายของต้นมันสำปะหลัง สอดคล้องกับ Gbabo et al. (2019) ที่สรุปว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของผู้ปฏิบัติงาน ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชเพิ่มขึ้น รวมถึงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นด้วย ดัง Figure 9 สำหรับการใส่ปุ๋ยโดยเครื่องสามารถกำหนดอัตราการโรยปุ๋ยในร่องมันได้ในอัตรา 20-50 kg ra⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของประสาธ (2558) จากนั้นปุ๋ยจะถูกกลบและสาดพร้อมดินเข้าโคนต้นดั้งเดิม

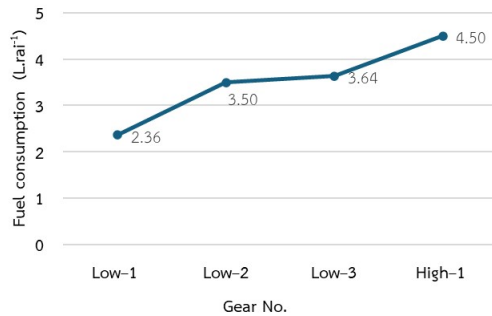


Figure 9 Relationship between gear number and fuel consumption.

4 สรุป

4.1 สรุปผลการศึกษา

ศึกษาวัฏระยะการเจริญเติบโตของต้นมันสำปะหลังในช่วงสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 6 โดยการวัดระยะความยาวของต้นมันสำปะหลังจะพบว่าสัปดาห์ 1-5 สามารถทำการกำจัดวัชพืชในร่องมันสำปะหลังได้ โดยที่ต้นมันสำปะหลังไม่ได้รับความเสียหาย เมื่อดำเนินการทดลองในสัปดาห์ที่ 6 เป็นต้นไป การกำจัดวัชพืชจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อใบและต้นมันสำปะหลัง เนื่องจากการคร่อมร่องของรถแทรกเตอร์ แต่ต้นมันสำปะหลังสามารถแตกใบขึ้นใหม่ได้ เมื่อศึกษาถึงระยะการเจริญเติบโตของวัชพืชในช่วง สัปดาห์ที่ 1-2 โดยการวัดระยะความยาวของวัชพืชและน้ำหนักวัชพืชจากตัวอย่าง จะพบว่าสัปดาห์ 1-2 สามารถทำการกำจัดวัชพืชในร่องมันสำปะหลังได้ หากเกินสัปดาห์ที่ 2 หน่อกะเริ่มหนาทำให้การเข้าทำความสะอาดไม่สะอาดเท่าที่ควร ดังนั้นหลักการทำงานของเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลังจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 ไถงานทำหน้าที่ไถกลบวัชพืชบนสันร่องลงในร่อง

ขั้นตอนที่ 2 ใส่ปุ๋ยทำหน้าที่โรยปุ๋ยหลังจากไถงาน

ขั้นตอนที่ 3 ไถหัวหมูจะทำหน้าที่ไถสาดดินเข้าโคนต้นดั้งเดิม

4.2 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบแรงฉุดลากของเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 2,000 rpm. ที่เกียร์ Low-1, Low-2, Low-3 และ High-1 ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 2.84, 3.34, 3.80 และ 4.38 km hr⁻¹ ตามลำดับ จากผลทดสอบพบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลเกษตรเพิ่มขึ้น แรงฉุดลาก กำลังฉุดลาก และแรงฉุดลากจำเพาะ

จะเพิ่มขึ้นแบบไม่แปรผันเชิงเส้น เนื่องจากแรงฉุดที่ล้อจะลดลงตามอัตราทดของเกียร์ ตามลำดับ เนื่องจากแรงต้านจากพื้นดินและอุปกรณ์ต่อพ่วงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เครื่องยนต์ต้องใช้พลังงานมากขึ้น

ประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดวัชพืชพร้อมใส่ปุ๋ยในร่องมันสำปะหลัง พื้นที่ในการทดสอบ 162 m² มีประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ที่ต่ำที่สุดที่เกียร์ High-1 มีค่าเท่ากับ 83.02% ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าที่เกียร์ Low-1 ความเร็วในการเคลื่อนที่ 2.84 km hr⁻¹ มีประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชสูงที่สุด และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของต้นมันสำปะหลังรวมถึงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้านแรงฉุดลากและอัตราการสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์ พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองในช่วงมาตรฐานที่ยอมรับได้ (10-14%) แสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทกำลังฉุดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในกรณีที่ค่าดังกล่าวอยู่ในระดับต่ำใกล้ขอบล่างของช่วงมาตรฐาน อาจสามารถพิจารณาปรับลดน้ำหนักของอุปกรณ์ต่อพ่วงหรือถ่วงน้ำหนักลงได้อย่างเหมาะสม เพื่อช่วยลดภาระต่อเครื่องยนต์ และส่งผลต่อการประหยัดเชื้อเพลิงโดยไม่กระทบต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องจักร

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

6 เอกสารอ้างอิง

- กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์. 2565. ข่าวกรมการค้าต่างประเทศ 2565. แหล่งข้อมูล: <https://www.dft.go.th>. เข้าถึงเมื่อ 25 มิถุนายน 2567.
- ประเทือง อุษาบริสุทธิ, เจตพล อาพันธ์. 2556. การศึกษาการบรรเทาการอัดแน่นของดินทรายแบ่งในไร่้อย. รายงานการประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 10 ประจำปี 2556, 1236-1243.
- ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. 6-7 ธันวาคม 2556, กำแพงแสน, นครปฐม.
- ประสาธ แสงพันธุ์ตา. 2558. โครงการวิจัยและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยในไร่มันสำปะหลัง. กรมวิชาการเกษตร.
- ปิยะพงษ์ ศรีวงษ์ราช, ศุภกิตต์ สายสุนทร, สิทธิพร มณีวรรณ, นิพนธ์ ภูวเกียรติกิจาร. 2561. การประเมินการสิ้นเปลืองของล้อรถแทรกเตอร์ขณะต่อพ่วงเครื่องปลูกอ้อยแบบหยอดขึ้นตาอ้อย. รายงานการประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 15 ประจำปี 2561, 122-128. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. 6-7 ธันวาคม 2561, กำแพงแสน, นครปฐม.
- ปิยะพงษ์ ศรีวงษ์ราช, ศุภกิตต์ สายสุนทร, สิทธิพร มณีวรรณ, นิพนธ์ ภูเกียรติกิจาร. 2563. การพัฒนาเครื่องปลูกอ้อยแบบใหม่สำหรับวัสดุปลูกชนิดขึ้นตาอ้อย. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 30(1), 4-15.
- ภาคภูมิ พันธุ์ขันธุ์. 2565. การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาสารคาม: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์, จตุรงค์ ลังกาพิณธุ์, มานพ ต้นตระกูล. 2553. การพัฒนาเครื่องปลูกมันสำปะหลัง. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์, ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- วัชรินทร์ เขียวไกร, พิศมาส หวังดี. 2558. วิจัยและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชระหว่างแถวมันสำปะหลังโดยใช้รถไถเดินตามเป็นต้นกำลัง. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม.
- ศิริเชษฐ์ กองแก้ว, สิงห์รัฐ ชารี, ประไพพรรณ สิทธิกุล, บัณฑิตทองสร้อย, ฤกษ์ชัย ผลโพธิ์. 2564. การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดวัชพืชในแปลงข้าวโพดหวาน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 27(2), 12-18.
- สมลักษณ์ จูทั่งคะ. 2551. เอกสารวิชาการ เทคโนโลยีการผลิตมันสำปะหลัง. ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 6 กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร. แหล่งข้อมูล: <https://www.oae.go.th> 2565. เข้าถึงเมื่อ 25 มิถุนายน 2567.
- Burns, A., Gleadow R., Cliff, J., Zacarias, A., Cavagnaro, T. 2010. Cassava: The Drought, War and Famine Crop in a Changing World. Sustainability 2, 3572-3607.
- Chang, C.L., Xie, B.X., Chung, S.C. 2021. Mechanical Control with a Deep Learning Method for Precise Weeding on a Farm. Agriculture 11, 1049.
- El-Sharkawy, M.A. 2003. Cassava biology and physiology. Plant Molecular Biology 53, 621-641.
- Gbabo, A., Ogbobeogu, I.D., Gana, I.M. 2019. Design, Fabrication, and Testing of a Horizontal Weeding Machine. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology 7(11), 12-18.
- Islami, T., Wisnubroto, E.I., Utomo, W.H. 2017. Effect of chemical and mechanical weed control on cassava yield, soil quality and erosion under cassava cropping system. Journal of Advanced Agricultural Technologies 4(1), 57-61.
- Phaphenit, K., Poonpaiboonpipat, T. 2023. The critical period of weed control for cassava planted during the rainy season of Thailand. International Journal of Agricultural Technology 19(3), 1179-1190.
- Rasheed, M.W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S.; Saddique, N., Khan, M.U., Imran Khan, M., Nawaz, S., Shamshiri, R.R., Aziz, M., Sultan, M. 2022. Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review. Sustainability 14, 11538.
- Rask, A. M., Kristoffersen, P. 2007. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. Weed Research 47, 370-380.
- Schwartz-Lazaro, L. M., Copes, J. T. 2019. A review of the soil seed bank from a weed scientists' perspective. Agronomy 9(7), 1-13.
- Selvan, M.M., Kannamalai, S.J., Ravindran, C.S., Sheriff, J.T. 2015. Development of power weeder for mound-cassava in hilly terrain. Indian Journal of Agricultural Sciences 85(9), 1206-1209.
- Smith, D.W., Sims, B.G., O'Neill, D.H. 1994. Testing and evaluation of agricultural machinery and equipment. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Thangdee, D., Wongpichet, S. 2012. Development of Cassava Digger and Conveyor Units. American Journal of Experimental Agriculture 2(3), 458-469.
- Tillett, N.D., Hague, T., Grundy, A.C., Dedousis, A.P. 2008. Mechanical within row weed control for transplanted crops using computer vision. Biosyst. Eng 99, 171-178.



การศึกษาขนาดอนุภาคของลำต้นมันสำปะหลังที่มีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

Study of Effect of Particle Size of Cassava Stems on Fuel Pellet Production

กัณฑ์ณ เปรมประยูร¹, ชนินทร์ อุปัทม์^{1,3,4,*}, สิงห์ธัญ ชารี², คุณนิตี ดวงผึ้ง^{3,4,5}, สุรเชษฐ์ บำรุงศิริ²

Kantapon Premprayoon¹, Chanin Oupathum^{2,3,4,*}, Singrun Charee², Khunnithi Doungpueng^{3,4,5}, Surachet Bumrungkeeree²

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น 40000

¹Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen 40000

²สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตร, คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา, พระนครศรีอยุธยา 13000

²Department of Agricultural Machinery Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra District, PhraNakhon Si Ayutthaya 13000

³ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, กรุงเทพมหานคร 10400

³Postharvest Technology Innovation Center, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10400

⁴ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตร และวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น 40002

⁴Agricultural Machinery and Postharvest Technology Center, Khon Kaen University, Khon Kean 40002

⁵โปรแกรมวิชาช่างกลเกษตร, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น 40000

⁵Department of Farm Mechanics, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen 40000

*Corresponding author: Tel.: +66-8-8058-9398, E-mail: chanin9398@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านเครื่องสับย่อยรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm พร้อมศึกษาสมบัติหลังการสับและการอัดเม็ด พบว่า ความสามารถและเปอร์เซ็นต์การสับย่อยสูงสุดเท่ากับ 43.85 kg h⁻¹ และ 64.79% ตามลำดับ เมื่อใช้ตะแกรงคัดขนาด 6 mm หลังการสับย่อย ได้ผลความหนาแน่นรวมสูงสุดเท่ากับ 139.28 kg m⁻³ เมื่อใช้ขนาดตะแกรง 3 mm มุมกองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดรูตะแกรงคัดขนาด และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 50.70° เมื่อใช้ตะแกรงคัดขนาด 6 mm ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคและค่าโมดูลัสความละเอียดสูงสุดเท่ากับ 2.45 mm และ 4.65 mm ตามลำดับ จากการทดสอบเครื่องอัดเม็ดชีวมวล พบว่า ความสามารถการอัดสูงสุดเท่ากับ 61.49 kg h⁻¹ ในกรณีอนุภาคที่ผ่านรูตะแกรงขนาด 5 mm เปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 98.05% เมื่อใช้ตะแกรงคัดขนาด 4 mm หลังการอัดเม็ด มุมกองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดรูตะแกรงคัดขนาด ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 29.21° เมื่อใช้ตะแกรงคัดขนาด 6 mm ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ขนาดเท่ากัน พบว่า น้ำหนักเม็ดเชื้อเพลิงสูงสุดเท่ากับ 0.96 g เมื่อใช้ตะแกรงคัดขนาด 4 mm ความหนาแน่นจริงของเม็ดเชื้อเพลิงสูงสุดเท่ากับ 1,323.76 kg m⁻³ เมื่อใช้ตะแกรงคัดขนาด 6 mm ความหนาแน่นรวมสูงสุดเท่ากับ 689.87 kg m⁻³ และความคงทนที่ผ่านมาตรฐานคือเมื่อใช้ตะแกรงคัดขนาด 3 และ 4 mm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.39 และ 98.25% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ลำต้นมันสำปะหลัง, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, ขนาดอนุภาค, สมบัติทางกายภาพ

Abstract

The present study aimed to analyze the effect of particle size of cassava stems, processed through screening sieves of 3, 4, 5, and 6 mm, on their physical properties after chopping and pelleting. The performance evaluation of the cassava stems hammer mill demonstrated a throughput capacity of 43.85 kg h⁻¹ and a shredding efficiency of 64.79% when using a 6-mm sieve. Both parameters showed an increasing trend with larger sieve apertures. The

Received: August 03, 2022

Revised: September 12, 2024

Accepted April 25, 2025

Available online: June 26, 2025

highest bulk density of 139.28 kg m^{-3} was recorded with a 3-mm sieve, which decreased as the size of the sieve increased. Additionally, the angle of repose increased with the sieve size, peaking at 50.70° when using a 6-mm sieve. The particle size and modulus of fineness were maximized at 2.45 mm and 4.65 mm, respectively, for the 6-mm sieve. In the biomass pellet production phase, the pelletizing machine achieved a maximum compression capacity of 61.49 kg h^{-1} with a 5-mm sieve. The highest pellet formation efficiency was 98.05% when using a 4-mm sieve. The angle of repose of the pellets was highest at 29.21° when using a 6-mm sieve. Pellet dimensions were consistent across all sizes. The maximum pellet weight was 0.96 g when using a 4-mm sieve, while the actual fuel density was $1323.76 \text{ kg m}^{-3}$ when using a 6-mm sieve. All pellet densities conformed to industry standards, while the durability values of pellets produced with 3-mm and 4-mm sieves were 98.39% and 98.25%, respectively, meeting the required quality standards.

Keywords: Cassava Stems, Biomass Pellet, Particle Size, Physical Properties

1 บทนำ

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตเป็นพลังงานได้โดยในบรรดาพลังงานทางเลือก "พลังงานชีวมวล" ถือว่ามีความสำคัญ การใช้พลังงานความร้อนคิดเป็นร้อยละ 61 ไฟฟ้า และเชื้อเพลิงชีวภาพคิดเป็นร้อยละ 23 และ 16 ตามลำดับ โดยพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวลนั้นได้ 3,372.93 เมกะวัตต์ต่อปี รองลงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ 2,962.45 เมกะวัตต์ต่อปี และพลังงานความร้อนจากชีวมวลนั้นได้ 7,152 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบต่อปี รองลงมาเป็นพลังงานความร้อนจากก๊าซชีวภาพได้ 634 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบปี ซึ่งเห็นได้ว่า การใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกจะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนมากที่สุดโดยได้จากชีวมวลเป็นหลัก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564) ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งมีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจำนวนมาก เช่น ใบอ้อย ชานอ้อย ลำต้นและเหง้ามันสำปะหลัง แกลบ ฟาง ข้าว ชังข้าวโพด และเศษไม้ เป็นต้น โดยวัสดุเหลือใช้เหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าได้นอกจากนี้ ทางรัฐบาลได้มีการส่งเสริมและรณรงค์ให้ภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมหันมาให้ความสำคัญของพลังงานชีวมวล โดยส่งเสริมให้มีอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าในระดับครัวเรือน และกระตุ้นการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อให้มีการใช้ทรัพยากรภายในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตมันสำปะหลังอันดับ 2 ของโลกรองจากไนจีเรีย ในปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังประมาณ 9.44 ล้านไร่ ได้ผลผลิต 29 ล้านตัน มีผลผลิตต่อไร่เฉลี่ย 3.07 ตันต่อไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563)

จากการศึกษาข้อมูลหลังการเก็บเกี่ยวลำต้นมันสำปะหลัง บางส่วนจะรวบรวมลำต้นที่สมบูรณ์ไปทำท่อนพันธุ์ในการปลูกครั้งต่อไป และอีกส่วนของลำต้นที่ไม่สมบูรณ์จะจัดกระจายตามร่องในแปลงเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกษตรกรทำการเผา และไถกลบเพื่อเตรียมแปลงปลูกใหม่อีกครั้งทำให้สูญเสียเชื้อเพลิงไปเปล่าประโยชน์ จากการศึกษาข้อมูลพบว่า โดยเฉลี่ยทั้งประเทศ

ลำต้นมันสำปะหลังจะถูกใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ โดยเป็นต้นพันธุ์และปุ๋ยบำรุงดินประมาณ 54% และคงเหลือจากการใช้ประโยชน์ 46% คิดเป็น 388 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2557) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาการนำไปอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงอย่างจริงจัง อีกทั้งกระบวนการอัดเม็ดยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการอัดเม็ดหลายอย่าง เช่น ขนาดอนุภาค ความชื้น ความเร็วรอบการอัด อัตราการป้อน ตัวประสาน มีผลต่อความคงทน และความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง (Whittaker and Shield, 2017) ซึ่งการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคมีผลต่อการอัดเม็ด (Harun and Afzal, 2016)

ดังนั้นการศึกษานำลำต้นมันสำปะหลังมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาขนาดอนุภาคและสมบัติทางประการก่อนนำมาอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง เพื่อได้สมบัติที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาการนำไปใช้งานเพื่อให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีการผลิตพลังงาน ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ มาใช้ประโยชน์ ลดปัญหาการเผาตามธรรมชาติที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ตลอดจนส่งเสริมการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคตของภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การทดสอบเครื่องสับย่อยลำต้นมันสำปะหลัง

การเตรียมวัสดุก่อนการสับย่อยเริ่มจาก เก็บรวบรวมลำต้นมันสำปะหลังจากไร่ สุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาอบหาค่าความชื้น (ASAE, 1993) ได้ค่าความชื้นเฉลี่ย 60% w.b. นำลำต้นมันสำปะหลังที่เตรียมไว้จัดตัวอย่าง ตัวอย่างละ 1 kg จำนวน 24 ตัวอย่าง เพื่อนำมาทดสอบหาความสามารถในการสับย่อย และเปอร์เซ็นต์การสับย่อย โดยใช้เครื่องสับย่อยลำต้นมันสำปะหลังแบบชุดใบมีดจานสับ 4 ใบมีด พร้อมย่อยในชุดเดียวกัน (Figure 1) ซึ่งมีตะแกรงเหล็กกรูกลมคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm ตะแกรงดังกล่าวสามารถถอดเปลี่ยนเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าได้ ซึ่งจากการทดสอบเครื่องสับย่อยเบื้องต้น พบว่า ความเร็วรอบของเครื่องสับย่อย 1,000 rpm (4.45 m s^{-1}) อัตราการป้อน 120 kg h^{-1} ซึ่งเป็นความเร็วรอบ และอัตราการป้อนที่เหมาะสม ซึ่งได้นำมา

ดำเนินการทดสอบ เดินเครื่องทำการปรับความเร็วรอบการสับตามที่ทำทดสอบ จับเวลา เริ่มป้อนวัสดุลำต้นมันสำปะหลังอย่างสม่ำเสมอ 1 kg ภายในเวลา 30 s เข้าเครื่องสับย่อย สุ่มวัสดุออกจากตัวเครื่องสับย่อยนำไปชั่งน้ำหนักพร้อมจับเวลากระทำ 3 ซ้ำ หาความสามารถในการทำงานของเครื่อง เก็บตัวอย่างลำต้นมันสำปะหลังที่ได้จากการสับย่อย นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การสับย่อย



Figure 1 Size reducing cassava stems chopping machine.

ปัจจัยที่ศึกษา คือขนาดตะแกรงคัดขนาดรู 3 4 5 และ 6 mm ตามลำดับ (Figure 2) ซึ่งเป็นช่วงของขนาดตะแกรงที่ได้รับการศึกษาในกระบวนการอัดเม็ดชีวมวล

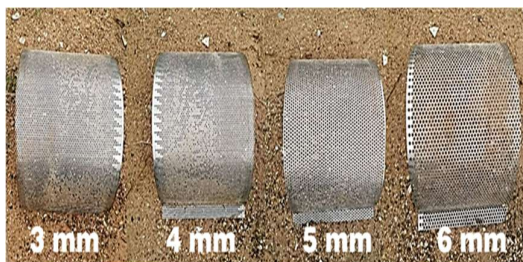


Figure 2 Half circle screen of different sizes.

ปัจจัยควบคุม ความเร็วรอบในการสับย่อย 1,000 rpm (4.45 m s^{-1}) และอัตราการป้อนที่ 120 kg h^{-1} กระทำโดยป้อนท่อนมันสำปะหลังครั้ง 2 kg อย่างสม่ำเสมอภายในเวลา 60 s ลำต้นมันสำปะหลังความชื้น 60% w.b.

ค่าชี้ผลการศึกษา

1) ความสามารถของเครื่องสับย่อย หาได้จากสมการที่ 1

$$C_p = \frac{W_c}{t} \quad (1)$$

เมื่อ

C_p แทน ความสามารถในการสับย่อย, kg h^{-1}
 W_c แทน น้ำหนักวัสดุลำต้นมันสำปะหลังที่สับย่อยได้, kg
 T แทน เวลาที่ใช้ในการสับย่อย, hr
 2) เปอร์เซนต์การสับย่อย

เปอร์เซนต์การสับย่อยลำต้นมันสำปะหลัง ทดสอบโดยชั่งน้ำหนักวัสดุลำต้นมันสำปะหลังก่อนเข้าเครื่องสับย่อย และนำลำต้นมันเข้าเครื่องสับย่อยจนหมด หลังจากนั้นนำลำต้นมันสำปะหลังสับย่อยที่ผ่านตะแกรงคัดขนาดได้มาชั่งน้ำหนัก และหาน้ำหนักวัสดุที่ไม่ผ่านตะแกรงคัดขนาด มาคำนวณเปอร์เซนต์การสับย่อยได้จากสมการที่ 2

$$W_c = \frac{W_m - W_s}{W_m} \quad (2)$$

เมื่อ

W_c แทน เปอร์เซนต์การสับย่อย, %
 W_s แทน น้ำหนักวัสดุที่ค้างตะแกรง, kg
 W_m แทน น้ำหนักวัสดุที่สับย่อยทั้งหมด, kg

2.2 การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของลำต้นมันสำปะหลังหลังจากการสับย่อย

หลังจากการสับย่อยลำต้นมันสำปะหลังแล้ว นำลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการสับย่อยนำไปลดความชื้นโดยการตากแดดลดความชื้นเป็นเวลา 9 hr (Figure 3) ซึ่งภายหลังการตรวจความชื้นด้วยการอบหาความชื้น (ASAE, 2006) พบว่ามีความชื้นลดลงเหลือเฉลี่ย 10% w.b. การตากแห้งจะทำให้ปริมาณความชื้นของชีวมวลใกล้เคียงกันทั้งหมดทำให้ง่ายต่อการควบคุมความชื้นของชีวมวล



Figure 3 Reduction of moisture content by sun drying.

หลังจากที่ลำต้นมันสำปะหลังถูกลดความชื้นหลังจากการสับย่อย ได้ทำการศึกษาสมบัติบางประการของลำต้นมันสำปะหลังหลังจากการสับย่อยก่อน เพื่อให้เข้าใจถึงคุณลักษณะของลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการสับย่อยเพื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดซึ่งสมบัติบางประการ ได้แก่ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ความหนาแน่นรวม มุมกอง ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค และค่าโมดูลัสความละเอียด ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

- สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

การหาสัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน โดยวางลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการสับย่อยบนพื้นของอุปกรณ์ทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตโดยยกพื้นขึ้นจนสังเกตเห็นวัสดุเริ่มไหลจากสภาวะหยุดนิ่ง (Figure 4) จึงบันทึกค่ามุมที่อ่านได้ทำการทดสอบกับพื้นรองรับที่เป็นวัสดุต่างกัน ได้แก่ แผ่นไม้ แผ่น

เหล็ก แผ่นพลาสติก และแผ่นสังกะสี เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของแต่ละวัสดุมาเป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง เช่น การออกแบบชุดลำเลียง ไซโล ช่องป้อนวัสดุ เป็นต้น (Lubwama, Yiga, and Muhairwe, 2020) (Baryeh, 2002) ทดสอบจำนวน 20 ตัวอย่าง และแต่ละขนาดอนุภาคของลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรงคัดขนาดของเครื่องสับย่อย 3 4 5 และ 6 mm จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของวัสดุ จากสมการที่ 3



Figure 4 Static coefficient of friction determination.

$$\mu = \tan \alpha \quad (3)$$

เมื่อ

μ แทน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

α แทน มุมการไหลวัสดุ, °

- ความหนาแน่นรวม

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นรวมของลำต้นมันสำปะหลังทำได้โดยนำลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการสับย่อยบรรจุในภาชนะที่ทราบปริมาตรที่แน่ชัดจนเต็มภาชนะแล้วปาดผิวให้เรียบ และนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวม จากสมการที่ 4 จำนวนตัวอย่างลำต้นมันสำปะหลังในการศึกษาจำนวน 20 ตัวอย่าง

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

เมื่อ

ρ แทน ความหนาแน่นรวมของวัสดุ kg m^{-3}

m แทน น้ำหนักของวัสดุ, kg

v แทน ปริมาตรของภาชนะบรรจุ m^3

- มุมกอง

โดยทำการบรรจุลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการสับย่อยแต่ละขนาดใส่ในกรวย แล้วเทปล่อยลงกึ่งกลางของภาชนะทรงกระบอก จากนั้นวัดความสูงของกองวัสดุ และเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานกอง ภายหลังจากอยู่ในสภาพสมดุล (P.S.Lam, S. Sokhansanj, 2014) โดยคำนวณหามุมกองจากสมการที่ 5 ใช้ตัวอย่างลำต้นมันสำปะหลังที่สับย่อย 20 ตัวอย่างของรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm

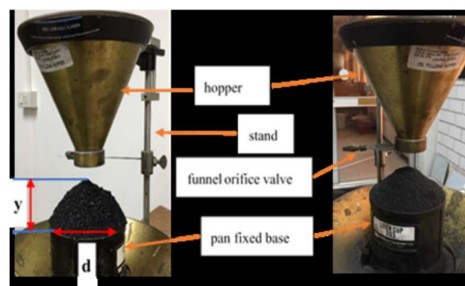


Figure 5 Seedburo filling hopper and stand for angle of repose (fixed base) measurement.

$$\text{AOR} = \tan^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) \quad (5)$$

เมื่อ

AOR แทน มุมกองวัสดุ (°)

h แทน ความสูงของวัสดุโดยวัดจากปลาย

กระบอกขึ้นมา, cm

r แทน รัศมีของกระบอกตวงวัดปริมาตร, cm

- ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค และค่าโมดูลัสความละเอียด

โมดูลัสความละเอียด เป็นค่าที่แสดงถึงความละเอียดของมวลรวมว่ามีมากน้อยเพียงใด สามารถหาได้จากการวิเคราะห์มวลรวมด้วยตะแกรงมาตรฐาน โดยนำค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐาน แต่ละตะแกรงมารวมกันแล้วหารด้วย 100 ทดสอบโดยการนำลำต้นมันสำปะหลังที่ได้จากเครื่องสับย่อยมาใส่ตะแกรงร่อนแล้วนำเข้าเครื่องเขย่า 5 นาทีแล้วนำไปเทเปอร์เซ็นต์ผ่านรูตะแกรงเพื่อหาขนาดของวัสดุก่อนนำมาทดสอบ (Figure 6) ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคหาได้จากสมการที่ (6)



Figure 6 Analysis of cassava stems after size reduction.

$$D = 0.0041(2)^{F.M.} \quad (6)$$

เมื่อ

F.M. แทน ค่าโมดูลัสความละเอียด

D แทน ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค, mm

2.3 ทดสอบการทำงานของเครื่องอัดเม็ดวัสดุลำต้นมันสำปะหลัง

วิธีดำเนินการทดสอบ ใช้ความเร็วรอบในการอัด 150 rpm นำผงลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการสับย่อยผ่านรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm เริ่มป้อนอนุภาคลำต้นมันสำปะหลังที่

ผ่านการสับย่อยเข้าเครื่องอัดเม็ดซีววมวล (Figure 7) สุ่มแล้วจับเวลาเมื่อเม็ดเชื้อเพลิงออกจากเครื่องอัดอย่างต่อเนื่องแล้วหยุดเวลา จากนั้นนำเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ชั่งน้ำหนักหาความสามารถเครื่องอัดเม็ดซีววมวล เก็บตัวอย่างที่ได้จากการอัดเม็ดเชื้อเพลิงนำไปชั่งน้ำหนักและคัดแยกผงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ นำไปคำนวณตามสมการที่ 7 และ 8



Figure 7 Pelleting machine.

- ปัจจัยที่ศึกษา
- ทดสอบขนาดลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm ตามลำดับ
- ปัจจัยควบคุม
- ความเร็วรอบในการอัด 150 rpm อัตราการป้อนที่ 60 kg h⁻¹ และความชื้น 10% w.b.
- ค่าชี้ผลการศึกษา
- ความสามารถของเครื่องอัดเม็ดซีววมวล

$$C_p = \frac{W_o}{t} \quad (7)$$

เมื่อ

C_p แทน ความสามารถ, kg h⁻¹
 W_o แทน น้ำหนักวัสดุที่อัดได้, kg
 t เวลาที่ใช้ในการอัด, kg
 %การขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ด

$$B_f = \frac{W_p}{W_p + W_d} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ

B_f แทน เปอร์เซ็นต์การขึ้นรูป, %
 W_p แทน น้ำหนักเม็ดเชื้อเพลิง, kg
 W_d แทน น้ำหนักฝุ่นผง, kg

2.4 การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุลำต้นมันสำปะหลังหลังการอัดเม็ดเชื้อเพลิง

- มุมกองลำต้นมันสำปะหลังอัดเม็ด
- การหาขนาดของมุมกอง โดยทำการบรรจุเม็ดเชื้อเพลิงลำต้นมันสำปะหลังจากการสับย่อยด้วยตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ

6 mm ใส่ในกรวยแล้วเทปล่อยลงกึ่งกลางของภาชนะทรงกระบอก จากนั้นวัดความสูงของกองวัสดุ และเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานกอง ภายหลังจากอยู่ในสภาพสมดุล โดยคำนวณหามุมกองจากสมการ 3 ใช้ตัวอย่างลำต้นมันสำปะหลังที่สับย่อย 20 ตัวอย่าง ของแต่ละขนาด

- การหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

ทดสอบโดยวางเม็ดเชื้อเพลิงลำต้นมันสำปะหลังที่มีอนุภาคผ่านตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm บนพื้นของอุปกรณ์ทดสอบ ยกพื้นขึ้นจนสังเกตเห็นวัสดุเริ่มไหลจากสภาวะหยุดนิ่ง จึงบันทึกค่ามุมที่อ่านได้ (Figure 8) ทำการทดสอบกับพื้นรองรับที่เป็นวัสดุต่างกัน ได้แก่ แผ่นไม้ แผ่นเหล็ก แผ่นพลาสติก และแผ่นสังกะสี จำนวนอย่างละ 20 ตัวอย่าง



Figure 8 Static coefficient determination of pellets.

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ด
- สำหรับการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโดยทำการเลือกสุ่มเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ใกล้เคียงกันมา 100 เม็ด เริ่มจากวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและวัดความยาวด้วยไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล (Figure 9)



Figure 9 Measurement of dimension of pellets of cassava stems.

- ความหนาแน่นจริงเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การหาความหนาแน่นจริงของเม็ดเชื้อเพลิงจากลำต้นมันสำปะหลัง ทำได้โดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวเม็ดเชื้อเพลิง แล้วคำนวณหาปริมาตร จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักของแต่ละตัวอย่าง แล้วไปคำนวณหาความหนาแน่นจริง จำนวนตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงในการศึกษาจำนวน 100 ตัวอย่าง ของแต่ละอนุภาคที่ผ่านตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm มีหน่วยเป็น kg m⁻³

- การทดสอบหาความหนาแน่นรวม

ทำได้โดยปล่อยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกรวยด้านบนลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรที่แน่ชัดจนเต็มภาชนะแล้วปาดผิวให้เรียบ และนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำไปคำนวณหาความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จำนวนตัวอย่างลำต้นมันสำปะหลังในการศึกษาจำนวน 20 ตัวอย่าง ของแต่ละอนุภาคที่ผ่านตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm มีหน่วยเป็น kg m^{-3}

- ความคงทนเชื้อเพลิงอัดเม็ด

สำหรับการหาความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เพื่อเป็นข้อมูลในการจัดการขนส่ง การเคลื่อนย้ายจะมีเม็ดชีวมวลบางส่วนแตกและบางส่วนสึกกร่อน (Tabil and Sokhansani, 1996) ซึ่งค่าความคงทนคุณภาพที่ดีต้องไม่น้อยกว่า 80% ระดับปานกลาง 70-80% และระดับต่ำสุดน้อยกว่า 70% (colley et al., 2006) จะทำการนำตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้แต่ละขนาด ชั่งน้ำหนักก่อนเข้าเครื่องทดสอบความทนทาน ที่ความเร็วรอบ 35 rpm ใช้เวลา 5 min ในการทดสอบ (Figure 10) เสร็จแล้วนำตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบร่อนแยกเม็ดเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ด้วยตะแกรง 3 mm แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และนำค่าที่ได้มาหาความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยคำนวณจากสมการที่ 9

$$D_u = 100 \times \frac{WPW}{IW} \quad (9)$$

เมื่อ

D_u แทน ความคงทน, %

WPW แทน น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนร่อน, g

IW แทน น้ำหนักตัวอย่างที่ร่อนแล้วก่อนบรรจุ

ลงในกล่องทดสอบ, g



Figure 10 Durability index unit testing.

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องสับย่อยลำต้นมันสำปะหลัง

ผลการศึกษาเครื่องสับย่อยลำต้นมันสำปะหลังที่อัตราการป้อน 120 kg h^{-1} และความเร็วรอบ 1000 rpm พบว่าความสามารถเฉลี่ยของวัสดุที่ผ่านตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ

6 mm ได้ค่าเท่ากับ 8.48 25.17 29.18 และ 43.85 kg h^{-1} ตามลำดับ (Figure 11) และ%การสับย่อยเฉลี่ยได้ค่าเท่ากับ 14.90 36.63 40.52 และ 64.80% ตามลำดับ (Figure 11) จะเห็นได้ว่า ความสามารถ และ%การสับย่อยเฉลี่ยของวัสดุที่ผ่านตะแกรงคัดขนาด 3 mm น้อยที่สุดเนื่องจาก การสับย่อยด้วยตะแกรงขนาดเล็ก ต้องใช้พลังงานมากกว่าและใช้เวลานานกว่าในการบดให้ละเอียดพอผ่านตะแกรงได้ ส่งผลให้ต้องใช้เวลาลับช้า จึงลดอัตราการผลิตจริงลง อีกทั้งลำต้นมันสำปะหลังมีความชื้นสูง (60% w.b.) และมีเส้นใยเหนียว ทำให้เกิดการอุดตันรูตะแกรง โดยเฉพาะตะแกรงที่มีรูขนาดเล็ก ซึ่งต่างจากตะแกรงขนาดใหญ่ ที่วัสดุสามารถผ่านรูตะแกรงได้ง่ายขึ้น

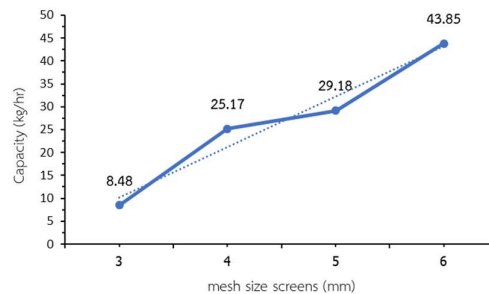


Figure 11 Relationship between mesh size of screens and working capacity.

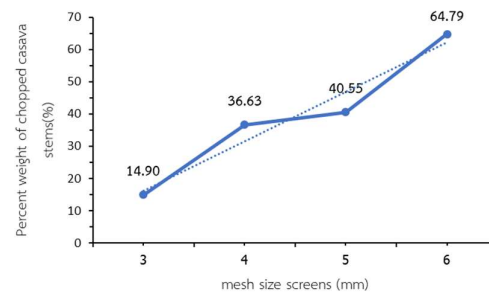


Figure 12 Relationship between mesh size of screens and percent weight of reducing size.

- ผลสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

สัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิติพบว่า แผ่นไม้จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิติเฉลี่ยมากที่สุด ตามมาด้วยแผ่นเหล็ก แผ่นสังกะสี และแผ่นพลาสติก ซึ่งสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิติจะมีค่าแปรผันตามกับมุมการไหลวัสดุ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิติมาก มุมการไหลก็จะมากตามด้วย (Baryeh, 2002) (Figure 13)

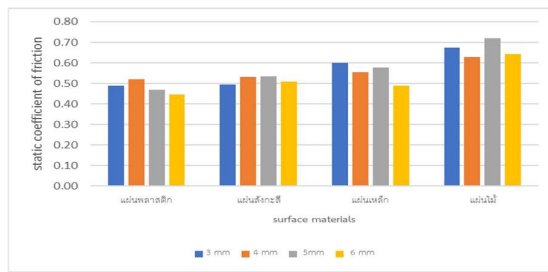


Figure 13 Relationship between mesh size screens and static coefficient of friction.

- ผลความหนาแน่นรวมลำต้นมันสำปะหลังสับย่อย

จากผลการศึกษาความหนาแน่นรวมลำต้นมันสำปะหลังสับย่อย พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm ตามลำดับ (Haruna and Afzalb,2016) เนื่องจากอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสน้อยลงจึงทำให้มีความหนาแน่นรวมน้อยลงด้วย (Figure 14)

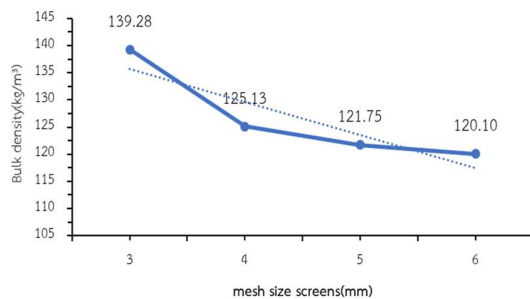


Figure 14 Relationship between mesh size of screens and bulk density.

- ผลมุกองลำต้นมันสำปะหลังสับย่อย

ผลการหามุกองลำต้นมันสำปะหลังสับย่อยรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm เท่ากับ 41.25 44.29 45.80 และ 50.70 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดตะแกรงคัดขนาด (Figure 15) เนื่องจากวัสดุขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้วัสดุมีความสามารถในการยึดเกาะได้ดีกว่าวัสดุที่มีอนุภาคเล็กซึ่งมีลักษณะผิวเรียบลื่นจึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันต่ำ และผลนี้สอดคล้องกับสมการที่ 3 เพราะอนุภาคขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัส และแรงเสียดทานสถิตมากกว่า ทำให้ต้องยกพื้นผิวให้เอียงมากกว่าจึงจะเริ่มไหลได้

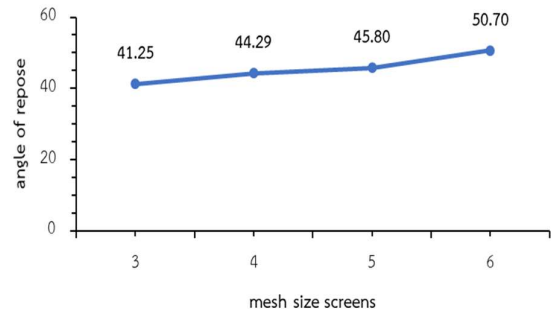


Figure 15 Relationship between mesh size of screens and angle of repose.

- ผลขนาดเฉลี่ยของอนุภาค และค่าโมดูลัสความละเอียด

จากผลการศึกษาค่าโมดูลัสความละเอียด พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm เนื่องจากวัสดุมีอนุภาคขนาดเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสความละเอียดก็จะเพิ่มขึ้นตาม และจากผลการศึกษาขนาดเฉลี่ยของอนุภาค พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm เนื่องจากวัสดุมีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นขนาดเฉลี่ยของอนุภาคก็จะเพิ่มขึ้นตาม เช่นเดียวกัน Table 1

Table 1 Geometric mean diameters and fineness modulus of cassava stems.

Mesh size of screens (mm)	F.M.	Geometric mean diameter (mm)
3	3.67	1.32
4	4.13	1.83
5	4.23	1.96
6	4.56	2.45

3.2 ผลการทดสอบเครื่องอัดเม็ดชีวมวล

จากผลการศึกษาความสามารถการอัดเม็ดลำต้นมันสำปะหลัง พบว่าที่รูตะแกรงคัดขนาด 5 mm มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 61.49 kg h⁻¹ เนื่องจากอนุภาคขนาด 5 mm มีความสมดุลระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสและขนาดอนุภาค ทำให้เครื่องอัดเม็ดสามารถป้อนและอัดได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอุดตัน อีกทั้งอนุภาคขนาด 5 mm ไม่เล็กเกินไปจนเพิ่มแรงเสียดทานในเครื่อง และไม่ใหญ่เกินไปจนบดอัดยาก ทำให้ประหยัดพลังงานและเวลาในการผลิต จึงเป็นขนาดที่เหมาะสมกับเครื่องอัด และค่าน้อยสุดเท่ากับ 22.30 kg h⁻¹ ที่รูตะแกรงคัดขนาด 6 mm มีขนาดอนุภาคใหญ่เกินไป (Figure 16) และเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปที่รูตะแกรง 4 mm มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 98.89% และค่าน้อยสุดเท่ากับ 83.96% มีขนาดเล็กทำให้สามารถอัดได้ดีขึ้น (Figure 17) เนื่องจาก อนุภาคขนาด 4 mm มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพียงพอสำหรับการจับตัวกันระหว่างการอัดเม็ด ทำให้เกิดการยึดเกาะของอนุภาคได้ดี โดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน และอนุภาคขนาด 4

mm มีเปอร์เซ็นต์ฝุ่นผงต่ำ (ฝุ่นค้างเพียง 1.95%) ทำให้ได้เม็ดเชื้อเพลิงสมบูรณ์เกือบทั้งหมด ดังนั้นหากต้องการปริมาณการผลิตสูงให้เลือกตะแกรง 5 mm และหากต้องการคุณภาพเม็ดและประสิทธิภาพการขึ้นรูปให้เลือกตะแกรง 4 mm

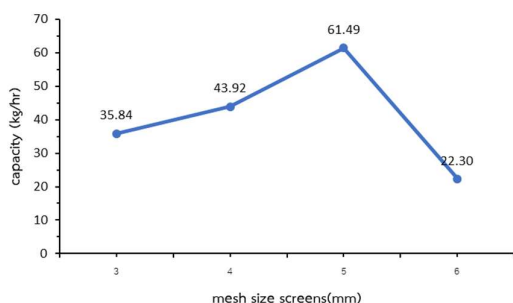


Figure 16 Relationship between mesh size of screens and capacity of the pellets machine.

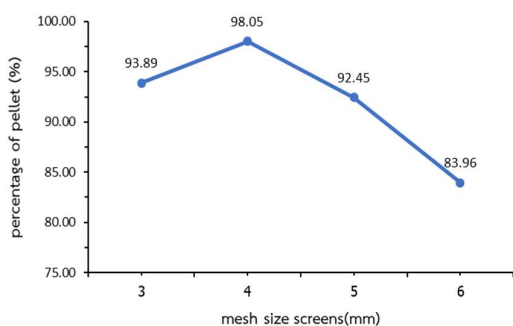


Figure 17 Relationship between mesh size of screens and percentage of pellet formation.

3.3 ผลการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุลำต้นมันสำปะหลังหลังการอัดเม็ด

ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของลำต้นมันสำปะหลังอัดเม็ด (Figure 18) เมื่อวางบนวัสดุรองรับ พบว่าแผ่นพลาสติกมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมากที่สุดที่ตะแกรงคัดขนาด 4 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.60 และน้อยสุดที่ตะแกรงคัดขนาด 3 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.53 แผ่นสังกะสีมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมากที่สุดที่ตะแกรงคัดขนาด 5 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.59 และน้อยสุดที่ตะแกรงคัดขนาด 3 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.54 แผ่นเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมากที่สุดที่ตะแกรงคัดขนาด 6 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.57 และน้อยสุดที่ตะแกรงคัดขนาด 4 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.59 และแผ่นไม้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมากที่สุดที่ ตะแกรงคัดขนาด 5 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.59 และน้อยสุดที่ตะแกรงคัดขนาด 4 mm เฉลี่ยเท่ากับ 0.56

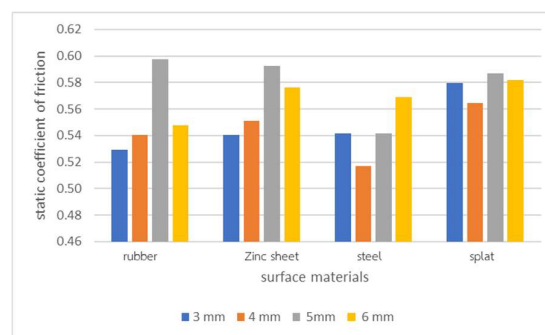


Figure 18 Relationship between mesh size of screens and static coefficient of friction.

- ผลมุมกองเม็ดเชื้อเพลิง

ผลการหามุมกองลำต้นมันสำปะหลังอัดเม็ด (Figure 19) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามรูตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm แต่ไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวัสดุขนาดเม็ดเชื้อเพลิงมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และที่รูตะแกรงคัดขนาด 6 mm การขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงไม่ค่อยดี จึงทำให้ความสามารถในการยัดเกาะมากกว่าขนาด 5 4 และ 3 mm ตามลำดับ

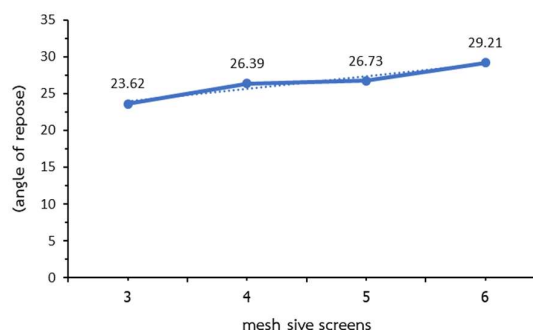


Figure 19 Relationship between mesh size of screens and angle of repose of pellets.

- ผลการทดสอบสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อทราบถึงรูปร่างลักษณะเม็ดเชื้อเพลิงตามมาตรฐานเม็ดเชื้อเพลิง ดังแสดง Table 2

Table 2 Pellet dimension and weight results.

Mesh Size Screens (mm)	Diameter (mm)	Length (mm)	Weight of Pellet (g)
3	6.05	25.37	0.94
4	6.04	25.59	0.96
5	6.02	25.21	0.82
6	5.99	25.37	0.84

จากผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่เลือกสุ่มเท่ากัน พบว่าขนาดเม็ดเชื้อเพลิงที่

สมบูรณ์ เป็นไปตามมาตรฐานเม็ดเชื้อเพลิงทุกขนาด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2560)

- ผลความหนาแน่นจริงเชื้อเพลิงอัดเม็ด

จากผลการศึกษาความหนาแน่นจริงเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่า รุตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 1274.05 1274.57 1273.75 และ 1323.76 kg m⁻³ ตามลำดับ และพบว่าที่รุตะแกรงคัดขนาด 6 mm นั้นมีค่าเท่ากับ 1323.76 kg m⁻³ (Figure 20) ซึ่งใหญ่จึงทำให้ลูกกลิ้งบดอัดหลายรอบกว่าออกมาเป็นเม็ดทำให้มีค่าความหนาแน่นสูงแต่ก็ส่งผลกระทบต่อความสามารถของเครื่องตำลง

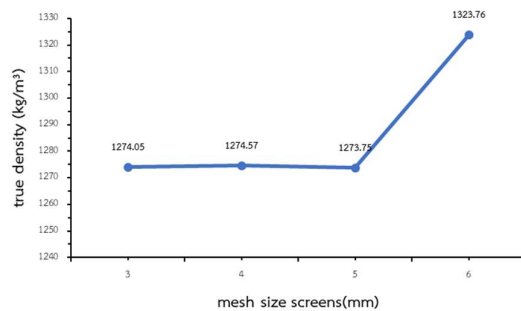


Figure 20 Relationship between true density and mesh size of screens.

- ผลความหนาแน่นรวมลำต้นมันสำปะหลังอัดเม็ด

จากผลการศึกษาความหนาแน่นรวมเชื้อเพลิงอัดเม็ด ตามรุตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm มีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 689.87 652.21 664.79 และ 651.27 kg m⁻³ ตามลำดับ พบว่าที่รุตะแกรงคัดขนาด 3 mm มีความหนาแน่นรวมมากที่สุด และขนาดอื่น ๆ นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน Table 3 ซึ่งผ่านคุณลักษณะเชื้อเพลิงที่ต้องการตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด

Table 3 Pellet bulk density results.

Mesh Size Screens	Cylindrical Container (cm ³)	Weight (kg)	Bulk Density (kg m ⁻³)
3	1000	0.69	689.87
4	1000	0.66	652.21
5	1000	0.66	664.79
6	1000	0.65	651.27

- ผลความคงทนเชื้อเพลิงอัดเม็ด

จากผลการศึกษาความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm เท่ากับ 98.39 98.25 93.53 และ 90.86% ตามลำดับ มีแนวโน้มลดลง (Figure 20) เนื่องจากที่รุตะแกรงคัดขนาด 3 และ 4 mm นั้นมีการขึ้นรูปเหมาะสมได้มากกว่ารุตะแกรงคัดขนาด 5 และ 6 mm ความคงทนเม็ดเชื้อเพลิงจึงมากตามด้วย

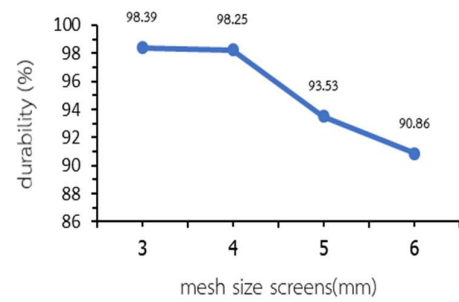


Figure 20 Relationship between durability and mesh size of screens.

4 สรุป

จากการศึกษาขนาดลำต้นมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรงคัดขนาด 3 4 5 และ 6 mm ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

ผลการทดสอบเครื่องสับย่อยลำต้นมันสำปะหลัง พบว่า ตะแกรงคัดขนาด 6 mm ให้ความสามารถในการสับย่อยสูงสุดที่ 43.85 kg h⁻¹ และมีเปอร์เซ็นต์การสับย่อยสูงสุดที่ 64.80% ผลการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมลำต้นมันสำปะหลัง ได้ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุหลังการสับย่อยสูงสุดที่ 139.28 kg m⁻³ เมื่อใช้ตะแกรงขนาด 3 mm และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคและค่าโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นตามขนาดตะแกรง โดยมีค่าสูงสุดที่ 2.45 mm และ 4.65 mm ตามลำดับ สำหรับตะแกรงขนาด 6 mm

ผลการศึกษาเครื่องอัดเม็ดชีวมวลจากลำต้นมันสำปะหลัง ได้ค่าความสามารถในการอัดเม็ดสูงสุดที่ 61.49 kg h⁻¹ เมื่อใช้ตะแกรงขนาด 5 mm และ%การขึ้นรูปของเม็ดเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 98.05% สำหรับตะแกรงขนาด 4 mm คุณลักษณะของเม็ดเชื้อเพลิงพบว่า เม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6 mm และความยาวเฉลี่ย 25 mm ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ความหนาแน่นจริงของเม็ดเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 1,323.76 kg m⁻³ สำหรับตะแกรงขนาด 6 mm ความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 689.87 kg m⁻³ สำหรับตะแกรงขนาด 3 mm และความคงทนของเม็ดเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 98.39% และ 98.25% สำหรับตะแกรงขนาด 3 และ 4 mm ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ลำต้นมันสำปะหลังที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยพิจารณาจากการทดสอบสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ด เทียบจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด และพิจารณาจากสมรรถนะเครื่องสับย่อย และเครื่องอัดเม็ดชีวมวลพบว่า ขนาดรุตะแกรงคัดขนาด 3 และ 4 mm ซึ่งเป็นขนาดที่ผ่านมาตรฐานทุกค่าที่ศึกษา (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2560) โดยตะแกรงคัดขนาด 4 mm เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด เนื่องจากให้สมดุลระหว่างประสิทธิภาพการสับย่อย การอัดเม็ด

และสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงที่ตรงตามมาตรฐาน ดังนั้น การเลือกขนาดตะแกรงควรคำนึงถึงวัตถุประสงค์การใช้งานเป็นหลัก หากเน้นปริมาณการผลิตให้เลือกตะแกรงขนาด 5 mm แต่หากเน้นคุณภาพเม็ดเชื้อเพลิงให้เลือกตะแกรงขนาด 4 mm ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับขนาดอนุภาคของลำต้นมันสำปะหลังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมพลังงานชีวมวลต่อไป

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น โปรแกรมช่างกลเกษตร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเกี่ยวเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6 เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2563. www.dede.go.th เข้าถึงได้ จาก: 5 มิถุนายน 2564
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิต พลังงานทดแทนชุดที่ 4 พลังงานชีวมวล. แหล่งข้อมูล: www.dede.go.th. เข้าถึงเมื่อ: 21 เมษายน 2564.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). 2560. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (มอก. 2772-2560). แหล่งข้อมูล: <https://www.tisi.go.th>. เข้าถึงเมื่อ: 5 ตุลาคม 2564.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2557. โครงการศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงานทดแทนใน ภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจการค้า. แหล่งข้อมูล: URL: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib15424FinalReport.pdf>. เข้าถึงเมื่อ: 4 ตุลาคม 2564.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2563. มันสำปะหลังโรงงาน. แหล่งข้อมูล: <https://www.oae.go.th>. เข้าถึงเมื่อ: 2 เมษายน 2564.
- สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงานกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต. แหล่งข้อมูล: http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib15106_รายงานฉบับสุดท้าย.pdf. เข้าถึงเมื่อ: 20 เมษายน 2564.
- ASAE Standards, 52 nd Ed. 2006. s 358, 2 1: 1 measurement forages.st joseph, MI: AABE
- Colley, Z., Fasina, O. O., Bransby, D. Y. Y. L., Lee, Y. Y. 2006. Moisture effect on the physical characteristics

- of switchgrass pellets. Transactions of the ASABE 49(6), 1845-1851.
- Baryeh, E. A. 2002. Physical properties of millet. Journal of food engineering 51(1), 39-46.
- Lam, P. S., Sokhansanj, S. 2014. Engineering properties of biomass. Engineering and science of biomass feedstock production and provision, 17-35.
- Shastri, Y., Hansen, A. C., Rodríguez, L. F., Ting, K. C. 2014. Systems informatics and analysis. Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision, 195-232.
- Lubwama, M., Yiga, V. A., Muhairwe, F., Kihedu, J. 2020. Physical and combustion properties of agricultural residue bio-char bio-composite briquettes as sustainable domestic energy sources. Renewable energy 148, 1002-1016.
- Noorfidza Y Haruna, Muhammad T Afzalb. 2016. Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. Procedia Engineering 148, 93-99.
- Whittaker, C., Shield, I. 2017 Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 71, 1-11.
- Tabil Jr, L., Sokhansanj, S. 1996. Process conditions affecting the physical quality of alfalfa pellets. Applied Engineering in Agriculture 12(3), 345-350.