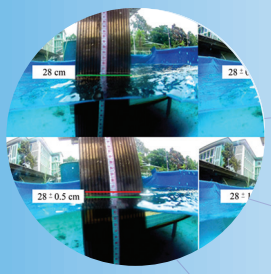
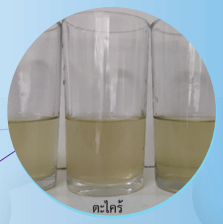
วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2565





วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เน้นบทความทางด้าน Physical Sciences ในสาขาวิชา Chemistry, Engineering, Materials Science, Environmental Science และ Mathematics บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญอย่างน้อย 3 ท่าน แบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064
E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน
ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม
ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม
ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป
ยกเลิกการตีพิมพ์รูปเล่มตั้งแต่ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2562 เป็นต้นไป เผยแพร่ออนไลน์เท่านั้น

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	ดุลย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	จังหวัดฉะเชิงเทรา
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัศวสุขี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ กาญจนา	ตันสุวรรณรัตน์	จังหวัดนครราชสีมา
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ	วงค์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ่นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนากร	ภูเงินขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาววลีรักษ์	ศรีศิลป์ไชย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

Table of Contents

Evaluation of Physical, Health Promoting Properties and Storage Stability of Ready-to-Drink Mixed Tea from Riceberry Rice and Mulberry Leaf

Paradorn Ngamdee[1*]

Received: *July 20, 2022;* ***Revised:*** *September 25, 2022;* ***Accepted:*** *September 26, 2022*

Abstract

This study aimed to present the development of healthy ready-to-drink (RTD) tea from Riceberry rice tea infusion (RBTI) and mulberry leaf green tea infusion (MGTI). The color of RBTI was red with a positive a* value (8.1) due to the anthocyanins which were found only in RBTI. The MGTI color was pale green with a positive b* value (12.9). Four formulas of the RTD mixed teas were prepared by varying the ratio of RBTI:MGTI at 50:50, 60:40, 70:30, and 80:20 v/v. The color of the RTD mixed teas changed toward red pertaining to the content of RBTI. As the ratio of RBTI increased, the anthocyanin content in the RTD mixed teas increased. As a result, the 80:20 formula had a higher anthocyanin content (14.4 mg/L). However, total phenolic content (14.3 - 15.6 mg GAE/L) and DPPH antioxidant activity (49.2 - 52.9 %) of all four formulas changed insignificantly. The sensory test results indicated that 70:30 and 80:20 formulas received high liking scores on bitterness, overall flavor, and overall liking attributes. The 80:20 formula was selected as the most preferable formula in this study because of its high anthocyanin content. The evaluation of the storage stability of the 80:20 formula revealed that the color, total soluble solid content, anthocyanin, phenolic content, and DPPH antioxidant activity of the tea changed significantly on day 15. These results indicated that the RTD mixed tea from Riceberry rice and mulberry leaf was a healthy tea with consumer acceptance and adequate storage stability.

Keywords: Rice Tea; Riceberry; Mulberry Leaf Green Tea; Ready-to-Drink; Antioxidant

[1] *Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi Province*
[*] *Corresponding Author, Tel. 09 4601 0222, E - mail: paradorn.n@lawasri.tru.ac.th*

Introduction

In Thailand, ready-to-drink tea drinks are wildly accepted due to the belief that they possess health-promoting properties. Recently, a limited type of ready-to-drink tea product is available in the market: green tea, black tea, flower tea, and rice tea. According to Thai community product standards, teas are defined as the product produced from the plant *Camellia sinensis* [1]. However, 201 plants are considered tea according to the Ministry of Public Health Notification [2]. The plants listed by this notification include fruits (e.g., Bael fruit, lime, bitter orange, etc.), flowers (e.g., Rose mallow, Torch ginger, Reishi, etc.), stems (e.g., Jaiogulan, wild leek, Welsh onion, etc.), seeds (spiny amaranth, Ethiopia oat, rice, etc.), leaves (coffee, buko, mulberry, etc.), roots (carrot, beetroot, chicory, etc.) [2]. Among these plants, mulberry and rice teas are wildly available in Thailand.

Mulberry (*Morus alba* L.) leaves have been used to treat human illnesses such as colds, diabetes, and other diseases [3]. In recent years, mulberry leaves are commercially available as tea and drink products in China, Japan, Thailand, and other Asian countries [3]. The health benefits of mulberry leaf reported relate to the high content of bioactive compounds, including phenolic acids and flavonoids. However, Angki, T. A., Saikim, F. H., Dawood, M. M., Ahmad, A. H., Godoong, E., Mahyudin, A., Bagul, A. H. B. P., Matanjun, P. C., Noor, N. Q. I. M., Janaun, J. A., Neoh, Y. Y., Sirinus, E., and Gibin, G. [4] reported that pure mulberry leaf tea drink received only slightly like level of taste and aroma attributes. This could indicate the unpleasant sensory characteristics of the mulberry leaf tea. Thus, diluting or mixing mulberry leaf tea with other tea could elevate consumer acceptance.

Rice tea is a common beverage in Japan and Korea. Hyeonmi-cha is a Korean rice tea made from roasted brown rice [5]. Brown rice is a common raw material for producing rice tea. Recently, the health benefit of black rice (or purple rice) has been reported. Black rice contains anthocyanins that show multiple inhibitory effects against chronic diseases: cardiovascular diseases, cancers, diabetes, visual health, obesity, and antimicrobial effects [6]. For this reason, the development of and studies on black rice tea have been performed. Wu, L., Zhai, M., Yao, Y., Dong, C., Shuang, S., and Ren, G. [7] prepared black rice tea and studied the effect of tea processing on the nutritional compositions and anthocyanin content. Germinated black rice tea was developed by Noosing, S., Mundee, P., and Leelawat, B. [8]. Riceberry rice, a non-glutinous black rice, has been widely cultivated throughout Thailand as it has superior health benefits to common brown rice [9].

Mixed green tea and rice tea is common in Japan. Genmaicha is a Japanese style rice tea in which roasted brown rice is mixed with green tea [10]. Ready-to-drink mixed tea products of rice tea and other tea leaves are currently available in the market in Thailand. However, the optimum ratio between rice tea and leaf tea needs to be studied as it affects consumer preferences [11] and also alters the profile of the bioactive compounds in the mixed tea.

This study involved the preparation of mulberry leaf green tea and Riceberry rice tea and their physical and chemical properties analysis. These teas were used to prepare ready-to-drink mixed teas by varying the ratio of the Riceberry rice tea infusion to the mulberry leaf tea infusion. The changes in the physical, chemical, and antioxidant properties of the mixed

ISSN 2672-9369 (Online)

teas was studied. The sensory study on these mixed teas was also performed to evaluate consumer preference. The storage stability of the selected final tea product was evaluated.

Materials and Methods

1. Preparation of the Riceberry rice tea

Organic Riceberry rice sample was obtained from a small local rice mill in Kok-Charoen village, Kok-Charoen Sub-district, Lopburi Province, Thailand. The rice grains (200 g) were roasted in a heated (170 - 210 ^{o}C) iron pan until they were partially popped and produced an aroma [7]. The Riceberry rice tea (RBT) was vacuum stored in a plastic laminated bag.

2. Preparation of mulberry leaf green tea

Mulberry leaves of the Sakon-Nakorn cultivar were obtained from the Organic Farmer Group of Tambon Nong-Pak-Wanne of Thaluang Sub-district, Lopburi Province, Thailand. The preparation of the mulberry leaf green tea (MGT) was conducted using the method described by Wongcharoenkit, S., Nawanukor, P., Kaewrueng, W., and Weerasopon, P. [12]. Briefly, mulberry leaves were cleansed with tap water and drained. The leaves were cut across by a stainless-steel knife yielding leaf strips with a width of approximately 0.5 cm. These leaves were blanched in boiling water for 30 seconds and let to cool down to room temperature. They were kneaded and curled in a heated pan (60 - 70 ^{o}C) for 20 min yielding bruised and slightly dried leaves. The leaves were then dried using a tray-dry at 80 ^{o}C until the moisture content was below 8 %w/w. The obtained mulberry leaf green tea was vacuum stored in a plastic laminated bag.

3. Development of ready-to-drink mixed tea from RBT and MGT

The mixed tea drinks were developed by increasing the ratio of the RBT to the MGT, 50:50, 60:40, 70:30, and 80:20 v/v, to promote the health benefit of the anthocyanin from RBT. Both tea stocks were prepared using the same procedure. To prepare 1 L of the tea infusion stocks, 50 g of MGT was used to produce MGT infusion (MGTI) while 250 g of RBT was used to produce RBT infusion (RBTI). The tea was extracted by infusing the tea in 90 - 95 ^{o}C water for 5 min and then filtering the residue. The tea stocks were kept in glass bottles with screw-capped and let to cool down to room temperature before being stored in a refrigerator at 4 ^{o}C.

4. Physical property analysis

Color parameters in the CIE L*a*b* system of the raw materials, the tea samples, and the tea drinks were measured using a colorimeter (MiniScan XE Plus, Hunter Associates Laboratory, Inc., Reston, VA, USA). At least three replicate measurements were performed.

The moisture content was analyzed using the gravimetric method AOAC 934.01 [13]. The sample (2 g) was weighed in an aluminum moisture can and dried in an electric hot air oven (ShelLab 1375 FX Forced Air Oven, Sheldon Manufacturing, Inc.) at 105±2 ^{o}C until the weight of the solids changed insignificantly. The experiment was performed with three replications and the moisture was presented as the percentage of the sample weight loss after the drying.

The water activity (a_w) value was analyzed using the water activity meter (Aqua Lab 4TE, USA). The samples were crushed using a porcelain mortar before the analysis.

5. Determination of total anthocyanin content (TAC)

The anthocyanin in the Riceberry rice and RBT was extracted by using methanol: HCl (85:15 v/v) as a solvent [9]. The anthocyanin of RBTI was measured directly. The determination of TAC was performed using the pH differential method [14]. The major anthocyanin in black rice, cyanidin-3-*O*-glucoside, showed red color in KCl-HCl buffer solution pH 1.0 while showing colorless in the acetate buffer solution pH 4.5. This color change was measured for the absorbance at 510 nm using a spectrophotometer (Hitachi UH5300, Japan). The TAC was then calculated using Equation (1).

$$TAC = \frac{(A \times MW \times DF \times 1000)}{\varepsilon \times L} \quad (1)$$

Where $A = (A_{510} - A_{700})$ pH 1.0 - $(A_{510} - A_{700})$ pH 4.5), MW of cyanidin-3-glucoside (C3G) (449.2 g/mol), DF = dilution factor, ε = molar absorptivity (26,900 L/mol•cm) and L = path length (1.0 cm).

6. Determination of total phenolic content (TPC)

The bioactive compounds from the raw materials and the teas were extracted by following the procedure of Jiamyangyuen, S., Nuengchamnong, N., and Ngamdee, P. [9], in which the acidified methanol (methanol:HCl = 85:15 v/v) was used as a solvent. The TPC was determined using the Folin-Ciocalteau reagent [9]. The methanolic extracts or tea infusions (0.1 mL) were mixed with the Folin-Ciocalteau reagent (0.5 mL) and left to react in the dark or 5 min. A 1.5 mL of 7.5 % sodium carbonate solution was added and mixed well before 5 mL of distilled water was added. The mixture was measured at 765 nm using a spectrophotometer (Hitachi UH5300, Japan). The calibration curve was plotted with a series of gallic acid dilutions. The TPC was reported as milligram gallic acid equivalent (GAE) per 100 g sample weight or mg GAE/L.

7. Determination of DPPH antioxidant activity

For the determination of DPPH antioxidant activity, the methanolic extracts of the raw materials and the teas were used while the tea drinks were used directly without treatment. The DPPH antioxidant activity was determined by following the method described by Jiamyangyuen, S., Nuengchamnong, N., and Ngamdee, P. [9]. The sample solution (50 µL) was mixed with 100 µM 2,2-diphenyl-1-1-picrylhydrazyl (DPPH) solution (2 mL) and left to react for 30 min in the dark. The absorbance of the solution was measured at 515 nm using a spectrophotometer (Hitachi, UH5300, Japan). The antioxidant capacity was calculated as the percentage scavenging of DPPH against the blank (DPPH reagent without sample).

8. Preparation of ready-to-drink (RTD) mixed tea

The preparation of the RTD mixed tea was performed by following the description of Baek, N., Kim, Y., Duncan, S., Leitch, K., and O'Keefe, S. [15]. For each formula of the

ISSN 2672-9369 (Online)

mixed tea, fifteen clean glass bottles (280 mL each) were washed and sanitized by immersing into boiling water for 10 min and then air-dried. The previously prepared mixed tea (5 L) was heated to 90 ^{o}C for 5 min. The hot RTD mixed tea was filled hot into the bottles and capped before they were placed upside down for 2 min. The filled bottles were subsequently immersed in an ice-water bath.

9. Sensory evaluation

The sensory characteristics of the RTD mixed teas were evaluated using the 9-point hedonic scale method. Fifty panelists (18 - 35 years of age) who drink a type of ready-to-drink tea at least once in a week were selected. Six sensory attributes, color, clarity, bitterness, overall flavor, aftertaste, and overall liking, were evaluated as described by Vittayaporn, V., Chompreeda, P., Haruthaithanasan, V., and Rimkeeree, H. [11]. The RTD mixed teas at 4 ^{o}C was served (100 mL) in white plastic cups along with drinking water (room temperature) for mouth rising. The tea was served to the panelists within 1 min after the preparation. Each panelist evaluated 4 samples marked with a 3-digit random number.

10. Storage stability analysis

The RTD mixed teas were stored in a refrigerator at 4 ^{o}C for 20 days. The properties including color, total soluble solid content (TSS) (Atago PAL-3, Atago, Japan), TAC, TPC, and DPPH, of the RTD mixed teas, were analyzed every 5 days.

11. Statistical analysis

The data were expressed as means±standard deviation (SD). Statistical analysis was performed using a statistical analysis software and the analysis of variance was assessed using One-Way ANOVA with completely randomized design (CRD). The differences of the mean values were established by Duncan's new multiple range test at 95 % confidence level ($p \leq 0.05$).

Results

1. Riceberry rice tea (RBT) and mulberry leaf green tea (MGT)

When roasted, RBT had the appearance of popped rice grains (Figure 1(a)). The MGT appeared dry and the color was dark green as shown in Figure 1(b). These teas were used to prepare the tea infusion stocks for developing ready-to-drink mixed tea of RBT and MGT.

(a) RBT (b) MGT

Figure 1 Physical appearance of Riceberry rice tea (RBT) and mulberry leaf green tea (MGT)

2. Physicochemical and chemical properties of RBT and MGT

Roasting significantly decreased the moisture of the unpolished Riceberry and the mulberry leaves by approximately 42 % and 89 %, respectively, resulting in the final moisture of the RBT and MGT being 7.1 % and 7.5 % (Table 1), respectively. The a_w value of RBT (0.42) changed insignificantly ($p > 0.05$) compared to that of the unpolished Riceberry (0.47). On the other hand, the a_w value of mulberry leaves (0.74) largely decreased by approximately 58 % after the leaves were roasted to produce MGT.

Table 1 Physical and chemical properties of unpolished Riceberry, fresh mulberry leaves, RBT and MGT

Sample	Moisture (%)	a_w	Color			TAC (mg/100 g)	TPC (mg GAE /100 g)
			L*	a*	b*		
Unpolished Riceberry	12.3±0.2^a	0.47±0.12^a	50.6±2.4^a	8.3±1.0^a	14.4±1.0^a	34.0±2.1^a	175.1±4.4^a
RBT	7.1±0.2^b	0.42±0.03^a	33.3±1.1^b	5.1±0.3^b	5.8±0.9^b	5.4±0.9^b	7.4±0.7^b
Fresh mulberry leaves	67.1±1.7^a	0.74±0.18^a	38.1±1.8^a	-8.1±1.0^a	14.7±3.2^b	*nd*	2,443±27^a
MGT	7.5±0.4^b	0.31±0.08^b	21.1±2.2^b	-11.7±2.0^b	24.8±7.9^a	*nd*	1,297±46^b

nd = not detected, Means±sd in the same column of the same type of tea (rice or mulberry leave) with the same superscript letter are not significantly different (p>0.05)

The color parameters of the unpolished Riceberry and fresh mulberry leaves changed significantly after they were processed into the corresponding teas. The lightness (L*) of the unpolished Riceberry (50.6) and fresh mulberry leaves (38.1) significantly decreased ($p \leq 0.05$) as they were roasted to produce RBT (33.3) and MGT (21.1), respectively. The positive a* value (8.3) indicated the redness of the unpolished Riceberry. This redness significantly ($p \leq 0.05$) decreased to 5.1 in RBT. The a* value of the fresh mulberry leaves was negative (-8.1) indicating the green color of the material. When it was roasted to produce MGT, the a* value decreased ($p \leq 0.05$) to -11.7 indicating the dark green color of the tea. The b* values of the unpolished Riceberry, fresh mulberry leaves, and the teas were positive indicating the yellow color tone of the material. The b* value of the unpolished Riceberry (14.4) decreased significantly ($p \leq 0.05$) in the RBT (5.8). On the contrary, the b* value of the fresh mulberry leaves (14.7) significantly ($p \leq 0.05$) increased in MGT (24.8).

Total anthocyanin content was detected only in the Riceberry raw rice and RBT. The TAC value of the unpolished Riceberry (34.0 mg/100 g) was approximately 6.3 times higher than that of the RBT (5.4 mg/100 g). The anthocyanin content in black rice could vary depending on the cultivars. Some studies reported TAC values of black rice at 37 mg/100 g dw [9] and approximately 30 mg/100 g [16]. The TAC in the heat-treated black rice is c

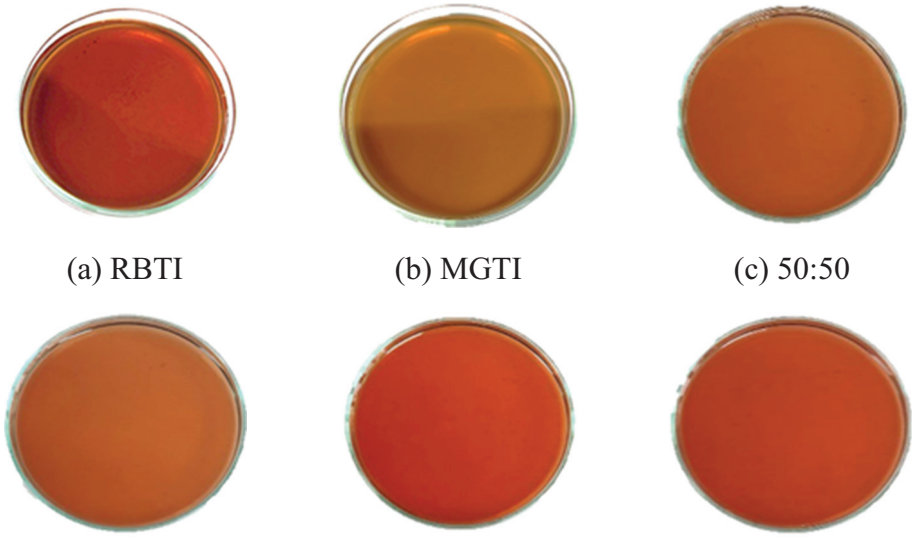
ISSN 2672-9369 (Online)

generally lower than that of the raw material. Arora, S., Virdi, I. K., Sharanagat, V. S., Kheto, A., Dhua, S., Suhag, R., Kumar, R., Kumar, Y., and Patel, A. [16] reported that the TAC values of black rice roasted using microwave powder ranged from approximately 3 to 9 mg/g.

Total phenolic content was found in both Riceberry and mulberry leaves and the corresponding teas. The TPC of the unpolished Riceberry was 175.1 mg GAE/100 g and reduced to 7.4 mg GAE/100 g in RBT. The TPC values in black rice were reported by Jiamyangyuen, S., Nuengchamnong, N., and Ngamdee, P. [9] (116 mg GAE/100 g) and Arora, S., Virdi, I. K., Sharanagat, V. S., Kheto, A., Dhua, S., Suhag, R., Kumar, R., Kumar, Y., and Patel, A. [16] (148 mg GAE/100 g). Arora, S., Virdi, I. K., Sharanagat, V. S., Kheto, A., Dhua, S., Suhag, R., Kumar, R., Kumar, Y., and Patel, A. [16] also reported TPC values of roasted black rice to be as low as 51.75 mg GAE/100 g. The TPC value of the fresh mulberry leaves (2,443 mg GAE/100 g) was higher than that of MGT (1,297 mg GAE/100 g). Yu, Y., Li, H., Zhang, B., Wang, J., Shi, X., Huang, J., Yang, J., Zhang, Y., and Deng, Z. [3] reported TPC content in 19 varieties of mulberry leaves which ranged from 887 to 2,026 mg/100 g dw. The tea processing significantly reduced the TPC value of the mulberry leaves. Wanyo, P., Siriamornpun, S., and Meeso, N. [17] reported the TPC value of a commercial mulberry leaf tea which was approximately 1,500 mg GAE/g dw.

3. The appearance of RBTI and MGTI and the ready-to-drink mixed teas

The stocks of the RBTI (Figure 2(a)) and MGTI (Figure 2(b)) were used to prepare the ready-to-drink mixed tea by varying the ratio of RBTI:MGTI (v/v) at 50:50, 60:40, 70:30, and 80:20. The appearance of these mixed teas is shown in Figures 2(c)-(f). As the ratio of RBTI was increased, the color of the mixed tea changed toward a red color which corresponded to the color of the RBTI.



(a) RBTI (b) MGTI (c) 50:50

(d) 60:40 (e) 70:30 (f) 80:20

Figure 2 Physical appearance of RBTI, MGTI, and the mixed tea of RBTI:MGTI (v/v) at 50:50, 60:40, 70:30, and 80:20

4. Physical and chemical properties

The color parameters of RBTI and MGTI were significantly different. For the RBTI, the a* and b* were both dominant while only b* was the major one for the MGTI. The positive a* (8.1) and b* (9.5) values (Table 2) indicated that the color of the RBTI was red which agreed with its appearance in Figure 1(a). The negative a* (-1.3) and positive b* (12.9) indicated that the color of MGTI was yellow. The color of the mixed tea changed with the ratio of RBTI and MGTI. The redness of the mixed tea increased significantly ($p \leq 0.05$) from 5.1 to 9.6 as the ratio of RBTI increased from 50 to 80. This increase in the redness of the mixed teas was contributed by the positive a* value of the RBTI. On the other hand, the yellowness of the mixed teas decreased sequentially from 15.8 to 9.9 with a decrease in the MGTI ratio due to yellow being the predominant color parameter of the MGTI. The L* values of RBTI, MGTI, and the mixed teas were in the range of 46.3 and 63.3, indicating that the tea color was rather dark.

Table 2 Physical and chemical properties of RBTI, MGTI and the mixed teas

RBTI: MGTI	Color parameter			TAC	TPC^{ns}	DPPH
	L*	a*	b*	(mg/L)	(mg GAE/L)	(%)
100:0	47.1±0.3^{de}	8.1±0.4^{b}	9.5±0.6^{c}	15.5±0.6^{a}	16.2±0.5	49.6±3.5^{a}
0:100	56.9±1.8^{b}	-1.3±0.2^{e}	12.9±0.2^{b}	*nd*	15.7±1.2	40.9±2.6^{b}
50:50	63.3±1.1^{a}	5.1±0.3^{d}	15.8±0.9^{a}	9.3±0.7^{e}	14.3±1.4	51.2±2.8^{a}
60:40	49.2±1.8^{cd}	7.4±0.5^{c}	12.5±0.6^{b}	12.1±0.5^{d}	14.8±0.8	52.9±1.9^{a}
70:30	46.3±1.3^{e}	8.4±0.2^{b}	10.7±0.4^{c}	13.2±0.4^{c}	15.6±0.7	50.0±1.2^{a}
80:20	51.2±1.7^{c}	9.6±0.5^{a}	9.9±0.9^{c}	14.4±0.7^{b}	15.1±1.2	49.2±2.4^{a}

ns = insignificantly different

nd = not detected, Means±sd in the same column with different superscript letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

Anthocyanin content in the stock RBTI was 15.5 mg/L (Table 2) while it was not detected in the MGTI. As a result, the TAC in the mixed teas increased consecutively from 9.3 to 14.4 mg/L with the increase of the RBTI proportion from 50 to 80. In the case of the phenolic content, the TPC values of RBTI, MGTI, and all four mixed teas were insignificantly different ($p > 0.05$) and ranged from 14.3 to 16.2 mg GAE/L. The DPPH antioxidant activity of the RBTI (49.6 %) was approximately 1.2 times higher ($p \leq 0.05$) than that of the MGTI (40.9 %). However, the DPPH antioxidant values of all mixed teas (49.2 - 52.9 %) were not significantly different ($p > 0.05$).

5. Sensory evaluation

The liking scores of the sensory characteristics of the RTD mixed teas with different proportions of RBTI: MGTI (50:50, 60:40, 70:30, and 80:20) are presented in Table 3. The color (6.3 - 7.5 scores) and clarity (7.3 - 7.6 scores) attributes of all four mixed teas were insignificantly different ($p > 0.05$). The bitterness of the 50:50 received the lowest liking score

ISSN 2672-9369 (Online)

(4.0 scores), however, it was insignificantly different from the score (5.1 scores) of the 60:40 formula. With higher proportions of RBTI, the 80:20 formula received the highest liking score (6.5 scores). Similarly, the 80:20 formula in which the RBTI ratio was higher than the MGTI received the highest ($p \leq 0.05$) liking score for the overall flavor (6.9 scores) and aftertaste (6.1 scores) attributes. The 80:20 formula was selected as the most preferable product. Although its color, TPC, DPPH activity and sensory properties were insignificantly different from the 70:30 formula, the 80:20 formula showed the highest TAC value indicating better health promoting value.

Table 3 Liking scores for sensory attributes of the mixed teas with different ratio of RBTI and MGTI

Sensory attribute (score)	RBTI:MGTI			
	50:50	**60:40**	**70:30**	**80:20**
Color^{ns}	7.4±0.9	7.5±0.9	6.9±0.9	6.3±1.0
Clarity^{ns}	7.6±0.8	7.5±0.6	7.3±0.9	7.4±0.9
Bitterness	4.0±0.9^{c}	5.1±0.7^{bc}	6.2±0.4^{ab}	6.5±0.4^{a}
Overall flavor	4.2±0.7^{c}	5.2±0.9^{bc}	6.4±0.8^{ab}	6.9±0.5^{a}
Aftertaste	4.1±0.8^{b}	4.0±0.9^{b}	6.0±0.8^{a}	6.1±0.8^{a}
Overall liking	4.0±0.9^{b}	4.2±0.5^{b}	6.6±1.0^{a}	6.9±0.4^{a}

ns = insignificantly different, Means±sd in the same row with different superscript letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

6. Properties of the RTD mixed tea during storage

The color of the RTD mixed tea containing RBT: MGTI at an 80:20 ratio decreased in intensity (Table 4). The tea showed an increase of lightness indicated by subsequently increasing ($p \leq 0.05$) of L* value at 10, 15, and 20 days of storage in which the L* values were 50.7, 57.2, and 60.2, respectively. The a* and b* values of the teas were stable after 5 days of storage. These color values showed a decreasing trend upon further storage. The tea stored at 15 days showed a lower a* value ($p \leq 0.05$) compared to the five-day-stored tea, however, it was insignificantly different ($p > 0.05$) from the ten-day-stored one. After the tea was stored for 20 days, it showed the lowest ($p \leq 0.05$) a* value at 7.3. The change in b* value showed almost the same decreasing trend as a* value (insignificant change ($p > 0.05$) after 10 days of storage). After that, b* values decreased to 8.6 and 7.0 on days 15 and 20, respectively. The total soluble solid content of the tea showed a decreasing trend during storage. The teas stored for five days and more showed significantly lower ($p \leq 0.05$) TSS values than that of the zero-day-stored one. The TSS values of the teas showed a decreasing trend upon further storage. However, the TSS values of the teas stored for 5 to 20 days were insignificantly different ($p > 0.05$).

Table 4 Physical and chemical properties of the mixed teas containing RBTI:MGTI at 80:20 ratio during storage

Day	Color			TSS	TAC	TPC	DPPH
	L*	a*	b*	(°Brix)	(mg/L)	(mg GAE/L)	(%)
0	45.2±1.2^{d}	10.1±0.6^{a}	11.0±0.5^{a}	0.30±0.06^{a}	14.3±0.1^{a}	15.2±0.1^{a}	53.4±1.3^{a}
5	46.9±1.4^{d}	10.5±0.9^{a}	10.2±1.0^{a}	0.27±0.06^{bc}	14.7±1.1^{a}	15.8±0.1^{a}	50.5±1.4^{ab}
10	50.7±1.1^{c}	9.3±0.7^{ab}	9.9±0.8^{ab}	0.23±0.01^{bc}	13.6±1.1^{a}	14.9±0.9^{a}	49.7±1.8^{b}
15	57.2±1.0^{b}	8.1±0.5^{bc}	8.6±0.9^{b}	0.20±0.06^{c}	10.7±1.2^{b}	12.8±0.7^{b}	35.3±1.5^{c}
20	60.2±0.7^{a}	7.3±0.6^{c}	7.0±0.8^{c}	0.18±0.01^{c}	9.6±0.5^{b}	10.0±0.3^{c}	34.4±1.9^{c}

Means±sd in the same column with different superscript letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

The total anthocyanin content of the teas changed insignificantly ($p > 0.05$) during ten days of storage in whereby the values ranged between 13.6 to 14.7 mg/L. On days 15 and 20 of storage, TAC decreased to the lowest values ($p \leq 0.05$) of 10.7 and 9.6 mg/L, respectively. The change in TPC value was almost on the same trend as that of the TAC value. During 10 days of storage, TPC values of the teas were stable ($p > 0.05$) with values of 14.9 to 15.8 mg GAE/L. On days 15 and 20 of storage, TPC values subsequently decreased ($p \leq 0.05$) to 12.8 and 10.0 mg GAE/L, respectively. The decrease in DPPH activity occured earlier than those of TAC and TPC. The DPPH activity of the five-day-stored tea (50.5 %) tended to decrease as compared to the zero-day-stored tea (53.4 %), however, the change was statistically insignificantly different ($p > 0.05$). After further storage for 10, 15, and 20 days, the DPPH activity of the tea decreased ($p \leq 0.05$) to 49.7, 35.3, and 34.4 %, respectively.

Discussion

1. Physical and chemical properties of RBT and MGT

The properties of the teas (Table 1), RBT and MGT changed significantly as affected by the heat processing. The moisture content of both teas (7.1 - 7.5 %) agreed with the standard values of dried mulberry for infusion (10 %) [18] or tea (8 %) [1] products. The RBT was darker compared to the raw material Riceberry rice as indicated by significantly ($p \leq 0.05$) lower L*, a*, and b* values. This decrease in color parameters was a result of roasting at a high temperature which developed color via the Maillard reaction [16]. The color of the mulberry leaves and MGT was green, indicated by the negative a* and b* values. The kneading of the mulberry leaves increased the negative value of the a* parameter of the MGT by stimulating the enzymatic browning process [19].

Anthocyanin is the predominant pigment in unpolished Riceberry rice although it was not detected in the mulberry leaves. As a result, TAC was presented only for the Riceberry rice and RBT. Heat treatment significantly reduced the TAC values of the Riceberry rice because anthocyanins are suspectable to heat. Arora, S., Virdi, I. K., Sharanagat, V. S., Kheto, A., Dhua, S., Suhag, R., Kumar, R., Kumar, Y., and Patel, A. [16] reported that heat

ISSN 2672-9369 (Online)

treatment could reduce TAC value by approximately 10 times compared to the original value.

The phenolic content was also affected by the heat treatment. Arora, S., Virdi, I. K., Sharanagat, V. S., Kheto, A., Dhua, S., Suhag, R., Kumar, R., Kumar, Y., and Patel, A. [16] reported a reduction of the TPC value in the Riceberry rice by a factor of 2.9 as a result of heat treatment. The TPC value of MGT was approximately 1.9 times lower than that of the fresh mulberry leaves. Wanyo, P., Siriamornpun, S., and Meeso, N. [17] also reported a similar reduction factor (1.9 times) of the TPC in commercial mulberry leaf teas as compared to the fresh leaf.

2. Physical and chemical properties of RBTI, MGTI, and the mixed teas

The physical and chemical properties of the tea infusions, RBTI and MGTI, and the mixed teas with different RBTI:MGTI ratios: 50:50, 60:50, 70:30, and 80:20 v/v, were analyzed. The color of RBTI was in the area of red as indicated by positive a* and b* values. The b* of the MGTI was predominant with a positive value indicating the green color area. The color of RBTI and MGTI represented their corresponding raw materials. The color of the mixed teas changed significantly when the ratio of the RBTI increased. Contrary, the b* values of the mixed teas decreased significantly as the RBTI increased, however, the ratio of 70:30 and 80:20 showed insignificantly different b* values.

The anthocyanin content of the mixed teas increased proportionally by the factor of 1.1 - 1.3 depending on the ratio of RBTI. This was because anthocyanin content was present only in RBTI. However, the TPC value of the mixed teas changed insignificantly because both RBTI and MGTI contained insignificantly different TPC values.

Although the DPPH antioxidant activity of RBTI was higher than that of MGTI, the activity of all mixed teas was insignificantly different. This could be because anthocyanins are weak antioxidants as tested by the DPPH assay. Jiamyangyuen, S., Nuengchamnong, N., and Ngamdee, P. [9] reported that the extract of black rice of the first stage of grain development contained lower TPC and detected no TAC, showing equal DPPH antioxidant activity to the fully developed grain, which contained higher TPC and TAC.

3. Sensory evaluation RTD mixed teas

The color and clarity attributes of the RTD mixed teas were insignificantly different. The liking scores on these attributes were in the range of 6.3 - 7.6 scores which were in the level of like slightly to like very much. The 50:50 and 60:40 mixed teas received the lowest liking scores, which were translated to the level of dislike slightly to neither like nor a dislike, on bitterness, overall flavor, aftertaste, and overall liking attributes. The 70:30 and 80:20 mixed teas received insignificant liking scores of 6.0 - 6.9 scores which indicated the liking level of like slightly to like moderately. Angki, T. A., Saikim, F. H., Dawood, M. M., Ahmad, A. H., Godoong, E., Mahyudin, A., Bagul, A. H. B. P., Matanjun, P. C., Noor, N. Q. I. M., Janaun, J. A., Neoh, Y. Y., Sirinus, E., and Gibin, G. [4] reported that the liking level of Tudan's organic mulberry leaf tea was in the level of slightly like. The sensory evaluation result indicated that consumers tended to dislike mixed teas with a higher ratio of MGTI. This could be due to individual flavor and test characteristics of the mulberry leaf tea.

4. Storage stability of the RTD mixed tea

Storage stability of the RTD mixed tea with 80:20 of the RBTI:MGTI ratio stored at 4 ^{o}C for 20 days was evaluated. The a* and b* values of the RTD mixed tea changed significantly on days 15 and 20 of storage. This decrease was associated with the reduction of TSS, TAC, and TPC values. The precipitate pigment could be the cause of the reduction of these values. Dorris, M. R. and Bolling, B. W. [20] reported that soluble anthocyanin and polyphenolic molecules can react and form polymeric precipitate. This causes the reaction of soluble molecules which subsequently reduces the TSS value. Some anthocyanins and other polyphenols can combine to form a polymeric precipitate which causes the reduction of TAC and TPC values. This phenomenon subsequently caused the reduction of the DPPH activity of the tea due to the loss of some antioxidant molecules. The study of Baek, N., Kim, Y., Duncan, S., Leitch, K., and O'Keefe, S. [15] also reported the color change behavior of RTD green tea which agreed with the results from this study. After the tea was stored for 20 days, they found an increase in L* values while the values of a* and b* had decreased.

Conclusion

The tea infusion from Riceberry rice was red and contained anthocyanin as a predominant active compound which was not found in the mulberry leaf tea infusion. The RTD mixed teas containing a different ratio of the Riceberry rice tea and mulberry leaf tea infusions were prepared. The color of the RTD mixed tea changed toward red as the ratio of the Riceberry rice tea infusion as well as the anthocyanin content increased. However, the variation of the tea ratio showed no effect on the total phenolic content and DPPH antioxidant activity. The RTD mixed tea with a ratio of the Riceberry rice tea and the mulberry leaf tea infusion at 80:20 was selected due to consumer preference along with its high health-promoting property. During the storage, color intensity, TSS, TAC, TPC, and DPPH antioxidant activity of the RTD mixed tea showed a significant decrease on day 15. These results indicated that the RTD mixed tea from Riceberry rice and mulberry leaf tea could be an alternative RTD product with health benefits.

Acknowledgment

The financial support of this work was provided by Thepsatri Rajabhat University (Grant No. 14/2562).

References

[1] Thai Industrial Standards Institute. (2015). **Thai Community Product Standard: Tea (TCPS. 120/2558)**. Ministry of Industry, Bangkok (in Thai)

[2] Food and Drug Administration. (2021). **Notification of the Ministry of Public Health (No. 426) B.E.2564 (2021), Re: Teas from Plants**. Ministry of Public Health, Bangkok (in Thai)

ISSN 2672-9369 (Online)

[3] Yu, Y., Li, H., Zhang, B., Wang, J., Shi, X., Huang, J., Yang, J., Zhang, Y., and Deng, Z. (2018). Nutritional and Functional Components of Mulberry Leaves from Different Varieties: Evaluation of Their Potential as Food Materials. **International Journal of Food Properties**. Vol. 21, Issue 1, pp. 1495-1507. DOI: 10.1080/10942912.2018.1489833

[4] Angki, T. A., Saikim, F. H., Dawood, M. M., Ahmad, A. H., Godoong, E., Mahyudin, A., Bagul, A. H. B. P., Matanjun, P. C., Noor, N. Q. I. M., Janaun, J. A., Neoh, Y. Y., Sirinus, E., and Gibin, G. (2018). The Tudan's Organic Mulberry Tea: An Indigenous Community Tea Product Made Underutilized Part of Mulberry Plant. **BIMP-EAGA Journal for Sustainable Tourism Development**. Vol. 7, No. 1, pp. 38-47

[5] Basinskiene, L. and Cizeikiene, D. (2020). Chapter 3 - Cereal-Based Nonalcoholic Beverages. In **Trends in Non-alcoholic Beverages**. Charis M. Galanakis, eds. pp. 63-99: Academic Press

[6] Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., and Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and Anthocyanins: Colored Pigments as Food, Pharmaceutical Ingredients, and the Potential Health Benefits. **Food & Nutrition Research**. Vol. 61, pp. 1-21. DOI: 10.1080/16546628.2017.1361779

[7] Wu, L., Zhai, M., Yao, Y., Dong, C., Shuang, S., and Ren, G. (2013). Changes in Nutritional Constituents, Anthocyanins, and Volatile Compounds During the Processing of Black Rice Tea. **Food Science and Biotechnology**. Vol. 22, No. 4, pp. 917-923. DOI : 10.1007/s10068-013-0164-z

[8] Noosing, S., Mundee, P., and Leelawat, B. (2014). Development of Instant Germinated Purple Rice Tea. **Journal of Science and Technology**. Vol. 22, No. 3, pp. 337-346 (in Thai)

[9] Jiamyangyuen, S., Nuengchamnong, N., and Ngamdee, P. (2017). Bioactivity and Chemical Components of Thai Rice in Five Stages of Grain Development. **Journal of Cereal Science**. Vol. 74, pp. 136-144. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.01.021

[10] Iwasaki, M., Inoue, M., Sasazuki, S., Sawada, N., Yamaji, T., Shimazu, T., Willett, W. C., and Tsugane, S. (2010). Green Tea Drinking and Subsequent Risk of Breast Cancer in a Population - Based Cohort of Japanese Women. **Breast Cancer Research: BCR**. Vol. 12, pp. R88. DOI: 10.1186/bcr2756

[11] Vittayaporn, V., Chompreeda, P., Haruthaithanasan, V., and Rimkeeree, H. (2010). Preference Mapping of Thai Consumers for Commercial Green Tea with Roasted Brown Rice. **Agriculture and Natural Resources**. Vol. 44, No. 4, pp. 652-663

[12] Wongcharoenkit, S., Nawanukor, P., Kaewrueng, W., and Weerasopon, P. (2001). **Study on Production Cost of Mulberry Tea**. The Queen Sirikit Department of Sericulture. Department of Agriculture

[13] AOAC. (2005). **Official Method of Analysis**. 18th Edition, Washington, D.C.: Association of Officiating Analytical Chemists

[14] Giusti, M. M. and Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**. Vol. 00, No. 1, pp. F1.2.1-F1.2.13. DOI: 10.1002/0471142913.faf0102s00

[15] Baek, N., Kim, Y., Duncan, S., Leitch, K., and O'Keefe, S. (2021). (−)-Epigallocatechin Gallate Stability in Ready-To-Drink (RTD) Green Tea Infusions in TiO_2 and Oleic-Acid-Modified TiO_2 Polylactic Acid Film Packaging Stored Under Fluorescent Light During Refrigerated Storage at 4 °C. **Foods**. Vol. 10, Issue 4, p. 723. DOI: 10.3390/foods10040723

[16] Arora, S., Virdi, I. K., Sharanagat, V. S., Kheto, A., Dhua, S., Suhag, R., Kumar, R., Kumar, Y., and Patel, A. (2021). Roasting of Black Rice (*Oryza Sativa* L.): Change in Physico-Functional, Thermo-Pasting, Antioxidant and Anthocyanin Content. **Journal of Food Measurement and Characterization**. Vol. 15, No. 3, pp. 2240-2250. DOI: 10.1007/s11694-021-00828-7

[17] Wanyo, P., Siriamornpun, S., and Meeso, N. (2011). Improvement of Quality and Antioxidant Properties of Dried Mulberry Leaves with Combined Far-Infrared Radiation and Air Convection in Thai Tea Process. **Food and Bioproducts Processing**. Vol. 89, No. 1, pp. 22-30. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.03.005

[18] Thai Industrial Standards Institute. (2015). **Thai community product standard: Dried mulberry for infusion (TCPS. 30/2558)**. Ministry of Industry, Bangkok (in Thai)

[19] Degl'Innocenti, E., Guidi, L., Pardossi, A., and Tognoni, F. (2005). Biochemical Study of Leaf Browning in Minimally Processed Leaves of Lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. *Acephala*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 53, No. 26, pp. 9980-9984. DOI: 10.1021/jf050927o

[20] Dorris, M. R. and Bolling, B. W. (2021). Cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) Juice Precipitate Pigmentation is Mainly Polymeric Colors and Has Limited Impact on Soluble Anthocyanin Loss. **Antioxidants (Basel)**. Vol. 10, Issue 11, p. 1788. DOI: 10.3390/antiox10111788

ISSN 2672-9369 (Online)

การหาค่าที่ดีที่สุดในการกำหนดตำแหน่งภายใต้อุปสงค์และอุปทานที่แปรผันตามเวลา

Optimizing Storage Assignment Under Time-Varying Demand and Supply

สกุลชัย พรหมสร[1] ศิรวดี อรัญนารถ[1*] และอาทิตย์ อภิโชติธนกุล[1]

Sakulchai Promsorn[1] Sirawadee Arunyanart[1*] and Arthit Apichottanakul[1]

Received: *August 1, 2022;* ***Revised:*** *October 20, 2022;* ***Accepted:*** *October 20, 2022*

บทคัดย่อ

การจัดสินค้าเข้าที่ (Put-Away) และการหยิบสินค้า (Order Picking) ถือเป็นกิจกรรมในคลังสินค้าที่มีต้นทุนสูง โดยมีค่าใช้จ่ายสูงถึง 55 % ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดภายในคลังสินค้า และเวลาส่วนใหญ่ที่เสียไปเกิดจากการเดินทางเพื่อจัดเก็บและหยิบสินค้าซึ่งสูงถึง 55 % ของเวลาทั้งหมด งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตำแหน่งการจัดเก็บที่เหมาะสมสำหรับสินค้าในแต่ละช่วงเวลาเพื่อให้ระยะทางการหยิบและจัดเก็บสินค้าสั้นที่สุดภายใต้นโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งจัดเก็บและนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม โดยทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านระยะทางการหยิบและจัดเก็บ โดยการประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับ Add-in Open Solver ของโปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้ Solver Engine ของ Gurobi ในการหาค่าคำตอบ จากการทดสอบด้วยปัญหาภายใต้สมมุติฐานคลังสินค้าที่ทราบการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของสินค้าที่ต้องหยิบและสินค้าที่ต้องรับเข้าเพื่อจัดเก็บล่วงหน้าพบว่านโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มมีประสิทธิภาพทางด้านการลดระยะทางการทำงานมากกว่านโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งภายในปัญหาที่ได้กำหนดขึ้น โดยระยะทางการหยิบและจัดเก็บสินค้าของนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มน้อยกว่านโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งถึง 11.2 %

คำสำคัญ : ปัญหาการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บ; กำหนดการเชิงเส้น; อุปสงค์และอุปทานที่แปรผันตามเวลา

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

[1] *Faculty of Engineering, Khon Kaen University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 09 4601 0222, E - mail: sirawadee@kku.ac.th*

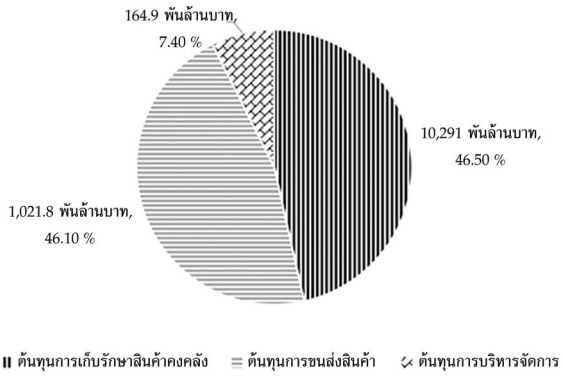
Abstract

Putaway and order picking are high-cost warehousing activities, accounting for up to 55 % of the total cost in the warehouse. Furthermore, most of the time is being wasted on trips to store and pick up, which can add up to 55 % of the total working time. This research proposed mathematical models to determine the optimal storage locations in each period by minimizing pick up and storage traveling distances under two storage policies, including dedicated storage and random storage. The efficiency in minimizing traveling distance was studied and compared by applying the mathematical model with Add-in Open Solver in Microsoft Excel using Gurobi Optimizer solver engine to solve the problem. Under the assumption that the warehouse knew the change in demand and supply in advance, the results indicated that the random storage policy was more efficient in minimizing traveling distance than the dedicated storage policy. In fact, the total traveling distance of the random storage policy was 11.2 % less than the dedicated storage policy.

Keywords: Storage Location Assignment Problem; Linear Programming; Time-Varying Demand and Supply

บทนำ

การจัดการคลังสินค้ามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อระบบโลจิสติกส์ ในปี พ.ศ. 2563 ต้นทุนการเก็บรักษาสินค้าคงคลังมีมูลค่าสูงถึง 1,029.1 พันล้านบาท คิดเป็น 46.5 % ของต้นทุนโลจิสติกส์ ซึ่งสูงที่สุดดังรูปที่ 1 เป็นผลมาจากต้นทุนการถือครองสินค้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนสินค้าสำเร็จรูปคงคลังต่อปริมาณการจำหน่ายสินค้ามีค่าเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณสินค้าที่ต้องเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น [1] และจากการขยายตัวของธุรกิจพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-Commerce) ในปี พ.ศ. 2564 มีการเติบโตเพิ่มขึ้น 6.1 % ส่งผลให้ธุรกิจที่มีความเกี่ยวข้องอย่างคลังสินค้ามีอัตราการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน [2] โดย [3] ได้ศึกษาการคัดเลือกสถานที่ตั้งคลังสินค้าควบคุมพิเศษที่เหมาะสม ซึ่งมีการพิจารณาปัจจัยทางด้านต้นทุนคลังสินค้าและต้นทุนขนส่งสินค้า [4] ศึกษาระบบโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลสำหรับการให้บริการด้านอาหารในธุรกิจร้านอาหารเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพทางด้านการจัดเตรียมวัตถุดิบภายในห้องจัดเก็บ และ [5] ได้ศึกษาการประยุกต์แนวคิดลีนซิกส์มาโลจิกสติกส์ในการควบคุมและลดต้นทุนในคลังวัสดุ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการคลังสินค้า



รูปที่ 1 โครงสร้างมูลค่าต้นทุนโลจิสติกส์ปี พ.ศ. 2563

ISSN 2672-9369 (Online)

การจัดการคลังสินค้าให้มีประสิทธิภาพสูงมีความสำคัญอย่างมากในการแข่งขันทางธุรกิจเพราะสามารถช่วยลดต้นทุนได้ โดยกิจกรรมที่มีต้นทุนการดำเนินงานมากที่สุดภายในคลังสินค้าคือ กิจกรรมการหยิบสินค้า (Order Picking) ซึ่งมีต้นทุนสูงถึง 55 % ของต้นทุนการบริหารคลังสินค้า เนื่องจากกิจกรรมการหยิบสินค้าเป็นกิจกรรมที่ต้องอาศัยเวลาในการเดินทางและค้นหาสินค้า โดยเวลาส่วนใหญ่ที่ใช้ในกิจกรรมการหยิบสินค้าคือการเดินทางเพื่อไปหยิบ ซึ่งสูงถึง 55 % ของเวลาทั้งหมดในกิจกรรมการหยิบสินค้า [6] ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหยิบสินค้า [7] คลังสินค้าสามารถลดระยะทางการทำงานได้หากมีการบริหารตำแหน่งการจัดเก็บที่เหมาะสมตั้งแต่แรก เนื่องจากการมีตำแหน่งการจัดเก็บที่เหมาะสมตั้งแต่แรกถือเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประสิทธิภาพด้วยวิธีอื่น ๆ ต่อไป จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บ (Storage Location Assignment Problem: SLAP) ซึ่งเป็นวิธีการหาตำแหน่งจัดเก็บที่เหมาะสมโดยมีเป้าหมายเพื่อลดระยะทางในการขนย้ายสินค้า โดย [8] ได้กล่าวว่าวิธีการแก้ปัญหา SLAP ที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดก็คือ วิธีการหาค่าคำตอบแบบแม่นตรง (Exact Method) นอกจากนี้ [9] ได้กล่าวว่างานวิจัยส่วนใหญ่มักจะศึกษานโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง (Dedicated Storage) และนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม (Random Storage)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บหลากหลายรูปแบบในหลากหลายสถานการณ์ แต่มีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่ได้พิจารณาปัญหาด้านระดับของอุปสงค์และอุปทานที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาร่วมด้วย หรือปัญหาที่ในแต่ละช่วงเวลาสินค้าที่ต้องรับเข้าคลังสินค้ามีจำนวนไม่เท่ากันหรือสินค้าที่ต้องหยิบตามคำสั่งซื้อไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงมากยิ่งขึ้น จากสถานการณ์ข้างต้นส่งผลให้การกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บที่เหมาะสมมีความท้าทายมากยิ่งขึ้น เนื่องจากตำแหน่งการจัดเก็บที่ได้กำหนดไว้อาจไม่มีความเหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา ยกตัวอย่างเช่น คลังสินค้าร้านค้าปลีก-ส่ง ที่มีอัตราการหมุนเวียนสินค้าอยู่ตลอด ส่งผลให้ต้องพิจารณาสินค้าเข้าออกเป็นรายวัน นอกจากนี้ร้านค้าประเภทนี้มักจะมีพื้นที่สำหรับจัดเก็บสินค้าไม่เพียงพอส่งผลให้ต้องมีการจัดเก็บสินค้าหลายชนิดไว้ภายในตำแหน่งเดียวกัน

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บที่เหมาะสม [10] - [12] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดตำแหน่งจัดเก็บสินค้าด้วยนโยบายการจัดเก็บแบบระบุตำแหน่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะทางการหยิบสินค้าให้สั้นที่สุด โดยที่ [10] ได้พิจารณาจำนวนของประตู ประเภทของสินค้า ตำแหน่งช่องจัดเก็บและชั้นของช่องจัดเก็บ โดยใช้โปรแกรม Lingo ในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าคำตอบที่เหมาะสม [11] ได้พิจารณากลุ่มของสินค้าเพื่อกำหนดตำแหน่งจัดเก็บเป็นโซน โดยใช้โปรแกรม Excel Solver ในการแก้ปัญหา และ [12] ได้ศึกษาเพื่อปรับปรุงระบบบริหารจัดการคลังสินค้าเพื่อกำหนดตำแหน่งในการจัดเก็บสินค้าภายใต้สมมุติฐานปริมาณความต้องการคงที่และไม่คงที่ ซึ่งได้ทำการประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo และทำการเปรียบเทียบนโยบายการจัดเก็บสินค้าแบบกำหนดตำแหน่งและแบบสุ่ม โดยนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มสามารถลดระยะทางจากเดิมได้ถึง 10 % จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ [10] - [12] นั้น พิจารณาความถี่ของสินค้าในการคำนวณหาระยะทางการทำงานภายในคลัง แต่ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการพิจารณาจำนวนชิ้นของสินค้าที่ต้องหยิบและจัดเก็บ เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาค่าความถี่ที่เข้าไปยังตำแหน่งจัดเก็บในแต่ละช่วงเวลาที่สอดคล้องกับความจุต่อรอบในการขนย้าย

[13] ได้ศึกษาการวางแผนล่วงหน้าในการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมให้กับสินค้าในคลังสินค้า โดยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) และนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาด้วยการจับคู่แบบ 3 มิติ เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มที่สามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจัดเก็บได้ตามช่วงเวลา แต่ในการศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาจำนวนสินค้าที่ต้องจัดเก็บต่อตำแหน่งและจำนวนสินค้าที่หยิบออกจากตำแหน่ง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า [10] - [13] ได้ทำการศึกษา

เพื่อแก้ไขปัญหาการกำหนดตำแหน่งจัดเก็บแต่ไม่ได้พิจารณาจำนวนของสินค้าที่ต้องหยิบและจัดเก็บ โดย [12] – [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม แต่ [12] ไม่ได้พิจารณาช่วงเวลาส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งจัดเก็บในแต่ละช่วงเวลาได้ จึงไม่สามารถหาค่าคำตอบล่วงหน้าได้ ทำให้ต้องหาค่าคำตอบใหม่อยู่เสมอ ในขณะที่ [13] มีการพิจารณาช่วงเวลาส่งผลให้สามารถกำหนดตำแหน่งจัดเก็บล่วงหน้าได้ [14] ได้ศึกษาการบริหารจัดการคลังสินค้าโดยการหาจำนวนสินค้าที่ต้องผลิตและตำแหน่งจัดเก็บที่เหมาะสมเพื่อแก้ปัญหาความไม่แน่นอนของระดับอุปทาน โดยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าพร้อมกำหนดปริมาณการผลิต โดยมีการพิจารณาจำนวนของสินค้าและช่วงเวลา ซึ่งมีความใกล้เคียงกับปัญหาที่ผู้วิจัยต้องการแก้ไข แต่ปัญหาที่ผู้วิจัยต้องการแก้ไขคือการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บของคลังสินค้าที่ไม่ได้พิจารณาปริมาณการผลิต

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการศึกษาปัญหาการกำหนดตำแหน่งจัดเก็บที่พิจารณาทั้งระดับอุปสงค์และอุปทานยังมีอยู่น้อย เพื่อแก้ไขปัญหาการกำหนดตำแหน่งจัดเก็บภายใต้นโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มโดยพิจารณาจำนวนสินค้าที่ต้องหยิบและจัดเก็บ ผู้วิจัยได้นำสมการของ [14] มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาคลังสินค้าที่มีนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มโดยมีเงื่อนไขของระดับอุปสงค์และอุปทานที่เปลี่ยนแปลงได้ตามช่วงเวลา โดยข้อดีของการพิจารณาการขนย้ายเป็นจำนวนชิ้นและช่วงเวลานั้น จะช่วยให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าความถี่ของสินค้าต่อตำแหน่งจัดเก็บ และเนื่องจากมีการพิจารณาจำนวนของสินค้า ทำให้สามารถทราบระดับของสินค้าคงคลังในแต่ละตำแหน่งและสามารถวางแผนล่วงหน้าเพื่อเติมสินค้าไปยังตำแหน่งจัดเก็บที่มีพื้นที่ว่าง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับนโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง เพื่อเปรียบเทียบนโยบายการจัดเก็บทั้งสองแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ต่างจาก [14] ที่เป็นการแก้ไขปัญหาการบริหารคลังสินค้าที่พิจารณาเพียงระดับความต้องการสินค้าและต้องการหาจำนวนการผลิตที่เหมาะสม

วิธีการดำเนินการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินการวิจัยเป็นไปตามเป้าหมาย ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 2 และมีรายละเอียดดังนี้

1. **กำหนดลักษณะของปัญหา**

เพื่อให้สามารถพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองรูปแบบได้ ผู้วิจัยได้กำหนดลักษณะของปัญหาที่ต้องการพิจารณา โดยมีปัญหาที่ต้องการแก้ไขคือ ปัญหาการกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บภายในคลังสินค้าภายใต้สมมุติฐานคลังสินค้าทราบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความต้องการของสินค้าและทราบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสินค้าที่ต้องรับเข้าคลังเพื่อจัดเก็บล่วงหน้า โดยปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ระยะทางในการหยิบและจัดเก็บสินค้ามากเกินไปเนื่องจากปริมาณความต้องการของสินค้าและสินค้าที่ต้องรับเข้านั้นเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา ทำให้การวางแผนการกำหนดตำแหน่งจัดเก็บที่เหมาะสมเป็นไปได้ยากและซับซ้อนหากใช้เพียงประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน

วัตถุประสงค์ของการแก้ไขปัญหาคือ หาตำแหน่งการจัดเก็บที่เหมาะสมเพื่อให้มีระยะทางการหยิบและจัดเก็บสินค้าสั้นที่สุด โดยที่คลังสินค้ามีประตูรับส่งสินค้าเพียงประตูเดียว ชนิดของสินค้าที่ต้องจัดเก็บมีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน ลักษณะการทำงานภายในคลังเป็นการขนย้ายสินค้าเป็นจำนวนชิ้น และกำหนดให้สามารถขนย้ายสินค้าได้เพียงชนิดเดียวต่อรอบ

2. **ขอบเขตของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

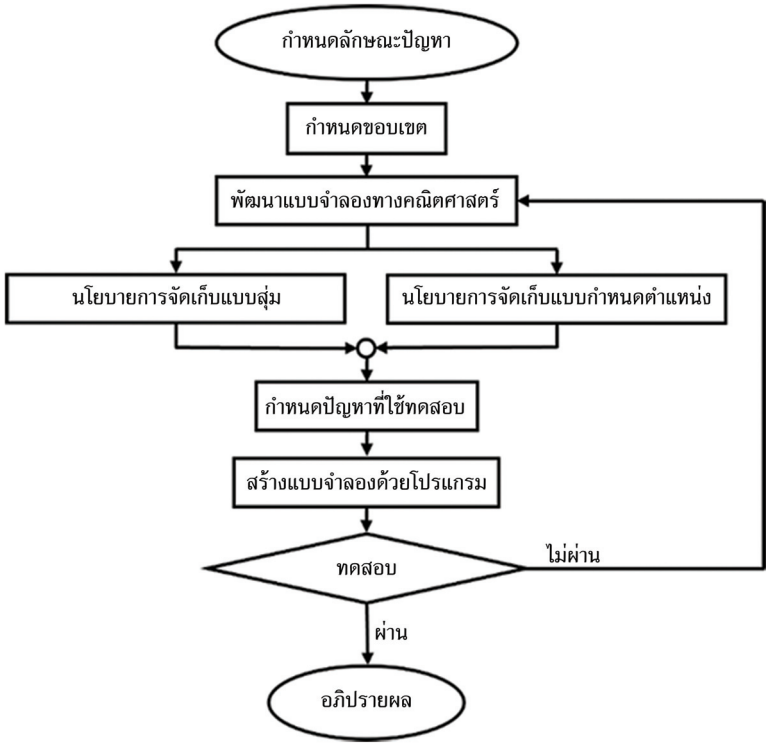
2.1 นโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บ กำหนดให้สามารถจัดเก็บสินค้าได้เฉพาะในตำแหน่งจัดเก็บที่ได้ถูกกำหนดไว้ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

2.2 นโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม กำหนดให้สามารถจัดเก็บสินค้าไว้ที่ตำแหน่งใดก็ได้

ISSN 2672-9369 (Online)

2.3 กำหนดให้หลังจากการหยิบหรือจัดเก็บสินค้าจะต้องเดินทางกลับไปยังประตู จำนวนคนหรืออุปกรณ์เคลื่อนย้ายมีเพียงพอต่อการเคลื่อนย้าย จำนวนช่องจัดเก็บมีเพียงพอต่อการจัดเก็บสินค้า และสินค้ามีเพียงพอต่อความต้องการเสมอ

2.4 กิจกรรมภายในคลังสินค้าเริ่มด้วยการจัดเก็บสินค้าที่ต้องรับเข้าคลังสินค้าก่อนทั้งหมดแล้วจึงจะทำการหยิบสินค้าตามคำสั่งซื้อ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองได้ เนื่องจากขอบเขตของนโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งทำให้จำเป็นที่จะต้องไม่มีสินค้าอยู่ภายในคลังก่อน ส่งผลให้ต้องเริ่มต้นด้วยกิจกรรมการจัดเก็บก่อน



รูปที่ 2 ผังงานวิธีการดำเนินงานวิจัย

3. **การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

3.1 นโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม

ดัชนี (Indices)

i ชนิดสินค้า ; $i = 1,2,3,\ldots,M$

j ตำแหน่งจัดเก็บ ; $j = 1,2,3,\ldots,N$

t ช่วงเวลา ; $t = 1,2,3,\ldots,T$

ตัวแปรที่ทราบค่า (Parameters)

S_{it} : จำนวนสินค้า i ที่ต้องจัดเก็บเข้าคลังสินค้า ณ เวลา t

P_{it} : ความต้องการของสินค้า i ณ เวลา t

d_j : ระยะทางระหว่างประตูไปยังตำแหน่ง j

R_{ij0} : จำนวนของสินค้า i คงเหลือที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t ที่ 0 ซึ่ง 0 คือ ช่วงเวลาเริ่มต้น

StorageCap : ความจุต่อตำแหน่งจัดเก็บสินค้า

CarryingCap : ความจุต่อรอบที่สามารถขนย้ายสินค้าได้

ตัวแปรตาม (Dependent Variables)

R_{ijt} : จำนวนของสินค้า i คงเหลือที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t หลังจากมีการหยิบสินค้าออก

u_{ijt} : จำนวนสินค้า i ที่จะถูกจัดเก็บที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

v_{ijt} : จำนวนสินค้า i ที่หยิบจากตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

x_{ijt} : จำนวนรอบในการเข้าไปจัดเก็บสินค้า i ที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

y_{ijt} : จำนวนรอบในการเข้าไปหยิบสินค้า i ที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

สมการเป้าหมาย (Objective Function)

$$Min\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left(d_j x_{ijt} + d_j y_{ijt}\right) \tag{1}$$

เงื่อนไข (Constraints)

$$\sum_{i=1}^{M} u_{ijt} \le x_{ijt} CarryingCap \qquad \forall j,t \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{M} v_{ijt} \le y_{ijt} CarryingCap \qquad \forall j,t \tag{3}$$

$$u_{ijt} \le \left(StorageCap - R_{ijt-1}\right) \qquad \forall i,j,t \tag{4}$$

$$v_{ijt} \le \left(R_{ijt-1} + u_{ijt}\right) \qquad \forall i,j,t \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{N} u_{ijt} = S_{it} \qquad \forall i,t \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{N} v_{ijt} = P_{it} \qquad \forall i,t \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{M}\left(R_{ijt-1} + u_{ijt}\right) \le StorageCap \qquad \forall j,t \tag{8}$$

$$R_{ijt} = R_{ijt-1} + u_{ijt} - v_{ijt} \qquad \forall i,j,t \tag{9}$$

$$u_{ijt}, v_{ijt}, x_{ijt}, y_{ijt} = Integer \qquad \forall i,j,t \tag{10}$$

สมการที่ (1) เป็นสมการเป้าหมายในการหาตำแหน่งจัดเก็บที่ให้ระยะทางการจัดเก็บและหยิบสินค้าสั้นที่สุด โดยสมการที่ (2) - (10) เป็นสมการเงื่อนไข สมการที่ (2) และ (3) กำหนดให้ไม่สามารถขนย้ายปริมาณสินค้าเกินความสามารถในการขนย้าย สมการที่ (4) จัดเก็บสินค้าได้เฉพาะตำแหน่งที่ว่าง สมการที่ (5) หยิบสินค้าได้เฉพาะที่ถูกจัดเก็บไว้ สมการที่ (6) สินค้าที่ต้องรับเข้าทุกชิ้นต้องถูกจัดเก็บ สมการที่ (7)

ISSN 2672-9369 (Online)

ต้องหยิบสินค้าให้ครบตามความต้องการ สมการที่ (8) จัดเก็บสินค้าได้ไม่เกินความจุของตำแหน่งจัดเก็บ สมการที่ (9) แสดงความสัมพันธ์ของสินค้าคงเหลือ และสมการที่ (10) กำหนดให้ตัวแปรดังกล่าวเป็นจำนวนเต็ม

3.2 นโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง

ดัชนี (Indices)

i ชนิดสินค้า ; $i = 1,2,3,\ldots,M$

j ตำแหน่งจัดเก็บ ; $j = 1,2,3,\ldots,N$

t ช่วงเวลา ; $t = 1,2,3,\ldots,T$

ตัวแปรที่ทราบค่า (Parameters)

S_{it} : จำนวนสินค้า i ที่ต้องจัดเก็บเข้าคลังสินค้า ณ เวลา t

P_{it} : ความต้องการของสินค้า i ณ เวลา t

d_j : ระยะทางระหว่างประตูไปยังตำแหน่ง j

R_{ij0} : จำนวนของสินค้า i คงเหลือที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t ที่ 0 ซึ่ง 0 คือ ช่วงเวลาเริ่มต้น

$StorageCap$: ความจุต่อตำแหน่งจัดเก็บสินค้า

$CarryingCap$: ความจุต่อรอบที่สามารถขนย้ายสินค้าได้

ตัวแปรตาม (Dependent Variables)

R_{ijt} : จำนวนของสินค้า i คงเหลือที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t หลังจากมีการหยิบสินค้าออก

u_{ijt} : จำนวนสินค้า i ที่จะถูกจัดเก็บที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

v_{ijt} : จำนวนสินค้า i ที่หยิบจากตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

$w_{ij} =$ 1 : กำหนดให้สินค้า i ถูกจัดเก็บไว้ที่ตำแหน่ง j ;

0, ในกรณีอื่น ๆ

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

x_{ijt} : จำนวนรอบในการเข้าไปจัดเก็บสินค้า i ที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

y_{ijt} : จำนวนรอบในการเข้าไปหยิบสินค้า i ที่ตำแหน่ง j ณ ช่วงเวลา t มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

สมการเป้าหมาย (Objective Function)

$$Min \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left(d_j x_{ijt} + d_j y_{ijt}\right) \tag{11}$$

เงื่อนไข (Constraints)

$$\sum_{i=1}^{M} w_{ijt} \le 1 \qquad \forall j,t \tag{12}$$

$$u_{ijt} \le x_{ijt} CarryingCap \qquad \forall i,j,t \tag{13}$$

$$v_{ijt} \le y_{ijt} CarryingCap \qquad \forall i,j,t \tag{14}$$

$$u_{ijt} \le \left(\left(w_{ij} StorageCap\right) - R_{ijt-1}\right) \qquad \forall i,j,t \tag{15}$$

$$v_{ijt} \le \left(R_{ijt-1} + u_{ijt}\right) \qquad \forall i, j, t \qquad (16)$$

$$\sum_{j=1}^{N} u_{ijt} = S_{it} \qquad \forall i, t \qquad (17)$$

$$\sum_{j=1}^{N} v_{ijt} = P_{it} \qquad \forall i, t \qquad (18)$$

$$R_{ijt} = R_{ijt-1} + u_{ijt} - v_{ijt} \qquad \forall i, j, t \qquad (19)$$

$$u_{ijt}, v_{ijt}, x_{ijt}, y_{ijt} = Integer \qquad \forall i, j, t \qquad (20)$$

$$w_{ij} \in \{0,1\} \qquad (21)$$

สมการที่ (11) เป็นสมการเป้าหมายในการหาตำแหน่งจัดเก็บที่ให้ระยะทางการจัดเก็บและหยิบสินค้าสั้นที่สุด สมการที่ (12) - (21) เป็นสมการเงื่อนไข โดยสมการที่ (12) กำหนดให้ตำแหน่งจัดเก็บสามารถจัดเก็บสินค้าได้ชนิดเดียว สมการที่ (13) และ (14) กำหนดให้ไม่สามารถขนย้ายปริมาณสินค้าเกินความสามารถในการขนย้ายต่อรอบ สมการที่ (15) จัดเก็บสินค้าได้ไม่เกินความจุของตำแหน่งจัดเก็บ สมการที่ (16) หยิบสินค้าได้เฉพาะที่ถูกจัดเก็บไว้ สมการที่ (17) สินค้าที่ต้องรับเข้าทุกชิ้นต้องถูกจัดเก็บ สมการที่ (18) ต้องหยิบสินค้าให้ครบตามความต้องการ สมการที่ (19) แสดงความสัมพันธ์ของสินค้าคงเหลือ สมการที่ (20) กำหนดให้ตัวแปรดังกล่าวเป็นจำนวนเต็ม และสมการที่ (21) กำหนดให้ตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแปรฐานสอง

4. กำหนดปัญหาเพื่อทดสอบ

ในการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้จำลองลักษณะของปัญหาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านระยะทางการทำงาน โดยปัญหาที่ได้กำหนดเป็นปัญหาขนาดเล็กที่ใช้เพื่อสาธิตวิธีการทำงานของแบบจำลองให้สามารถเข้าใจง่าย กำหนดให้ช่วงเวลาเริ่มต้นภายในคลังสินค้าไม่มีสินค้าจัดเก็บอยู่ (R_{ij0}) เนื่องจากขอบเขตของนโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งทำให้จำเป็นต้องไม่มีสินค้าค้างอยู่ในตำแหน่งจัดเก็บเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกำหนดตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมเอาไว้ก่อนหน้า และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่วงเวลาคือ 1 วัน โดยมีแผนผังของคลังสินค้าดังรูปที่ 3 ปริมาณสินค้าที่จัดเก็บและหยิบในตารางที่ 1 ระยะทางไปกลับจากประตูถึงตำแหน่งจัดเก็บดังตารางที่ 2 และตัวแปรนำเข้าดังนี้

4.1 สินค้า (i) ภายในคลังสินค้าทั้งหมด 5 ชนิด

4.2 ตำแหน่งจัดเก็บ (j) ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง

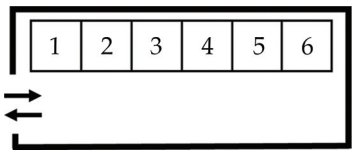
4.3 ช่วงเวลา (t) ทั้งหมด 6 ช่วงเวลา

4.4 ความจุต่อตำแหน่งจัดเก็บ (*StorageCap*) คือ 50 ชิ้นต่อตำแหน่งจัดเก็บ

4.5 ความจุต่อรอบการขนย้าย (*CarryingCap*) คือ 10 ชิ้นต่อรอบการขนย้าย

4.6 ระยะทางไปกลับจากประตูถึงตำแหน่งจัดเก็บ (d_j) ดังตารางที่ 1

4.7 ปริมาณสินค้าที่ต้องจัดเก็บ (S_{it}) และหยิบ (P_{it}) ดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 แผนผังของคลังสินค้า

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 1 ปริมาณสินค้าที่จัดเก็บ (S_{it}) และหยิบ (P_{it}) หน่วย: จำนวนชิ้น

สินค้า (i)	ช่วงเวลา (t) หน่วย: วันที่											
	จัดเก็บ (S_{it})						หยิบ (P_{it})					
	วันที่ 1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	50	-	-	40	-	-	5	15	20	15	-	15
2	50	-	-	40	-	-	15	15	10	10	20	-
3	50	-	-	40	-	-	10	-	10	15	10	25
4	50	-	-	40	-	-	20	10	10	10	25	10
5	50	-	-	20	-	-	10	-	10	10	10	-

ตารางที่ 2 ระยะทางไปกลับจากประตูถึงตำแหน่งจัดเก็บ (d_j) หน่วย: เมตร

(d_j)	ตำแหน่งการจัดเก็บ (j)					
	1	2	3	4	5	6
ระยะทาง หน่วย: เมตร	5	10	15	20	25	30

5. **ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย Solver Engine**

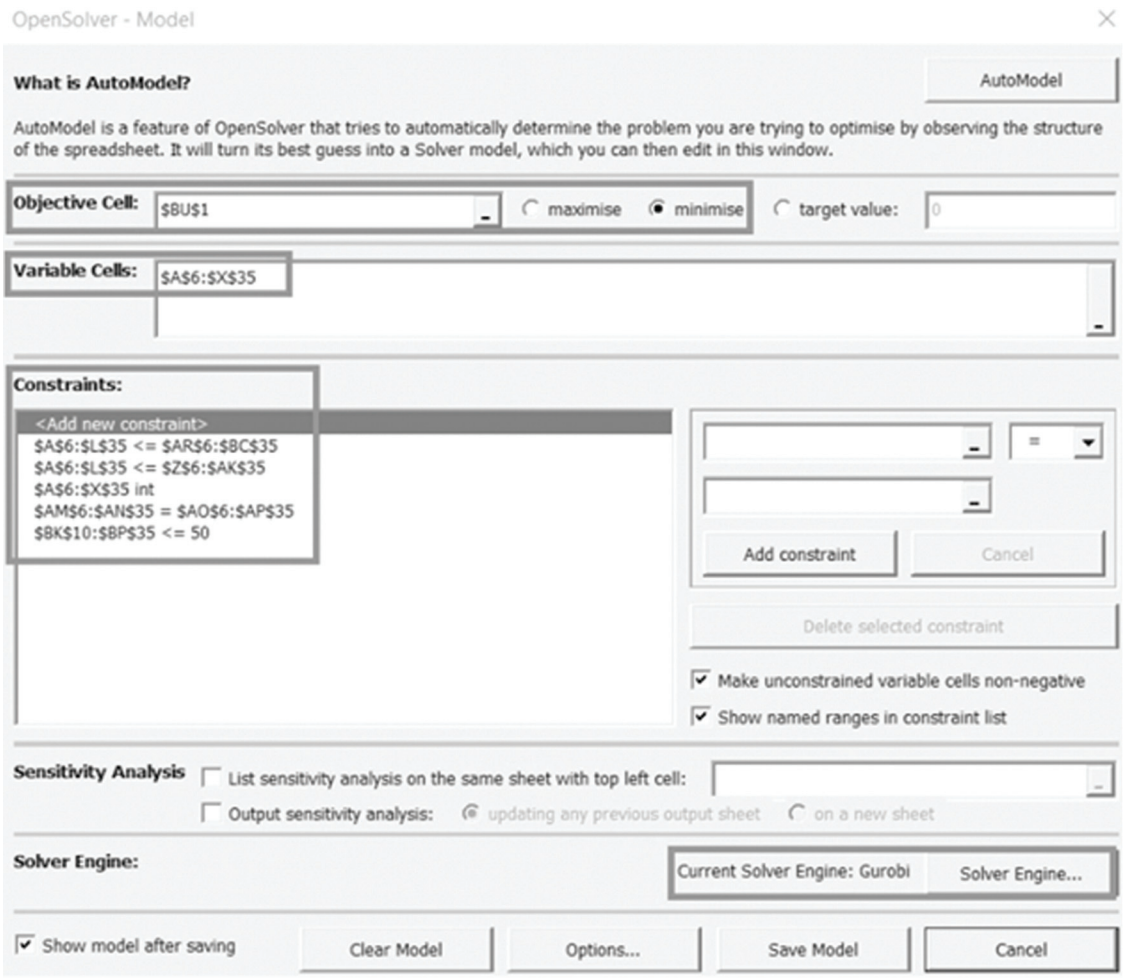
หลังจากได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกำหนดปัญหาขึ้นเพื่อทดสอบแล้ว ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นด้วย Add-in Open Solver ของโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย [15] ดังรูปที่ 4 และ 5 และมีรายละเอียดดังนี้

เซลล์วัตถุประสงค์ (Objective Cell) กำหนดให้หาค่าที่ต่ำที่สุด (Minimize) ซึ่งภายในเซลล์จะเป็นสมการวัตถุประสงค์ $Min\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left(d_j x_{ijt} + d_j y_{ijt}\right)$ สมการที่ (1) และ (11)

เซลล์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ (Variable Cell) สามารถกำหนดจำนวนของเซลล์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อให้ Solver Engine เปลี่ยนแปลงค่าในเซลล์ที่กำหนดเพื่อใช้หาค่าคำตอบที่เหมาะสม โดยตัวแปรตัดสินใจจะต้องอยู่ภายใน Variable Cell ซึ่งจะประกอบไปด้วย ตัวแปร $u_{ijt}, v_{ijt}, x_{ijt}, y_{ijt} \forall i,j,t$ และ $w_{ij} \forall i,j$

ข้อจำกัด (Constraints) คือส่วนที่ใช้กำหนดสมการข้อจำกัด ซึ่งสามารถกำหนดจำนวนของเซลล์ให้เป็นไปตามข้อจำกัดได้ โดยจะมีการกำหนดให้ มากกว่าหรือเท่ากับ น้อยกว่าหรือเท่ากับ และเท่ากับ ซึ่งจำนวนของเซลล์ที่อยู่ฝั่งซ้ายของสมการต้องเท่ากับจำนวนของเซลล์ที่อยู่ฝั่งขวาของสมการ หรือสามารถกำหนดให้เซลล์นั้น ๆ มีค่าเป็นจำนวนเต็ม มีค่าที่แตกต่างกัน หรือมีค่าเป็นเลขฐานสอง

เครื่องมือสำหรับแก้ไขปัญหา (Solver Engine) สามารถเลือกเครื่องมือสำหรับใช้แก้ไขปัญหาได้ โดยเครื่องมือแต่ละรูปแบบจะเหมาะสมตามแต่ละปัญหา ผู้วิจัยเลือก Gurobi Optimizer ซึ่งมีความเหมาะสมกับปัญหาการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มและแบบผสม



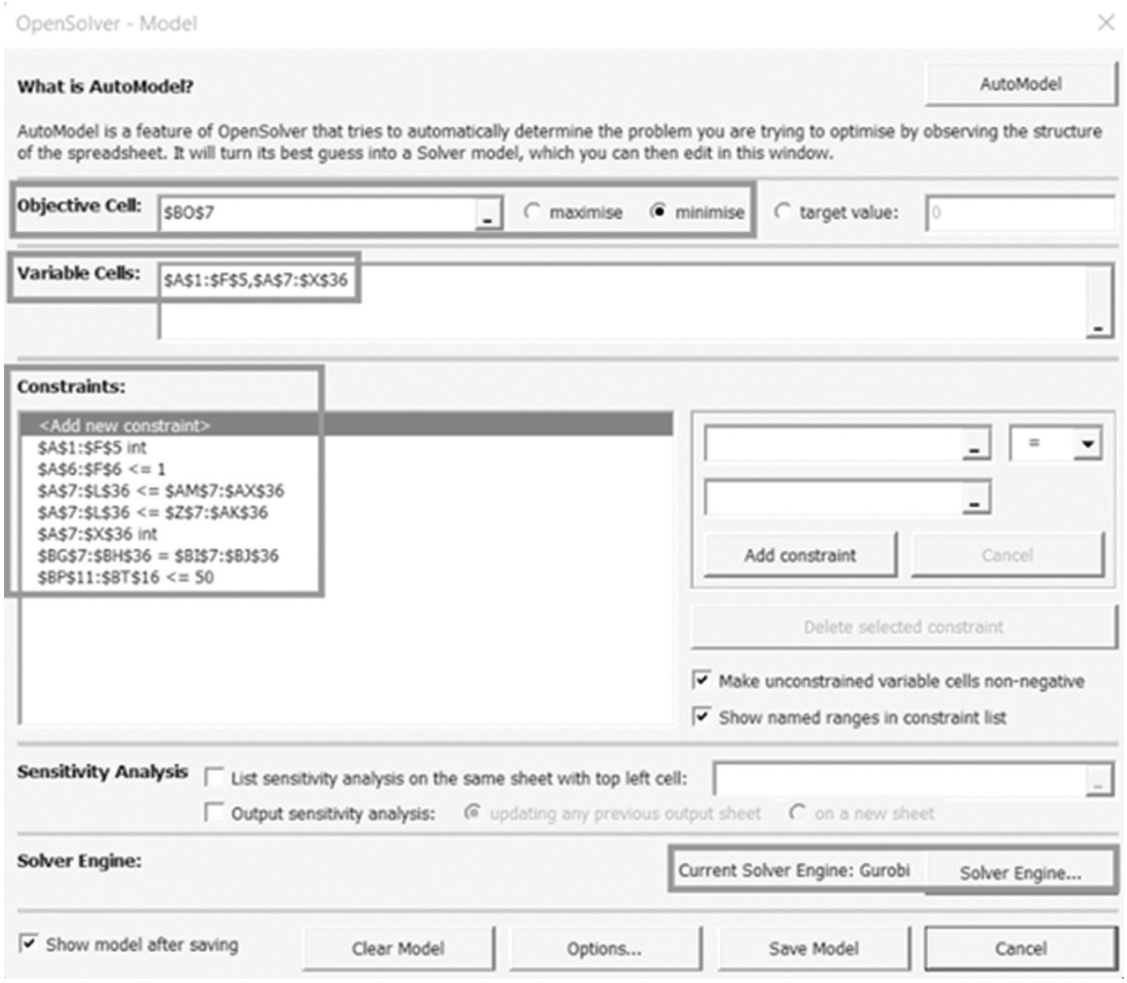
รูปที่ 4 การสร้างแบบจำลองนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม

ผลการทดลอง

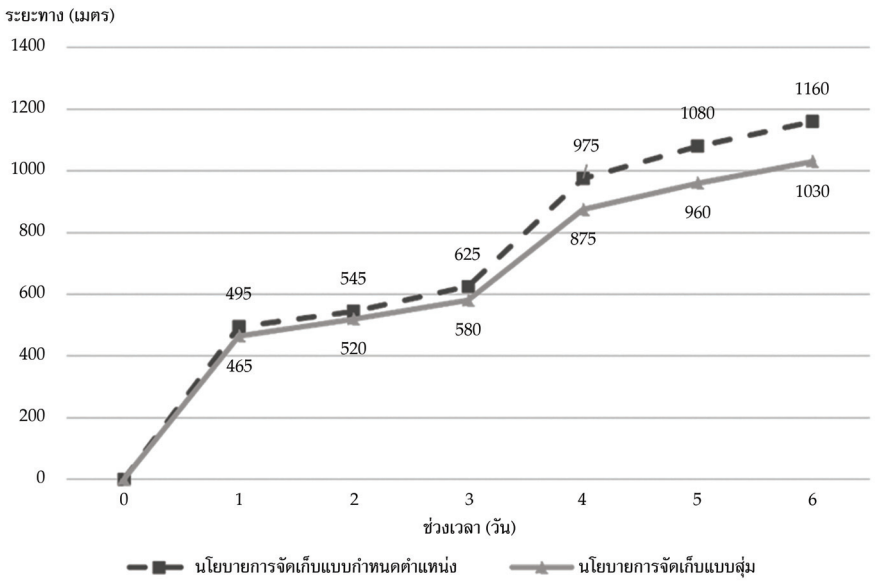
จากการทดสอบแบบจำลองด้วยปัญหาที่ได้กำหนดขึ้นพบว่านโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มให้ผลด้านการลดระยะทางการทำงานได้มากกว่านโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งในทุก ๆ ช่วงเวลา โดยมีระยะทางในการทำงานรวมทั้งหมด 1,030 เมตร ในขณะที่นโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งมีระยะทางทำงานรวมทั้งหมดสูงถึง 1,160 เมตร ดังรูปที่ 6

นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นยังสามารถแสดงค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้ จำนวนสินค้าคงคลังที่คงเหลือในตำแหน่งจัดเก็บต่าง ๆ ในทุก ๆ ช่วงเวลา ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากตัวแปร R_{ijt} ดังรูปที่ 7 และ 8 จำนวนสินค้าที่จะถูกจัดเก็บและหยิบที่ตำแหน่งจัดเก็บในช่วงเวลาต่าง ๆ u_{ijt}, v_{ijt} จำนวนรอบที่ใช้ในการจัดเก็บและหยิบ x_{ijt}, y_{ijt} ดังตารางที่ 3 สามารถอ่านค่าได้โดยเริ่มจากคอลัมน์ซ้ายไปขวายกตัวอย่างได้ดังนี้ ในแถวที่ช่วงเวลาที่ 1 สินค้าที่ 1 มีการจัดเก็บเข้าตำแหน่งจัดเก็บที่ 1 จำนวน 5 ชิ้น โดยต้องขนย้ายทั้งหมด 1 รอบ เข้าตำแหน่งจัดเก็บที่ 2 จำนวน 35 ชิ้น โดยต้องขนย้ายทั้งหมด 4 รอบ และเข้าตำแหน่งจัดเก็บที่ 3 จำนวน 10 ชิ้น โดยต้องขนย้ายทั้งหมด 1 รอบและมีการหยิบสินค้าจากตำแหน่งที่ 1 จำนวน 5 ชิ้น โดยต้องขนย้ายทั้งหมด 1 รอบ

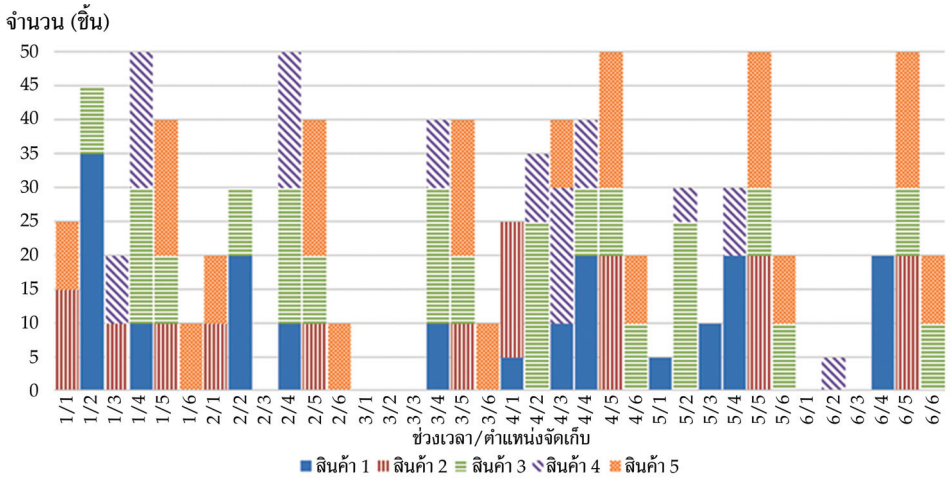
ISSN 2672-9369 (Online)



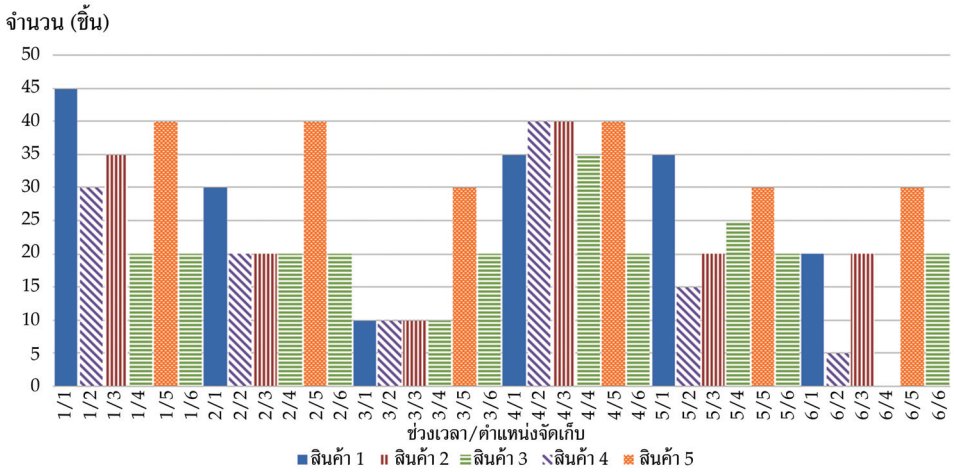
รูปที่ 5 การสร้างแบบจำลองนโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง



รูปที่ 6 ระยะทางการทำงานรวม



รูปที่ 7 สินค้าคงคลังของนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม



รูปที่ 8 สินค้าคงคลังของนโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตำแหน่งการจัดเก็บที่เหมาะสมสำหรับสินค้าในแต่ละช่วงเวลาและได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างนโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งและนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่ม จากการทดสอบแบบจำลองภายใต้ปัญหาที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นพบว่านโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มมีความเหมาะสมมากกว่านโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง เนื่องจากนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มมีประสิทธิภาพทางด้านการลดระยะทางการจัดเก็บและหยิบสินค้ามากกว่านโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง โดยภายใต้ปัญหาที่ได้ทดสอบนโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มให้ผลลัพธ์ด้านระยะทางรวมที่ใช้ในการจัดเก็บและหยิบสินค้าน้อยกว่านโยบายการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งถึง 11.2 % งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแบบจำลองสถานการณ์ภายใต้ปัญหาที่ผู้วิจัยได้กำหนดขึ้น เพื่อให้สามารถเห็นตัวอย่างการทำงานและเข้าใจการทำงานได้ง่ายมากขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีอื่น ๆ นโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มก็มีแนวโน้มที่จะให้ระยะทางการทำงานสั้นกว่าเนื่องจากใช้ช่องจัดเก็บขั้นต่ำน้อยกว่าเพราะสามารถจัดเก็บสินค้าหลายชนิดไว้ในตำแหน่งจัดเก็บเดียวกันได้

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 3 รูปแบบการหยิบและจัดเก็บสินค้า

ช่วงเวลา	สินค้า	การจัดเก็บแบบสุ่ม		การจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง	
		จัดเก็บ	หยิบ	จัดเก็บ	หยิบ
		ตำแหน่ง/จำนวน/รอบ	ตำแหน่ง/จำนวน/รอบ	ตำแหน่ง/จำนวน/รอบ	ตำแหน่ง/จำนวน/รอบ
1	1	1/5/1 2/35/4 3/10/1	1/5/1	1/50/5	1/5/1
	2	1/15/2 2/5/1 3/20/2 4/10/1	2/5/1 3/10/1	3/50/5	3/15/2
	3	1/10/1 2/10/1 4/20/2 5/10/1	1/10/1	4/30/3, 6/20/2	4/10/1
	4	3/30/3 4/20/2	3/20/2	2/50/5	2/20/2
	5	1/20/2 5/20/2 6/10/1	1/10/1	5/50/5	5/10/1
2	1	-	2/15/2	-	1/15/2
	2	-	1/5/1 3/10/1	-	3/15/2
	3	-	-	-	-
	4	-	3/10/1	-	2/10/1
	5	-	-	-	-
3	1	-	2/20/2	-	1/20/2
	2	-	1/10/1	-	3/10/1
	3	-	2/10/1	-	4/10/1
	4	-	4/10/1	-	2/10/1
	5	-	1/10/1	-	5/10/1
4	1	1/10/1 3/20/2 4/10/1	1/5/1 3/10/1	1/40/4	1/15/2
	2	1/30/3 5/10/1	1/10/1	3/40/4	3/10/1
	3	2/30/3 6/10/1	2/5/10 4/10/1	4/40/4	4/15/2
	4	1/10/1 2/10/1 3/20/2	1/10/1	2/40/4	2/10/1
	5	2/10/1 3/10/1	2/10/1	5/20/2	5/10/1
5	1	-	-	-	1/15/2
	2	-	1/20/2	-	3/10/1
	3	-	4/10/1	-	4/15/2
	4	-	2/5/1 3/20/2	-	2/10/1
	5	-	3/10/1	-	5/10/1
6	1	-	1/5/1 3/10/1	-	1/15/2
	2	-	-	-	-
	3	-	2/25/3	-	3/25/3
	4	-	4/10/1	-	2/10/1
	5	-	-	-	-

แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในคลังสินค้าธุรกิจค้าปลีก-ส่ง เนื่องจากปัญหาส่วนใหญ่ที่ธุรกิจค้าปลีก-ส่งพบเจอมักเป็นปัญหาด้านการกำหนดตำแหน่งจัดเก็บที่ไม่เหมาะสมทำให้ต้องเดินหยิบสินค้าไกล นอกจากนี้ธุรกิจประเภทนี้มักมีพื้นที่การจัดเก็บไม่เพียงพอดังนั้นจำเป็นที่ต้องมีการจัดเก็บสินค้าหลายชนิดรวมกันในตำแหน่งจัดเก็บเดียวกัน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ใช้ โปรแกรม Microsoft Excel ที่สามารถเข้าถึงและเรียนรู้ได้ง่ายส่งผลให้ผู้ประกอบการสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ โดยปัญหาที่ผู้วิจัยได้กำหนดขึ้นเป็นปัญหาขนาดเล็ก เพื่อใช้สาธิตหลักการและวิธีการทำงานของแบบจำลองให้เข้าใจได้ง่าย แต่หากต้องการนำไปใช้กับปัญหาขนาดใหญ่ขึ้น เช่น มีชนิดของสินค้าจำนวนมากขึ้น จำนวนของตำแหน่งจัดเก็บมากขึ้น และจำนวนของช่วงเวลามากขึ้น ก็สามารถทำได้ แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ใช้นำเข้าก็จำเป็นต้องมีความสอดคล้องกัน โดยที่จำนวนสินค้าที่ต้องรับเข้าคลัง ความต้องการของสินค้า และจำนวนตำแหน่งจัดเก็บนั้นจะต้องมีความสอดคล้องและเหมาะสม

ถึงแม้ว่านโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มจะให้ประสิทธิภาพด้านการลดระยะทางที่ดีกว่าในกรณีที่ได้ทดสอบด้วยปัญหาที่ผู้วิจัยได้กำหนดขึ้น แต่ควรมีการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้กับปัญหาในรูปแบบอื่น ๆ หรือนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริง โดยการวิจัยในอนาคตนั้นผู้วิจัยจะทำการประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากยิ่งขึ้นเพื่อศึกษานโยบายการจัดเก็บแบบสุ่มที่พิจารณาการจัดเก็บแบบแยกชนิดของสินค้าต่อตำแหน่งการจัดเก็บเพื่อให้สามารถนำนโยบายการจัดเก็บไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงได้ง่ายมากยิ่งขึ้น หรือเพิ่มการพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น ขนาดของสินค้า นอกจากนี้จะพิจารณาการรวมการกำหนดคำสั่งซื้อและการกำหนดตำแหน่งจัดเก็บเข้าด้วยกันเพื่อใช้ลดต้นทุนการบริหารคลังสินค้าให้ได้ต่ำที่สุด

References

[1] Office of the National Economic, and Social Development Council. (2020). **Thailand's Logistics Report 2020**. Access (30 June 2022). Available (https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=11803)

[2] Electronic Transactions Development Agency, and Ministry of Digital Economy and Society. (2021). **Value of E-Commerce Survey in Thailand 2021**. Access (30 June 2022). Available (https://www.etda.or.th/th/pr-news/ETDA-Reveals-the-Value-of-e-Commerce-in-2021.aspx)

[3] Pimpatchim, A., Supattananon, N., and Akararungrunngkul, R. (2020). Warehouse Location Selection Using Analytic Hierarchy Process for Special Controlled Warehouse. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 13, No. 2, pp. 56-71 (in Thai)

[4] Ramjan, S. (2019). Digital Logistics for Food Service in Service Business by Fuzzy Logic: A Case Study of Japanese Teppanyaki Kitchen. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 12, No. 2, pp. 115-137 (in Thai)

[5] Nanthasamroeng, N., Phayatham, P., and Suwandee, M. (2021). An Application of Lean Six Sigma Logistics for an Improvement for Supplies Warehouse in a Body & Paint Repairing Center. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 14, No. 2, pp. 14-27 (in Thai)

[6] Bartholdi, J. and Hankman, S. (2019). **Warehouse and Distribution Science Release 0.98.1**. Supply Chain Logist. Inst

ISSN 2672-9369 (Online)

[7] van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A., and de Koster, R. B. M. (2018). Designing Efficient Order Picking Systems by Combining Planning Problems: State-of-the-Art Classification and Review. **European Journal of Operational Research**. Vol. 267, Issue 1, pp. 1-15. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.09.002

[8] Bahrami, B., Piri, H., and Aghezzaf, E. H. (2019). Class-Based Storage Location Assignment: An Overview of the Literature. In O. Gusikhin, K. Madani, & J. Zaytoon (Eds.). In **Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1: ICINCO**. pp. 390-397. Setubal, Portugal: Scitepress. DOI: 10.5220/0007952403900397

[9] Reyes, J. J. R., Solano-Charris, E. L., and Montoya-Torres, J. R. (2019). The Storage Location Assignment Problem: A Literature Review. **International Journal of Industrial Engineering Computations**. Vol. 10, No. 2, pp. 199-224. DOI: 10.5267/j.ijiec.2018.8.001

[10] Khaiwthong, P. and Pitiruek, K. (2022). Layout Design to Determine Storage Location for an Agriculture Warehouse. **FEAT JOURNAL Farm Engineering and Automation Technology Journal**. Vol. 8, No. 1, pp. 69-77

[11] Na Chiangmai, N. and Pongsathornwiwat, A. (2022). Efficiency Improvement of Raw-Materials Warehouse by Designing of Optimal Layout and Storage Location Assignment in a Diaper Manufacturing. **Thai Industrial Engineering Network Journal**. Vol. 8, No. 1, pp. 28-38

[12] Cherdchom, U. and Peerapattana, P. (2019). The Improvement of Warehouse Management System to Determine Storage Location for the Product: A Case Study of Northeast Distribution Cen. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University**. Vol. 21, No. 2, pp. 65-74 (in Thai)

[13] Jienwatcharamongkhol, V. and Yaowasuwanchai, S. (2015). Planning in Advance for Determine Appropriate Location for Product in the Warehouse. **Kasetsart Egineering Journal**. pp. 73-86 (in Thai)

[14] Thi, N. T., Phung, P. T. K., and Tham, T. T. (2020). Optimizing Warehouse Storage Location Assignment under Demand Uncertainty. In **5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)**. pp. 562-568. DOI: 10.1109/GTSD50082.2020.9303113

[15] Taiji, E. (2021). **OpenSolver 2.9.4 Beta Release**. Access (30 June 2022). Available (https://opensolver.org/tag/google-sheets)

พฤติกรรมด้านกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ด้วยวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน

Compressive Strength Behavior of Clay Admixed Cement Under the Different Curing Conditions

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์[1*] และอนุชาติ ลื้อนันต์ศักดิ์ศิริ[1]

Worawit Phojan[1*] and Anuchat Leeanansaksiri[1]

Received: *September 1, 2022;* ***Revised:*** *November 5, 2022;* ***Accepted:*** *November 5, 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ที่บ่มแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ โดยมีแนวความคิดการศึกษาจากการก่อสร้างฝายชะลอน้ำโดยใช้ดินผสมซีเมนต์ (Core Zone Soil Cement Check Dam) การก่อสร้างฝายต้องทำอย่างรวดเร็วและตัวฝายต้องแช่น้ำหลังจากก่อสร้างเสร็จทันที การศึกษาจะแปรผันตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณความชื้น สภาวะการบ่มแบบแช่น้ำ และไม่แช่น้ำ และอายุบ่ม การศึกษาโดยใช้ดินเหนียวผสมกับปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 15 20 และ 25 ของน้ำหนักดินแห้ง ปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 80 100 และ 120 ของความชื้นที่เหมาะสม การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดแกนเดียวในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อซีเมนต์ต่ำค่ากำลังอัดก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ผลการบ่มแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำพบว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ถูกบ่มในน้ำตลอดเวลาจะมีกำลังอัดต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำ ตัวอย่างจะมีความเครียดที่จุดวิบัติและมีความเหนียว (Ductile) มากกว่าตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำเล็กน้อย ผลของการแช่น้ำในช่วงเริ่มต้นเป็นการทำให้อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างแบบแช่น้ำมีกำลังอัดลดลง

คำสำคัญ : ฝายชะลอน้ำ; กำลังอัดแกนเดียว; ดินซีเมนต์

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น*

[1] *Faculty of Engineering, North Eastern University, Khonkaen*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 9943 1604, E - mail: Worawit.Pho@neu.ac.th*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

This study investigated the unconfined compressive strength of cemented clay under soaked and unsoaked conditions. The concept of the study was the use of a soil-cement core zone for check dam construction. The check dam needs fast construction and must be immediately soaked in water after the end of construction. Influential factors of this study were cement content, water content, soaked/unsoaked conditions and curing times. The cement contents were 15, 20 and 25 % by weight of dry soil. The moisture contents were 80, 100 and 120 % of optimum moisture content. The study results indicated that unconfined compressive strength increased with an increase in curing time for all mixing ratios. The lower clay-water/cement ratio resulted in an increase in unconfined compressive strength. The results of soaked and unsoaked conditions showed that soil-cement samples in soaked conditions had lower compressive strength than those in unsoaked conditions. However, soil-cement samples in soaked conditions had more yield strength and ductility than soil-cement samples in unsoaked conditions. The effect of the initial soaked condition resulted in the clay-water/cement ratio increase in the unconfined compressive strength of samples in soaked condition lower.

Keywords: Check Dam; Compressive Strength; Soil Cement

บทนำ

ดินเป็นวัสดุที่สั่งทำไม่ได้ ทำให้ไม่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจึงเป็นสิ่งจำเป็น การบดอัดดินเป็นวิธีที่หนึ่งที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง [1] ทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties) ของดินให้ดีขึ้น ได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น การยุบตัวลดลงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลง และในปัจจุบันการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์เป็นที่นิยมและมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ซีเมนต์ที่ผสมลงไปในดินช่วยให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมดียิ่งขึ้นกว่าการบดอัดดินเพียงอย่างเดียว จึงนิยมมาใช้กับงานปรับปรุงดินในหลาย ๆ ด้าน เช่น การทำเสาเข็มดินซีเมนต์ การปรับปรุงชั้นรองพื้นทางสำหรับงานถนน เป็นต้น การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ถูกนำมาปรับปรุงอยู่ 2 แบบ คือ แบบผสมที่ปริมาณความชื้นสูงสำหรับทำเสาเข็มดินซีเมนต์ และการผสมกับดินแล้วบดอัดด้วยปริมาณความชื้นต่ำ

กรมชลประทานถือเป็นหน่วยงานหลักที่ดำเนินโครงการตามแนวพระราชดำริในการบริหารจัดการน้ำเพื่อเกษตรกรด้วยเหตุนี้เองทางศูนย์ปฏิบัติการบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำ ซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้สำนักงานก่อสร้างชลประทานที่ 6 กรมชลประทาน จังหวัดขอนแก่น เป็นหน่วยงานที่ริเริ่มแนวคิดในการสร้างฝายชะลอน้ำแทนรูปแบบเดิม ด้วยปัญหาของการบำรุงรักษาและความคงทนของฝายชะลอน้ำแบบเดิม เนื่องจากการก่อสร้างทำขึ้นอย่างง่ายด้วยวัสดุในพื้นที่ส่งผลให้ฝายไม่แข็งแรงเท่าที่ควร เมื่อถึงฤดูน้ำหลาก ฝายจะเกิดความเสียหายส่งผลให้ต้องมีการก่อสร้างใหม่เป็นประจำทุกปี ชาวบ้านจึงต้องช่วยกันบูรณะซ่อมแซมอยู่ตลอด อีกทั้งฝายหินทิ้งนั้นยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอต่อการกักเก็บน้ำในระยะยาวเนื่องจากน้ำสามารถลอดผ่านช่องระหว่างแนวหินไปได้ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ไม่เพียงพอใช้ตลอดช่วงฤดูแล้ง [2] ดังรูปที่ 1 ด้วยเหตุนี้จึงได้มีแนวความคิดในการก่อสร้างฝายชะลอน้ำให้มีความคงทนแข็งแรง ลดการทรุดตัวและการซึมผ่านของน้ำ วัสดุที่ใช้ก่อสร้างสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น มีรูปแบบการก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อน และรวดเร็วขึ้นแต่ประสบปัญหาด้านความแข็งแรงและคงทน ทำให้ต้องมีการสร้างขึ้นใหม่ในทุก ๆ ปี ดังนั้นทางศูนย์ปฏิบัติการบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำได้ทำรูปแบบฝายชะลอน้ำโดยใช้วัสดุก่อสร้างที่หาได้ทั่วไปร่วมกับเทคนิคการปรับปรุงดินโดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์) โดยใช้ชื่อเรียกว่าฝายชะลอน้ำร่องแกนดินซีเมนต์ (Core Zone Soil Cement Check Dam)

(ก) ลำห้วยก่อนสร้างฝาย

(ข) หลังสร้างฝายชะลอน้ำ

รูปที่ 1 ก่อนและหลังก่อสร้างฝายชะลอน้ำ

การบริหารจัดการน้ำโดยใช้การเก็บกักน้ำไว้ในลำน้ำ โดยใช้รูปแบบฝายชะลอน้ำแบบร่องแกนดินซีเมนต์ (Core Zone Soil Cement Check Dam) พื้นที่ศึกษา เทศบาลตำบลบ้านเป็ด อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น โดยสร้างขวางลำน้ำห้วยบ่อ 20.0 meter สันฝายสูง 2.0 meter และกว้าง 2.0 meter ร่องแกนฝายลึกไม่น้อยกว่า 3.0 meter ผลจากการเก็บกักน้ำส่งผลให้ระดับน้ำด้านท้ายฝายยกระดับลำน้ำสูงขึ้นเป็นระยะทางยาวมากกว่า 3.0 กิโลเมตร การก่อสร้างจะใช้ดินในพื้นที่มาผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน (ปูนซีเมนต์:ดิน) เท่ากับ 1:10 ถึง 1:30 ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน การก่อสร้างจะต้องใช้เวลาก่อสร้างอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นเส้นทางน้ำไหลจะต้องทำการเบี่ยงเบนลำน้ำเพื่อสร้างฝาย ดังนั้นพื้นที่ก่อสร้างจะต้องนำดินมาผสมกับปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนแล้วบดอัดให้แล้วเสร็จภายใน 3 - 5 วัน หลังจากนั้นจะปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวฝายทันที [2] ดังรูปที่ 2

(ก) การขุดร่องแกนฝายชะลอน้ำ

(ข) การบดอัดดินซีเมนต์หน้าและหลังฝายชะลอน้ำ

(ค) การปูแผ่นใยสังเคราะห์หน้าและหลังฝาย

(ง) การวางกล่องเกเบี้ยนบรรจุหินใหญ่

รูปที่ 2 การก่อสร้างฝายและการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์

ISSN 2672-9369 (Online)

ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวความคิดในการทำวิจัยเพื่อศึกษาถึงกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ถูกแช่น้ำตลอดเวลาในช่วงเวลาของการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ โดยอาศัยตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ สภาวะการบ่มในห้องและบ่มแบบแช่น้ำ และอายุบ่ม

วิธีดำเนินการศึกษา

1. **ดินเหนียว**

ดินที่ใช้ในการศึกษา คือ ดินเหนียวปนตะกอนในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ที่ความลึกประมาณ 3.0 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ได้ดินที่มีลักษณะเหมือนกันมากที่สุดไม่ให้มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนดินตัวอย่างถูกเก็บมาผึ่งแดดให้แห้งแล้วย่อยดินด้วยค้อนยาง ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เพื่อเอาเศษหญ้า กิ่งไม้ ใบไม้ออก หลังจากนั้นเก็บในถังพลาสติกในสภาพแห้งเพื่อเตรียมการบดอัด ขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 44 และ 10.87 ดินมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีพลาสติกต่ำ (CL) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (USCS)

2. **ปูนซีเมนต์**

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็นร้อยละ 15 20 และ 25 ของน้ำหนักดินแห้ง

3. **การบดอัดดิน** การบดอัดจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

3.1 การทดสอบการบดอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์ เป็นการทดสอบเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content) รวมถึงกราฟการบดอัด (Compaction Curve) ของดินตัวอย่างโดยใช้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ในแบบหล่อ (Mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร สูง 116.8 มิลลิเมตร

3.2 การทดสอบการบดอัดของดินผสมซีเมนต์ ตัวอย่างดินผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 20 และ 25 ของน้ำหนักดินแห้งให้เข้ากัน แล้วผสมน้ำตามปริมาณความชื้น โดยจะแปรผันปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 80 100 และ 120 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Water Content) หลังจากนั้นบ่มใส่ถุงพลาสติกเป็นเวลา 2 ชม. เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วดินตัวอย่าง แล้วบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) หลังจากบดอัดเสร็จทิ้งตัวอย่างไว้ 3 วัน ตัวอย่างแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 นำตัวอย่างห่อด้วยแผ่นผ้าใยสังเคราะห์แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 7 14 28 และ 60 วัน ชุดที่ 2 ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่บดอัดเสร็จแล้วจะถูกห่อด้วยฟิล์มพลาสติกแล้วบ่มทิ้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 7 14 28 และ 60 วัน เช่นกัน

4. **การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว**

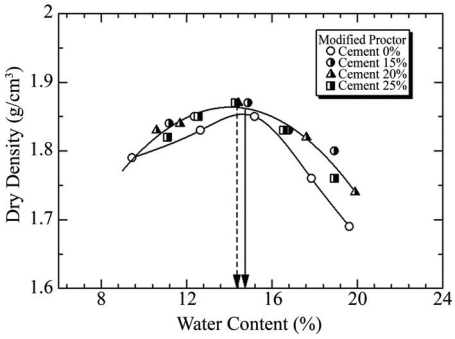
เมื่อตัวอย่างดินซีเมนต์ครบอายุบ่ม นำตัวอย่างดินไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยตัวอย่างที่แช่น้ำจะต้องนำขึ้นมาจากน้ำแล้วทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบต้องทำการชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลาง การกดตัวอย่างจะใช้อัตราการกด 0.5 % ของความสูงดินตัวอย่าง จนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติแล้วบันทึกผลการทดสอบ

ผลการศึกษา

1. **พฤติกรรมด้านกำลังอัดของดินเหนียวบดอัดผสมซีเมนต์**

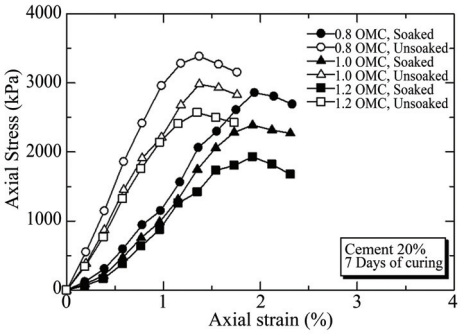
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้นของดินเหนียวที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 0 15 20 และ 25 จากกราฟการบดอัดจะเห็นได้ว่าดินซีเมนต์มีความไวตัวต่อน้ำสูงกว่าดินไม่ผสมซีเมนต์ ในช่วงปริมาณความชื้นทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังจะเห็นได้จากหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของน้ำ หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์มีค่าสูงกว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินไม่ผสมซีเมนต์เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์สูงกว่า

ดินเหนียว ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินไม่ผสมซีเมนต์และดินผสมซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างที่บ่มแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ ที่จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันวิธีบ่มต่างกัน กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่บ่มแบบไม่แช่น้ำมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่บ่มแบบแช่น้ำสำหรับทุกปริมาณความชื้นมีค่าต่างกัน ในขณะที่ความเครียดที่จุดวิบัติของตัวอย่างดินซีเมนต์แบบไม่แช่น้ำจะมีค่าความเครียดที่จุดวิบัติสูงกว่าดินซีเมนต์แบบแช่น้ำ เนื่องจากหลังจากบดอัดภายใต้การบ่มในอุณหภูมิห้องในระยะเวลาอันสั้น (3 วันก่อนแช่น้ำ) อนุภาคของซีเมนต์ที่ Unhydrated จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นซึ่งจะทำให้ซีเมนต์เจลแทรกตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงนี้ยังไม่เกิดสมบูรณ์ เมื่อนำตัวอย่างดินลงไปแช่ในน้ำเท่ากับเพิ่มปริมาณความชื้นในตัวอย่างในช่วงการพัฒนากำลังอัด ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้นและตัวอย่างดินซีเมนต์แบบแช่น้ำแสดงพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) และส่งผลให้กำลังอัดของตัวอย่างลดลง [3]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูน 20 % อายุบ่ม 7 วัน

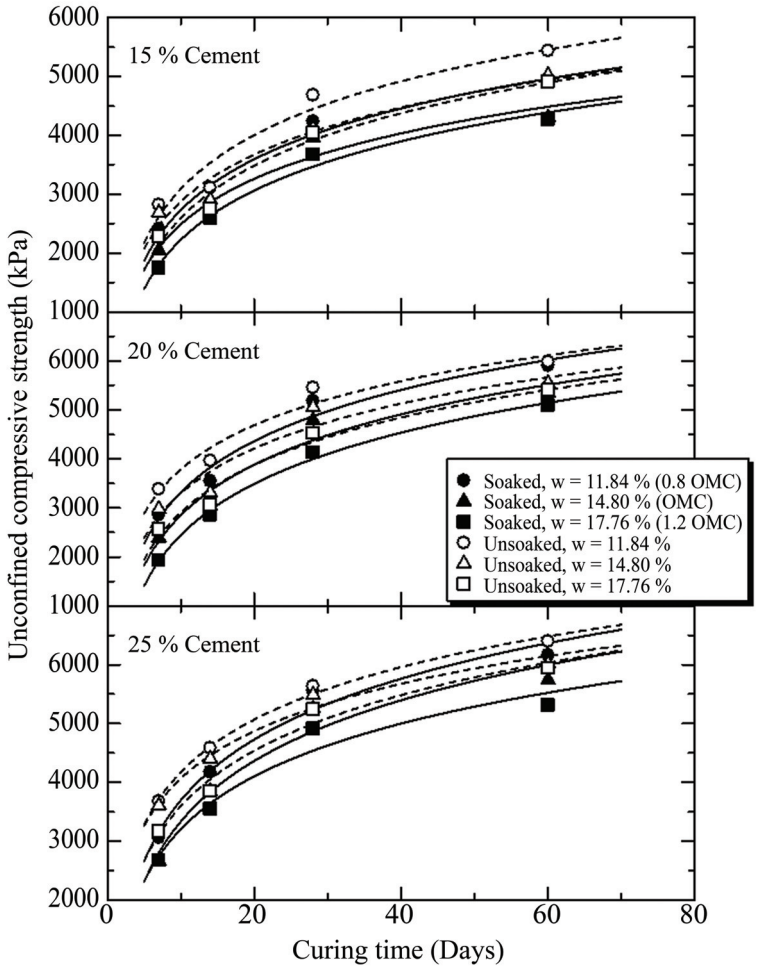
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว จากการทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่สภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 15 20 และ 25 และปริมาณค่าความชื้นเท่ากับ 0.80 1.0 และ 1.20 OWC ของค่าความชื้นที่เหมาะสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มเดียวกัน กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างแบบแช่น้ำมีค่าต่ำกว่าแบบไม่ใช่น้ำในทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากตัวอย่างดินซีเมนต์แบบแช่น้ำจะทำให้อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อซีเมนต์สูงขึ้นและมีโอกาสบวมตัวในช่วงระยะเวลาการแช่น้ำในช่วงแรก ๆ ส่งผลให้กำลังอัดต่ำลง [4] ซึ่งวิธีการบ่มในงานวิจัยจะแตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่ระบุว่าการให้อุณหภูมิการบ่มของตัวอย่างต่ำทำให้กำลังอัดต่ำ เมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่ากำลังอัดก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย [5] - [8]

ISSN 2672-9369 (Online)

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวที่รูปแบบการบ่มแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์แช่น้ำมีค่าต่ำกว่าแบบไม่แช่น้ำเป็นฟังก์ชันแบบ Linear ดังสมการที่ (1)

$$q_{u(Soaked)} = 0.917(q_{u(Unsoaked)}) \tag{1}$$

ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แบบแช่น้ำต่ำกว่าแบบไม่แช่น้ำประมาณร้อยละ 8 - 10 โดยมีค่า Coeffificient of Correlation เท่ากับ 0.975



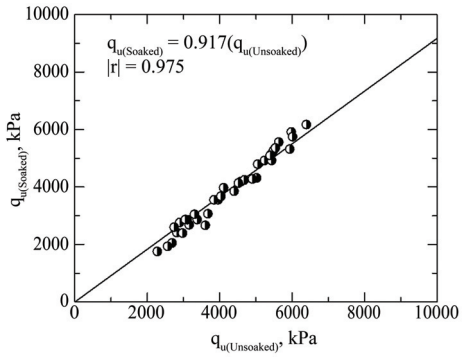
รูปที่ 5 การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่บ่มแบบไม่แช่น้ำและบ่มแบบแช่น้ำที่ปริมาณซีเมนต์ปริมาณความชื้น และอายุบ่มต่าง ๆ

2. การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวบดอัดผสมซีเมนต์กับเวลา

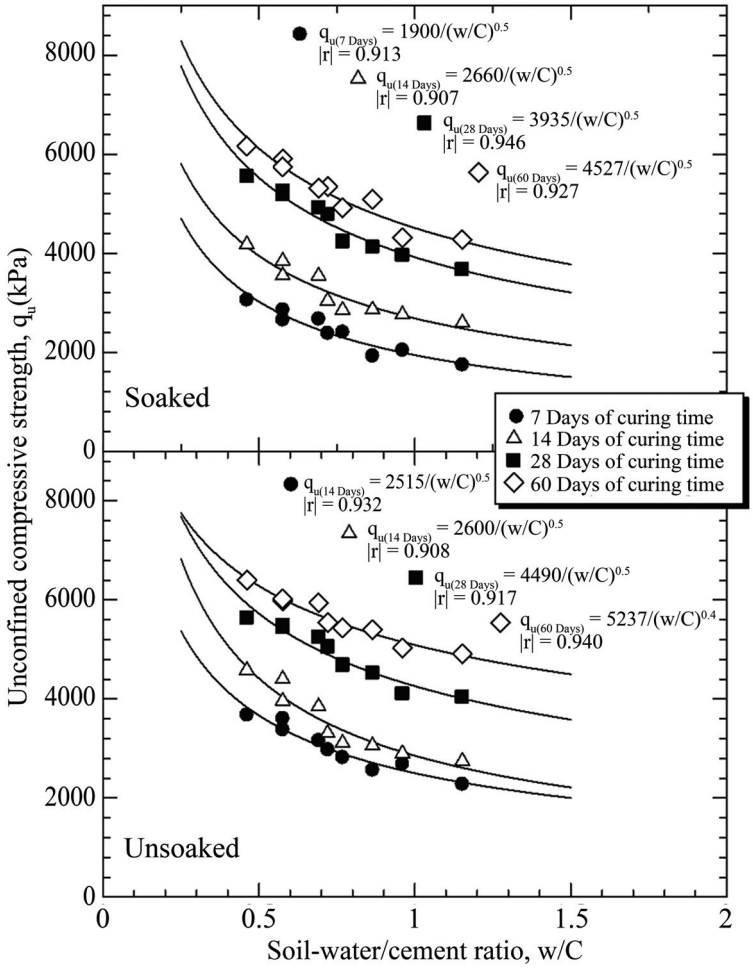
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใด ๆ ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ในฟังก์ชันกำลัง (Power Function) ดังสมการที่ (2)

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w}{C}\right)^B} \tag{2}$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่แปรผันตามชนิดของดินและ qu คือกำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ พารามิเตอร์ A และ B หาได้จากการทำ Multi-Regression Analysis ของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ค่าของพารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม พารามิเตอร์ B มีค่าประมาณคงที่ไม่แปรผันตามอายุบ่มที่ 0.50 [9]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่บ่มแบบไม่แช่น้ำและบ่มแบบแช่น้ำ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วน w/c ของดินเหนียวผสมซีเมนต์บดอัด

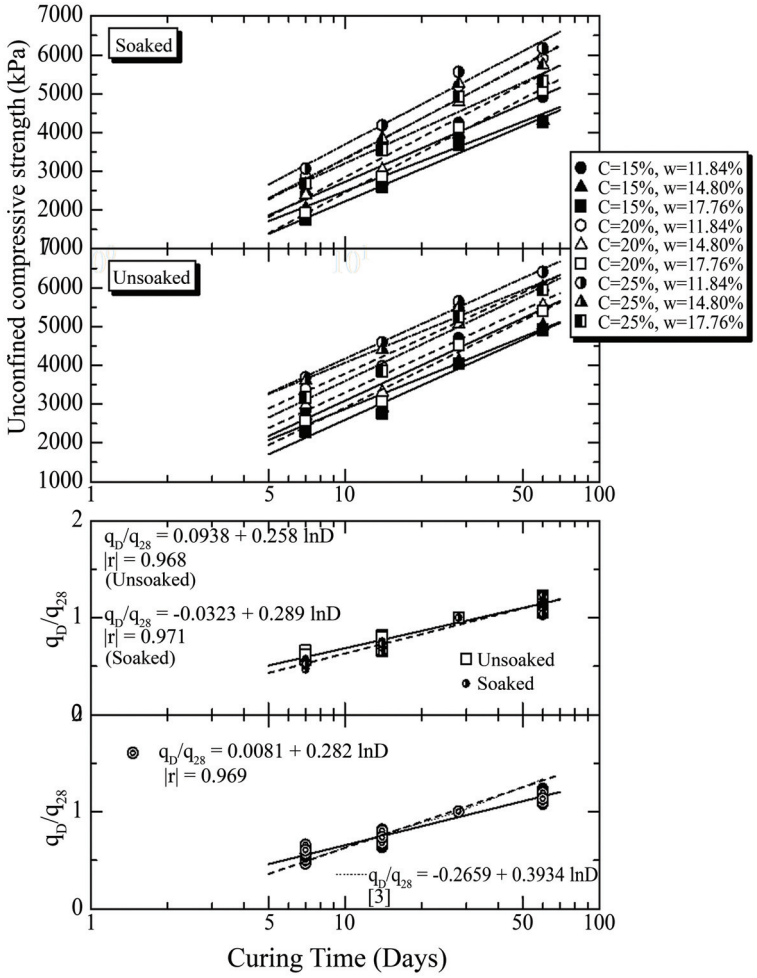
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มที่ปริมาณปูนซีเมนต์ รูปแบบการบ่ม ปริมาณความชื้นต่าง ๆ ของดินซีเมนต์ จากการสังเกตพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มเป็นฟังก์ชันลอการิทึม การพัฒนากำลังอัดขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลักที่ค่า w/C ค่าหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ A เท่านั้น เนื่องจากตัวแปร B มีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกอายุบ่ม ความสัมพันธ์ระหว่าง

ISSN 2672-9369 (Online)

กำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} = \text{ค่าคงที่} \tag{3}$$

เมื่อ q_{D_1} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม D_1 วัน และ q_{D_2} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม D_2 วัน และ A_{D_1} A_{D_2} คือพารามิเตอร์ A ที่สอดคล้องกับอายุบ่ม D_1 และ D_2



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม

จากหลักการดังแสดงด้วยสมการที่ (2) ผู้วิจัยได้ทำการ Normalization ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับอายุบ่ม (D) ภายใต้สภาวะตัวแปรต่าง ๆ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ รูปแบบการบ่ม และปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์ โดยใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นค่าอ้างอิงดังรูปที่ 8 ผลจากการ Normalization ของผลทดสอบกำลังอัดแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำและทั้งสองแบบจะได้ดังสมการที่ (4) - (5)

(Soaked) $$\frac{q_D}{q_{28}} = -0.0323 + 0.289 \ln D \tag{4}$$

(Unsoaked) $$\frac{q_D}{q_{28}} = -0.0938 + 0.258 \ln D \tag{5}$$

และการบ่มทั้งสองแบบจะได้ดังสมการที่ (6)

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.0081 + 0.282 \ln D \tag{6}$$

เมื่อ q_D และ q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D ใด ๆ และกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าที่อายุบ่ม 28 วัน ตามลำดับ เปรียบเทียบผลการทดสอบดินซีเมนต์ของ [3]

สรุปผลการศึกษา

1. อัดแกนเดียวในทุกอัตราส่วนผสม (ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณความชื้น รูปแบบการบ่ม) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอายุบ่ม
2. กำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์จะแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/C) กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่ำลง
3. ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันวิธีบ่มต่างกัน กำลังอัดแกนเดียวมีค่าต่างกัน ดินซีเมนต์ที่บ่มแบบแช่น้ำกำลังอัดจะต่ำกว่าแบบไม่แช่น้ำ เนื่องจากการแช่น้ำในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นเป็นการเพิ่มริมาณความชื้นในดิน ทำให้อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อซีเมนต์สูงขึ้น ทำให้กำลังอัดต่ำลง
4. ตัวอย่างดินซีเมนต์แบบไม่แช่น้ำจะมีความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าดินซีเมนต์แบบแช่น้ำที่แสดงพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณภัทรพล ณ หนองคาย ผู้อำนวยการโครงการก่อสร้างสำนักชลประทานที่ 6 จังหวัดขอนแก่น ศูนย์ปฏิบัติการบรรเทาภัยอันเกิดจากน้ำ และมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่มอบทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

References

[1] Katkan, W., Kumpala, A., and Horpibulsuk, S. (2008). An Approach for Assessement of Compaction Curves of Soils at Various Energies Using A One Point Test. **RMUTI JOURNAL**. Vol. 1, No. 2, pp. 15-31 (in Thai)

[2] Na Nongkhai, P., Phojan, W., Pongnam, T., Chamchong, B., and Konyai, S. (2017). Core Zone Soil Cement Check Dam for Water Resource Management. **International Conference on Engineering and Natural Science-Summer Session**. Supporo Japan. August 23-25, 2017, pp. 88-99

[3] Horpibulsuk, S., Rachan, R., Papattanotai, S., and Nagaraj, T. S. (2006). Analysis of Strength Development of Cement Stabilized Clay from Microstructural Consolidations. In **Proceeding International Symposium on Lowland Technology**. Saga, Japan, pp. 115-120

[4] Jindapon, S., Yimsiri, S., Soralump, S., and Mitaim, S. (2006). Cement and Lime Stabilization of Soil in Submerged Condition. **Kasetsart Engineering Journal**. Vol. 20, No. 59, pp. 52-60 (in Thai)

ISSN 2672-9369 (Online)

[5] Corp of Engineer. (1956). Summary Reviews of Soil Stabilization. In **Proceeding, No. 13, Soil-Cement, Miscellaneous Paper, No. 3-122**. Water Experiment Station, Vicksburg, p. 38

[6] Portland Cement Association. (1969). **Soil-Cement Construction Handbook**. Construction Inspection Field Control. p. 11

[7] Ingles, O. G. and Metcalf, J. B. (1972). **Soil Stabilization Principles and Practice**. Sydney. Butterworth PTY., p. 200

[8] Clare, K. E. and Pollard, A. E. (1954). The Effect Of Curing Temperature On the Compressive Strenght Of Soil-Cement Mixtures. **Geotechnique**. Vol. 4, Issue 3, pp. 97-107. DOI: 10.1680/geot.1954.4.3.97

[9] Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T. S. (2003). Assessment of Strength Development in Cement - Admixed High Water Content Clay with Abrams Law as a Basic. **Geotechnique**. Vol. 53, Issue 4, pp. 439-444. DOI: 10.1680/geot.2003.53.4.439

คุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด

Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Paste Mixed with Ground Clay Brick

ไพฑูรย์ นาแซง[1] อำพล วงศ์ษา[1] วันชัย สะตะ[1*] และปริญญา จินดาประเสริฐ[1,2]

Phaithun Nasaeng[1] Ampol Wongsa[1] Vanchai Sata[1*] and Prinya Chindaprasirt[1,2]

Received: *October 28, 2022;* ***Revised:*** *December 6, 2022;* ***Accepted:*** *December 6, 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด วัสดุหลักใช้คือ เถ้าลอยแคลเซียมสูงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เศษอิฐมอญบดละเอียดใช้แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ในอัตราส่วนเท่ากับ 1.0 กำหนดอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลต่อวัสดุผงคงที่เท่ากับ 0.60 ทุกอัตราส่วนผสม ทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้ SEM/EDS, XRD และ FTIR ผลวิจัยพบว่าเศษอิฐมอญบดละเอียดเป็นวัสดุซิลิกาที่มีความเป็นผลึกสูง การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษอิฐมอญบดละเอียดในส่วนผสมช่วยเพิ่มให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น ในขณะที่การไหลแผ่และกำลังอัดลดลง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าสารประกอบ C-S-H หรือ C-A-S-H และเจลจีโอโพลิเมอร์ได้ก่อตัวขึ้นในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงจะเกิดผลึกและอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางกลในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 25 – 50 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 60 วันต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อย

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์เพสต์; เถ้าลอยแคลเซียมสูง; เศษอิฐมอญบดละเอียด; โครงสร้างทางจุลภาค

[1] *ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

[2] *ภาคีสมาชิก ราชบัณฑิตยสภา สนามเสือป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร*

[1] *Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Faculty of Engineering, Khon Kaen University*

[2] *Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Bangkok*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 1592 8191, E - mail: vancsa@kku.ac.th*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

This research aimed to study the properties of geopolymer paste using high calcium fly ash mixed with ground clay brick. The main raw material used was high-calcium fly ash from Mae Moh Power Plant, Lampang Province. Ground clay brick was used to partially replace high calcium fly ash at the ratios of 0, 25, 50, 75, and 100 by weight. Sodium silicate and 10 molar of sodium hydroxide solutions were used as alkali solutions at the ratio of 1.00. The alkali liquid to solid powder ratio was kept constant for all mixes at 0.60. The flow value, setting time, compressive strength, and microstructure analysis by SEM/EDS, XRD, and FTIR of the geopolymer paste were tested. The results showed that ground clay brick had highly crystalline silica materials. An increase in the number of ground clay bricks increased the setting time while the flow value and compressive strength decreased. The microstructural analysis showed that the C-S-H or C-A-S-H compounds and geopolymer gels were formed in the geopolymer pastes. When high-calcium fly ash was replaced with ground clay brick, more crystals and non-reactive particles were generated, which negatively affected the mechanical properties at an early age. However, the replacement at a rate of 25 - 50 % had slightly lower 60-day compressive strength than the control sample.

Keywords: Geopolymer Paste; High Calcium Fly Ash; Ground Clay Brick; Microstructure

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นในหลายด้าน มีความแข็งแรงและคงทนใกล้เคียงหรือดีกว่าสารซีเมนต์แบบดั้งเดิม [1] การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยใช้วัสดุผงอะลูมิโนซิลิเกตทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไล [2] ในปฏิกิริยาจะเกิดการชะละลายอนุภาคของวัตถุดิบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นสารละลายแล้วเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างสามมิติที่มีความซับซ้อน [3] ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์มีการศึกษาและวิจัยมาอย่างต่อเนื่องทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถก่อตัวได้เร็ว มีกำลังสูงและทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดและซัลเฟต [4] - [6] อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เนื่องจากในการผลิตใช้พลังงานและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่ำ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม อาทิเช่น ในปี ค.ศ. 2017 การศึกษาเชิงทดลองของ [7] ได้ผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงกว่า 40 เมกะปาสคาล โดยใช้เถ้าลอยผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 [8] ได้ผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกำลังสูงจากเถ้าลอยที่เหลือทิ้งจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถปรับปรุงคุณภาพและนำมาใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ อย่างเช่น ในการศึกษาของ [9] พบว่าเถ้าก้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดให้มีขนาดค้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่มีความสามารถทำงานได้และความแข็งแรงค่อนข้างดีได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ [10] ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าขยะที่มีความละเอียดสูงผสมเถ้าลอยสามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ได้

ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากวัสดุต่างชนิดกัน โดยมีงานวิจัยจำนวนมากกว่าร้อยละ 70 ใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบหลัก [11] ซึ่งอาจจะมาจากเหตุผลที่เถ้าลอยเป็นเถ้าทิ้งจากโรงไฟฟ้าและมีปริมาณมากในแต่ละวัน สามารถพบได้ในหลายพื้นที่และทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ในประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนหลายแห่งที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน น้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติและพลังงานนิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ตั้งอยู่ในทางตอนเหนือของประเทศ

โรงไฟฟ้าแห่งนี้มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงทำให้มีเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเกิดขึ้นประมาณ 3.0 ล้านตันต่อปี [12] เถ้าลอยส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต [13] และยังสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเถ้าลอยมีออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาที่มีทั้งความเป็นอสัณฐานและผลึกในอนุภาคเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามจากรายงานวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาพบว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีแนวโน้มสูงขึ้นทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว จากรายงานวิจัยของ [14] พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายอยู่ในช่วงประมาณ 60 - 100 นาที และจากรายงานวิจัยของ [15] แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นกว่าคอนกรีตทั่วไปเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอิออน Ca^{2+} อาจจะพัฒนาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) [14] หรือแคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (C-(A)-S-H) ช่วยเร่งการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ในอุณหภูมิปกติได้ [16]

การใช้วัสดุร่วมเพื่อลดปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้ [17] ได้กล่าวถึงประเด็นนี้ว่าการลดปริมาณเถ้าลอยแคลเซียมสูงโดยการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแคลเซียมต่ำในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะช่วยลดปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ทำหน้าที่เร่งการก่อตัวเนื่องจากเกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ [18] ที่พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C (ปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18) มีระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายเท่ากับ 80 และ 105 นาที ตามลำดับ การใช้ตะกรันเหล็กชนิดที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ (ประมาณร้อยละ 13) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 ช่วยเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายได้มากกว่าสองเท่า แต่การใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดรูพรุนและโพรงคาปิลลารีมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของการใช้วัสดุผสมร่วมแต่ละชนิดที่จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

เศษอิฐมอญเป็นวัสดุขยะจากการผลิตอิฐเพื่อจำหน่ายและการก่อสร้างหรือเกิดจากการรื้อถอนทำลาย ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าผงละเอียดจากเศษวัสดุนี้มีซิลิกาออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก [19] เมื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต [20] เมื่อพิจารณาถึงศักยภาพเบื้องต้นมีความเป็นไปได้และควรศึกษาเพิ่มเติมในการใช้เศษอิฐมอญเป็นวัตถุดิบร่วมกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการ ได้แก่ ชะลอการก่อตัวเพิ่มระยะเวลาในการทำงานได้และการพัฒนากำลังอัด นอกจากนี้ยังเพิ่มแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์และเพิ่มตัวเลือกวัสดุที่สามารถนำมาใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างในอนาคต จากข้อมูลที่กล่าวมางานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญและการใช้เศษอิฐมอญล้วนเป็นวัสดุตั้งต้น โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติของเพสต์สด ได้แก่ ค่าการไหลแผ่และระยะเวลาการก่อตัว อีกทั้งยังทำการศึกษาคุณสมบัติของเพสต์ที่แข็งตัว ได้แก่ กำลังรับแรงอัด การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาค

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

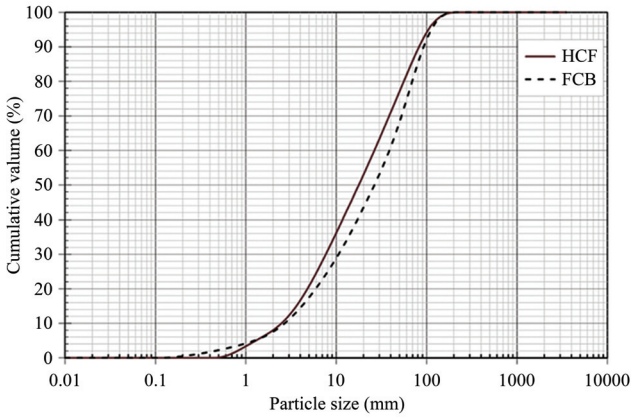
1. **วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย**

วัตถุดิบหลักใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง (HCF) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง วัสดุทดแทนใช้เศษอิฐมอญบดละเอียด (FCB) จากสถานที่ก่อสร้างในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น โดยจะนำเศษอิฐมอญมาอบให้แห้งในตู้อบ 100 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบให้มี

ISSN 2672-9369 (Online)

ขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย จากการทดสอบความละเอียดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C430 – 17 [21] พบว่าเถ้าลอยและเศษอิฐมอญบดละเอียดมีค่าร้อยละค้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 25.3 และ 28.3 การกระจายตัวของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ดังตารางที่ 1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผงโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) พบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจัดเป็นเถ้าลอยประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [22] เนื่องจากมีผลรวมออกไซด์ของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 55.40 และมีออกไซด์ของ CaO มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ในส่วนของเศษอิฐมอญบดละเอียดพบว่ามีออกไซด์ของ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีผลรวมออกไซด์ของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 เป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลานประเภท N [23] รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าลอยและเศษอิฐมอญบดละเอียดพบว่าอนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะกลมมีขนาดเล็กและขนาดกลางคละกับขนาดใหญ่ ในขณะที่เศษอิฐมอญบดละเอียดจะมีขนาดใหญ่มากกว่าสอดคล้องกับการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค รูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเถ้าลอยและเศษอิฐมอญบดละเอียดพบว่าอนุภาคที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยประกอบด้วยเฟสผลึกของแอนไฮไดรต์ ($Ca(SO_4)$, A) ควอตซ์ (SiO_2, Q) แคลเซียมออกไซด์ (CaO, L) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$, P) โดยมีพีกกว้างแสดงความเป็นอสัณฐานในช่วงระหว่าง 20° ถึง 35° 2Theta เศษอิฐมอญบดละเอียดประกอบด้วย เฟสผลึกนอนโทรไนต์ (Nontronite) ซึ่งเป็นกลุ่มหนึ่งของแร่ดินเหนียว

สารละลายอัลคาไลใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ดมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ละลายในน้ำกลั่นให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้นข้น 10 โมลาร์ และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 30.24 โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 12.53 และน้ำ (H_2O) ร้อยละ 48.62 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.00 เพื่อให้ประหยัดและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงตามคำแนะนำของ [24]



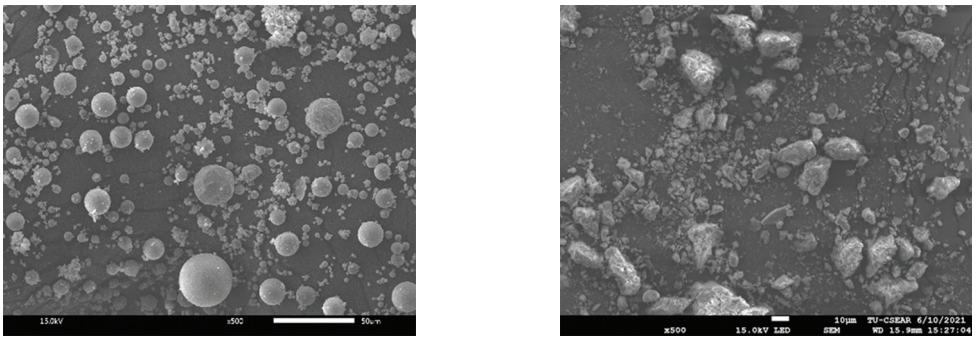
รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐมอญบดละเอียด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐมอญบดละเอียด

คุณสมบัติของวัสดุ	HCF	FCB
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)		
- SiO_2	27.5	67.9
- CaO	25.5	0.6
- Al_2O_3	14.3	15.2
- Fe_2O_3	13.6	5.1
- SO_3	6.33	-

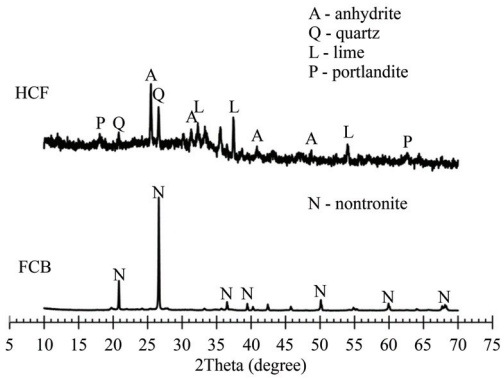
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐมอญบดละเอียด (ต่อ)

คุณสมบัติของวัสดุ	HCF	FCB
- MgO	2.47	1.2
- Na_2O	2.04	0.8
- K_2O	1.85	1.5
- TiO_2	0.33	0.8
- P_2O_5	0.32	-
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.55
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	2,719	4,850
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	20.2	30.6



(ก) เถ้าลอย (ข) เศษอิฐมอญบดละเอียด

รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของวัสดุผง



รูปที่ 3 XRD ของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเศษอิฐมอญบดละเอียด

2. การออกแบบส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางเป็นวัสดุตั้งต้นหลัก เพื่อศึกษาใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดในปริมาณที่มากจึงนำมาแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ออกแบบอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.60 เพื่อให้ง่ายต่อการเทโดยไม่เกิดการแยกตัวของทุกส่วนผสม โดยอัตราส่วนผสมทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 2 ในการผสมใช้วัสดุผงผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดในภาชนะแบบปิดแล้วทำการเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทวัสดุผงที่เตรียมไว้ลงในเครื่องผสมแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสมทำการผสมต่ออีก 5 นาที

ISSN 2672-9369 (Online)

เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้เทลงแบบหล่อทำการปาดผิวหน้าให้เรียบแล้ว ห่อด้วยพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้น ปล่อยให้ตัวอย่างก่อตัวในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าตู้อบควบคุมอุณหภูมิภายในไว้ที่ 60 °C เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องอย่างน้อย 6 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกและบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิระหว่าง 25 - 30 °C จนถึงอายุทดสอบ และเพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดในสภาวะอุณหภูมิห้องของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ นอกจากนี้ได้กำหนดปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยทำการบ่มตัวอย่างหลังจากผสมเสร็จในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบและแสดงสัญลักษณ์ -A ที่ชื่ออัตราส่วนผสม

3. วิธีการทดสอบ

เพื่อศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สดและจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ การพัฒนากำลังอัดและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคเมื่อแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียด ทำการทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ 28 วัน

3.1 ค่าการไหลแผ่ (Flow Test) ทำการทดสอบโดยใช้กรวยขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนเท่ากับ 19 มิลลิเมตร สูง 57 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่างเท่ากับ 38 มิลลิเมตร [25] เติมเพสต์ลงในแบบกรวยจนเต็มจากนั้นปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วยกกรวยขึ้นในแนวดิ่ง ปล่อยให้เพสต์ไหลแผ่บนแผ่นพลาสติกใสในแนวระดับทิ้งไว้จนแห้งและทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง

3.2 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์โดยเข็มไวแคตโดยนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเทลงแบบหล่อรูปกรวย ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-19 [26]

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างเพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20b [27]

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้เศษตัวอย่างที่อายุ 28 วัน แช่ในสารอะซิโตนเพื่อหยุดปฏิกิริยาที่เกิดในจีโอโพลิเมอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [18] แล้วนำมาอบให้แห้งในตู้อบหลังจากนั้นทำการทดสอบ ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (SEM/EDS) การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึก (XRD) และการเปลี่ยนแปลงสถานะของธาตุด้วยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

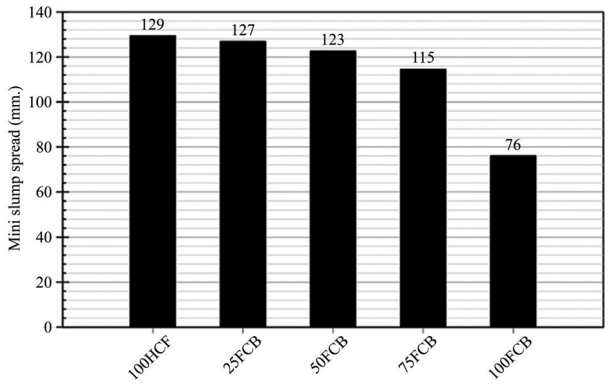
ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมและอัตราส่วนโมลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

อัตราส่วนผสม	HCF (g.)	FCB (g.)	Na_2SiO_3 (g.)	NaOH (g.)	อัตราส่วนโดยโมล Si/Al	Na/Si	Ca/Al	Ca/Si
100HCF	100	-	30	30	4.34	0.34	3.24	0.75
25FCB	75	25	30	30	5.45	0.26	2.41	0.44
50FCB	50	50	30	30	6.53	0.21	1.61	0.25
75FCB	25	75	30	30	7.58	0.18	0.83	0.11
100FCB	-	100	30	30	8.59	0.15	0.07	0.01
100HCF-A	100	-	30	30	4.34	0.34	3.24	0.75
50FCB-A	50	50	30	30	6.53	0.21	1.61	0.25

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ค่าการไหลแผ่

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดในปริมาณแตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าค่าการไหลแผ่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เศษอิฐมอญบดละเอียดเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างควบคุม (100HCF) มีเส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลแผ่เฉลี่ยเท่ากับ 129 มิลลิเมตร การแทนที่เศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 25 50 และ 75 โดยน้ำหนัก ค่าการไหลแผ่ของเพสต์ลดลงร้อยละ 2 5 และ 11 ตามลำดับ ในขณะที่การใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดเป็นวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว (100FCB) พบว่ามีค่าการไหลแผ่ลดลงสูงถึงร้อยละ 41 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมอาจจะมีสาเหตุเนื่องจากลักษณะอนุภาคของเศษอิฐมอญบดละเอียดเป็นเหลี่ยมเป็นมุมดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ทำให้ความลื่นไหลลดลงตรงข้ามกับเถ้าลอยที่มีอนุภาคทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ทำให้ลื่นไหลได้ดี นอกจากนี้อนุภาคของเศษอิฐมอญบดละเอียดที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเถ้าลอยอาจบ่งบอกถึงลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุนสูงคล้ายเถ้าแกลบทำให้มีความต้องการของเหลวไปเคลือบผิวมากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จึงมีความสามารถในการทำงานได้ลดลง [28]

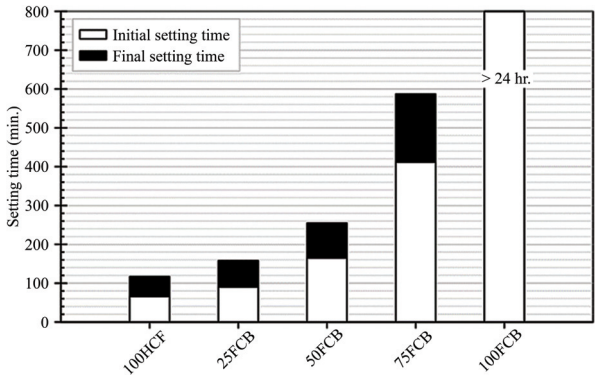


รูปที่ 4 ค่าการไหลแผ่ของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด

2. ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดในปริมาณแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีระยะเวลาการก่อต้นและปลายเท่ากับ 66 และ 117 นาที ในระบบจีโอโพลิเมอร์เมื่อใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ไม่สูงมากนักและใช้ค่าอัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ สูง การชะละลายซิลิกาและอะลูมินาทำได้ยาก [29] จะเกิดอิออนของแคลเซียมมากกว่าอิออนของซิลิกาและอะลูมินา [30] โดยเมื่อทำปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [31] การแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดมีแนวโน้มช่วยเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายของเพสต์ ในตัวอย่าง 25FCB 50FCB และ 75FCB มีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 90 145 และ 412 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 158 225 และ 587 นาที ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของโมลในตารางที่ 2 พบว่าการลดลงของอัตราส่วน Ca/Si และ Ca/Al มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น การลดลงของแหล่งผลิตแคลเซียมทำให้ปริมาณอิออน Ca^{2+} ลดลง การควบแน่นในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับอิออนของซิลิกา (Si^{4+}) และอะลูมินา (Al^{3+}) ที่สามารถทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจึงใช้เวลาในการก่อตัวมากขึ้น [24] ในส่วนของการใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดเป็นวัตถุดิบเพียงชนิดเดียวในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ (ตัวอย่าง 100FCB) มีการก่อตัวช้าในอุณหภูมิห้องทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวมากกว่า 24 ชั่วโมง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ [32]

ISSN 2672-9369 (Online)



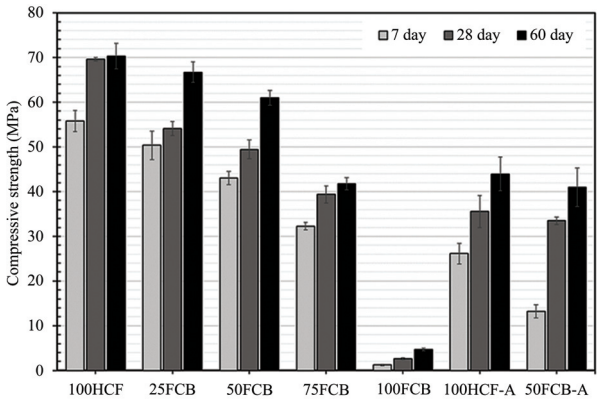
รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด

3. กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ที่อายุการทดสอบ 7 28 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 6 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเศษอิฐมอญบดละเอียดเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่นที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างควบคุมที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 69.6 เมกะปาสคาล เมื่อแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 25 50 และ 75 และทำการบ่มด้วยสภาวะแบบเดียวกันมีค่ากำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 78 71 และ 57 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม การลดลงของกำลังรับแรงอัดอาจจะเกิดจากปริมาณซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะละลายออกมาจากเศษอิฐมอญบดละเอียดทำได้ยากกว่าเถ้าลอยเนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานต่ำสังเกตได้จากรูปที่ 3 ที่ตำแหน่งพีกกว้างในช่วงระหว่าง 20 º ถึง 27 º 2Theta เถ้าลอยซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีความเป็นอสัณฐานสูงกว่าสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จึงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงตามไปด้วย นอกจากนี้การลดลงของปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมอาจจะเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เมทริกซ์ของจีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงเนื่องจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จากวัตถุดิบที่มีแคลเซียมสูงจะทำให้เกิด C-S-H และ C-(A)-S-H ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจลและมีส่วนช่วยพัฒนาความแข็งของจีโอโพลิเมอร์ [4], [33] เมื่อแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดทำให้อัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al เพิ่มขึ้นในขณะที่ Ca/Si ลดลง ดังตารางที่ 2 การเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิเกตในส่วนผสมอาจจะทำให้เกิดอัตราส่วน Si/Al และ Na/Si ที่ไม่สมดุลส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยา [34] นอกจากนี้การตกตะกอนของเจล C-(A)-S-H และโซเดียมอะลูมิเนตซิลิเกต (N-A-S-H) อาจจะลดลงเนื่องจากการลดลงของ Ca และ Al อย่างไรก็ตามในช่วงอายุปลายตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดดีขึ้นอย่างชัดเจน จากการศึกษาของ [35] พบว่าองค์ประกอบของเศษอิฐมอญที่มีความเป็นผลึกสูงบางส่วนสามารถถูกชะละลายออกมาและทำปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ได้ และจากงานวิจัยของ [36] กล่าวว่าการสลายตัวของซิลิกาและอะลูมินายังคงเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและทำให้เกิดเจลโพลีเมอร์มากขึ้นซึ่งช่วยให้การพัฒนาความแข็งแรงของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นในช่วงอายุปลายซิลิกาและอะลูมินาที่มีปริมาณมากในเศษอิฐมอญบดละเอียดอาจจะถูกชะละลายออกมามากขึ้นแล้วเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตและเพิ่มความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้

สำหรับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มในอุณหภูมิห้องทั่วไปพบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวอย่างที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] ยกตัวอย่างที่อายุ 7 วัน กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง 100HCF และ 50FCB มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 55.8 และ 43.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง 100HCF-A และ 50FCB-A มีค่ากำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 47 และ 31 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 ºC โดยทั่วไปแล้วการบ่มด้วยความร้อนจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ให้เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

สอดคล้องกับงานวิจัยของ [37] เนื่องจากเฟสอสัณฐานเป็นเหตุผลประการเดียวที่ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยที่เฟสผลึกไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [38] แต่อย่างไรก็ตามที่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มในอุณหภูมิห้องทั่วไปสามารถพัฒนากำลังได้สูงขึ้น ซึ่งหลังจากอายุ 28 วัน ตัวอย่าง 100HCF-A และ 50FCB-A มีค่ากำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 63 และ 68 เมื่อเทียบกับอัตราส่วนเดียวกันที่บ่มด้วยความร้อน

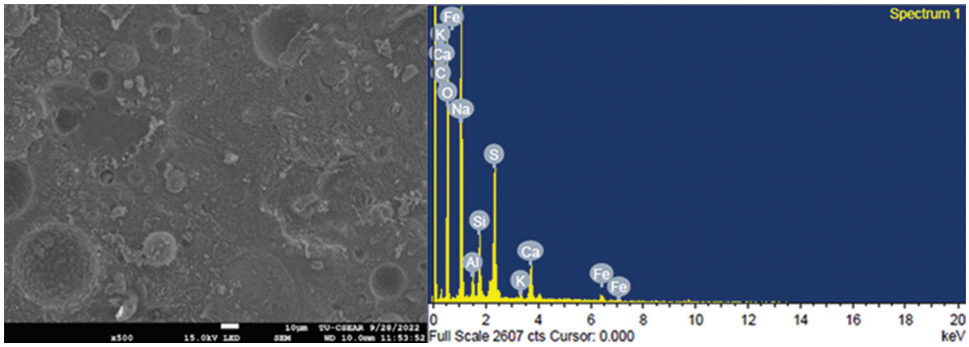


รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด

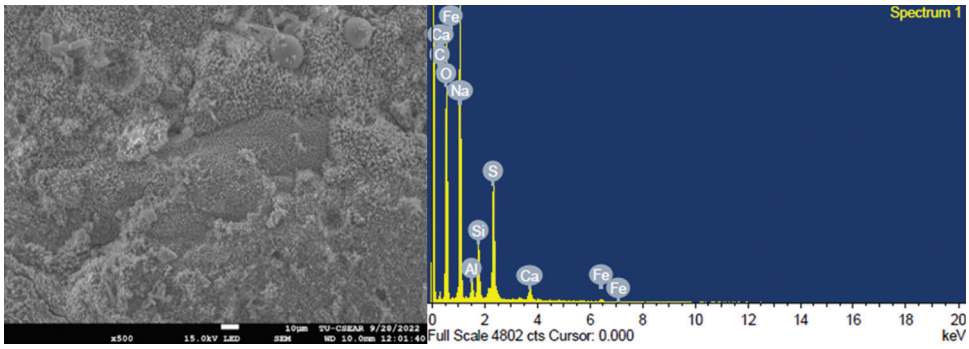
4. การวิเคราะห์ด้วย SEM-EDS

ในการวิเคราะห์ SEM-EDS ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดจะนำชิ้นส่วนที่แตกจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A ตามลำดับ จากรูปที่ 7(ก) สังเกตได้ว่าตัวอย่าง 100HCF มีความแน่นเป็นเนื้อเดียวกันและมีอนุภาคของเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือที่ถูกชะละลายเพียงบางส่วนเหลือน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่ค่อนข้างสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุพบว่ามีอะตอมของออกซิเจน (O) ซิลิกา (Si) โซเดียม (Na) อะลูมินา (Al) และแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบหลักบ่งชี้ถึงการเกิดเจล N-A-S-H อยู่ร่วมกับ C-(A)-S-H [34] เมื่อแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 ตัวอย่างที่บ่มด้วยความร้อนจะเกิดผลึกและปรากฏอนุภาคของวัตถุดิบที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 7(ข) แต่อย่างไรก็ตามเนื้อมีความหนาแน่น ปริมาณรูพรุนและรอยแตกขนาดเล็กปรากฏเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่บ่มในอุณหภูมิห้องพบว่า เนื้อส่วนมากผิวไม่เรียบ มีความพรุนสูง โครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ในจีโอโพลิเมอร์เจลมากกว่าตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่บ่มด้วยความร้อนดังแสดงในรูปที่ 7(ค) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุพบว่าตัวอย่าง 50FCB และ 50FCB-A มีองค์ประกอบของธาตุเช่นเดียวกับตัวอย่าง 100HCF แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เจล N-A-S-H และ C-(A)-S-H เป็นสารประกอบที่ให้สมบัติทางด้านกำลังแก่จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด แต่เนื่องจากความเป็นผลึกสูงของอิฐมอญอาจจะทำให้เศษอิฐมอญบดละเอียดเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อย จึงทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก [39] จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลเนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กเหล่านี้ทำให้กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่ำกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วนน้อยกว่า [40]

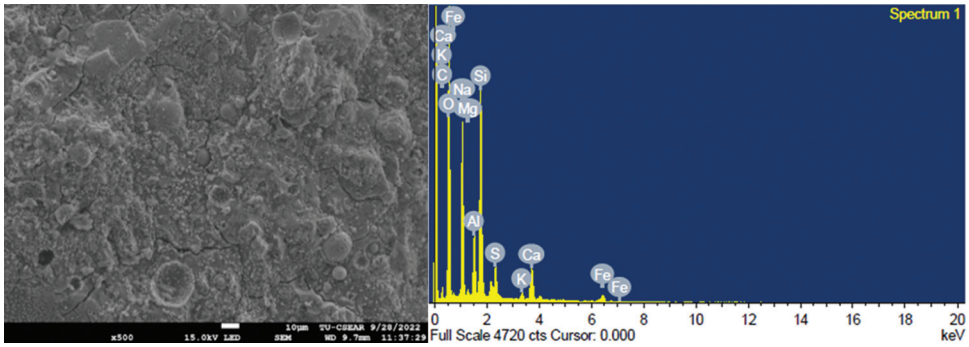
ISSN 2672-9369 (Online)



(ก) 100HCF



(ข) 50FCB



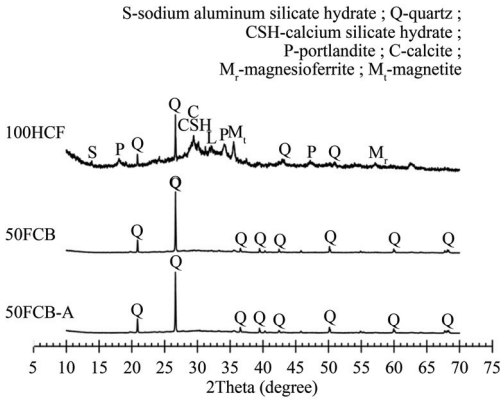
(ค) 50FCB-A

รูปที่ 7 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงและองค์ประกอบของธาตุของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

5. **สัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์**

รูปที่ 8 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A ที่อายุ 28 วัน เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง และจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดในสภาวะการบ่มที่แตกต่างกันพบว่าในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกปรากฏพีกฐานกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐานที่ตำแหน่ง 23 º - 37 º 2Theta ตัวอย่าง 100HCF ตรวจพบเฟสผลึกของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต ($Na_{60}(H_3O)_{32}(Si_{100}A_{l92}O_{384})(H_2O)_{24}$) ควอตซ์ ($SiO_2$) แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ ($Fe_2MgO_4$) แมกนีไทต์ ($Fe_3O_4$) พอร์ตแลนไดต์ ($Ca(OH)_2$) แคลไซต์ ($Ca(CO_3)$) และลาร์ไนต์ ($Ca_2SiO_4$) นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่คล้ายกับสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับที่ตำแหน่ง 29.5 และ 30.1 2Theta [41] - [42] การตรวจพบสารประกอบสนับสนุนผลการทดสอบระยะเวลาการก่อต้นและปลายที่สั้นในตัวอย่าง 100HCF ในส่วนของตัวอย่างที่ใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนร้อยละ 50 ทั้งตัวอย่างที่บ่มร้อนและบ่ม

ในอุณหภูมิห้อง (50FCB และ 50FCB-A) ตรวจพบเฟสผลึกของควอตซ์เป็นส่วนใหญ่สอดคล้องกับงานวิจัยของ [35] แต่ไม่พบเฟสผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอาจจะมีสาเหตุเนื่องจากเมื่อปริมาณ Ca ในส่วนผสมต่ำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของวัตถุดิบร่วมและสารละลายอัลคาไลจะเป็นสารประกอบแบบไฮบริดเจล ได้แก่ C-(N)-A-S-H และ N-(C)-A-S-H [43] ด้วยเหตุนี้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดจึงมีการก่อตัวที่ช้ากว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพียงชนิดเดียว อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนร้อยละ 50 จะทำให้เกิดผลึกของควอตซ์สูง แต่การกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนเป็นผลให้กำลังอัดของตัวอย่าง 50FCB มีค่ามากกว่า 50FCB-A เนื่องจากการบ่มร้อนทำให้จีโอโพลิเมอร์เจลมีหนาแน่น มีจำนวนอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาน้อยและมีรูพรุนน้อยกว่า ดังแสดงในการวิเคราะห์ด้วย SEM

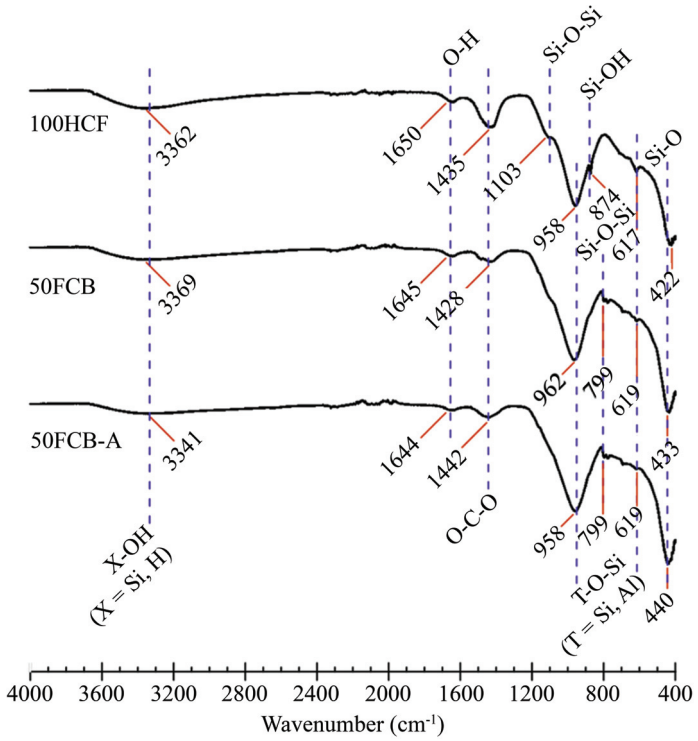


รูปที่ 8 รูปแบบ XRD ของตัวอย่างเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดที่อายุ 28 วัน

6. การวิเคราะห์ด้วย FTIR

สเปกตรัมอินฟราเรดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง และจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดแสดงในรูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ตรวจพบการสั่นของโมเลกุลที่แตกต่างกันแสดงถึงเอกลักษณ์ของตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A โดยที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 3369 - 3341 และ 1650 - 1644 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ X-OH Stretching เมื่อ X คือ Si หรือ H และ H-O-H Bending ตามลำดับ ซึ่งการสั่นที่ตำแหน่งนี้เกิดจากโมเลกุลของน้ำ [44] - [45] และที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 1442 - 1428 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบ O-C-O Stretching ของการดัดงอนอกระนาบของ CO_3 และการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ [44], [46] ซึ่งในหมู่ฟังก์ชันทั้งสองตรวจพบในทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ การสั่นสะเทือนแบบอสมมาตร Si-O-Si ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1100 cm^{-1} [47] เนื่องจากควอตซ์ตรวจพบเฉพาะในตัวอย่าง 100HCF เมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษอิฐมอญบดละเอียดอาจจะทำให้เกิดผลึกของ SiO_2 เพิ่มมากขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง 50FCB และ 50FCB-A จึงทำให้เกิดการสั่นแบบอสมมาตร Si-O-Si ที่ตำแหน่ง 799 cm^{-1} [48] - [49] ที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 962 - 958 cm^{-1} และเป็นการสั่นแบบอสมมาตรของการยืดตัวของพันธะ T-O-Si อาทิเช่น Si-O-Si และ Si-O-Al และการสั่นแบบยืดของ Si-O ของพันธะสี่หน้าของซิลิเกต [34] ที่ตำแหน่งนี้แสดงถึงการก่อตัวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [44] ในตัวอย่าง 100HCF 50FCB และ 50FCB-A และที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้กับ 440 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดสมมาตรของ Si-O ในจีโอโพลีเมอร์เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้การสังเคราะห์ [50]

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 9 สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดที่อายุ 28 วัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าการใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างควบคุมเกิดสารผลิตภัณฑ์ C-S-H และ C-A-S-H ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจลทำให้มีความแข็งแรงสูงมีความแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน การใช้เศษอิฐมอญบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงจะทำให้เกิดผลึกของอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นลดลง นอกจากนี้วิธีการบ่มยังส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเศษอิฐมอญบดละเอียด การบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิห้องทั่วไปจะทำให้พัฒนากำลังได้ช้าทำให้ความแน่นตัวลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุเท่ากับตัวอย่างที่บ่มร้อน แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ใช้อิฐมอญแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังดีขึ้นในช่วงอายุปลาย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเศษอิฐมอญบดละเอียดเป็นวัสดุประสานอีกหนึ่งชนิดสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างที่มีระยะเวลาก่อไม่เร็วมากและมีกำลังอัดสูง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้เขียนขอขอบคุณการสนับสนุนทุนการศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น

References

[1] Toniolo, N., Rincón, A., Roether, J. A., Ercole, P., Bernardo, E., and Boccaccini, A. R. (2018). Extensive Reuse of Soda-Lime Waste Glass in Gly Ash-Based Geopolymers. **Construction and Building Materials**. Vol. 188, pp. 1077-1084. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.096

[2] Davidovits, J. (1991). Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**. Vol. 37, No. 8, pp. 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193

[3] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, A., Palomo, G. C., and Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of the Art. **Journal of Materials Science**. Vol. 42, No. 9, pp. 2917-2933. DOI:10.1007/s10853-006-0637-z

[4] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive. **Materials and Design**. Vol. 53, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.018

[5] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., and Cao, T. (2011). High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 23, Issue 3, pp. 264-270. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000161

[6] Sata, V., Sathonsaowaphak, A., and Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar to Sulfate and Sulfuric Acid Attack. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 34, Issue 5, pp. 700-708. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010

[7] Saha, S. and Rajasekaran, C. (2017). Enhancement of the Properties of Fly Ash Based Geopolymer Paste by Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag. **Construction and Building Materials**. Vol. 146, pp. 615-620. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139

[8] Topark-Ngarm, P., Chindaprasirt, P., and Sata, V. (2015). Setting Time, Strength, and Bond of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 27, Issue 7, p. 04014198

[9] Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., and Pimraksa K. (2009). Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 168, Issue 1, pp. 44-50. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.120

[10] Wongsa, A., Boonserm, K., Waisurasingha, C., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2017). Use of Municipal Solid Waste Incinerator (MSWI) Bottom Ash in High Calcium Fly Ash Geopolymer Matrix. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 148, pp. 49-59. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.147

[11] Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., and Ling, Y. (2020). Fabrication and Engineering Properties of Concretes Based on Geopolymers/alkali-activated Binders - A Review. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 258, p. 120896. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120896

[12] Wongsa, A., Zaetang, Y., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2016). Properties of Lightweight Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Bottom Ash as Aggregates. **Construction and Building Materials**. Vol. 111, pp. 637-643. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.135

ISSN 2672-9369 (Online)

[13] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. (2009). Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers. **Waste Management**. Vol. 29, Issue 2, pp. 539-543. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.023

[14] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems. **Journal of Materials Science**. Vol. 47, pp. 4876-4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y

[15] Pangdaeng, S., Ngamtavee, S., Tho-In, T., Hanjitsuwan, S., and Phoo-ngernkham, T. (2022). Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Incorporating Clay Residue and Silica Fume. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 2, pp. 1-10 (in Thai)

[16] Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., and Sahmaran, M. (2021). Development of Normal and Very High Strength Geopolymer Binders Based on Concrete Waste at Ambient Environment. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 279, p. 123436. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123436

[17] Nuaklong, P., Wongsa, A., Sata, V., Boonserm, K., Sanjayan, J., and Chindaprasirt, P. (2019). Properties of High-Calcium and Low-Calcium Fly Ash Combination Geopolymer Mortar Containing Recycled Aggregate. **Heliyon**. Vol. 5, Issue 9, p. e02513. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02513

[18] Song, W., Zhu, Z., Peng, Y., Wan, Y., Xu, X., Pu, S., Song, S., and Wei, Y. (2019). Effect of Steel Slag on Fresh, Hardened and Microstructural Properties of High-Calcium Fly Ash Based Geopolymers at Standard Curing Condition. **Construction and Building Materials**. Vol. 229, p. 116933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116933

[19] Li, S., Li, Q., Zhao, X., Luo, J., Gao, S., Yue, G., and Su, D. (2019). Experimental Study on the Preparation of Recycled Admixtures by Using Construction and Demolition Waste. **Materials (Basel)**. Vol. 12, Issue 10, pp. 1-16. DOI: 10.3390/ma12101678

[20] Tang, Q., Ma, Z., Wu, H., and Wang, W. (2020). The Utilization of Eco-Friendly Recycled Powder from Concrete and Brick Waste in New Concrete: A Critical Review. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 114, p. 103807. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103807

[21] American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve. ASTM C430-17. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1

[22] American Society for Testing and Materials. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. **ASTM C618-19. Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 2

[23] Hwang, C. L., Damtie Yehualaw, M., Vo, D. H., and Huynh, T. P. (2019). Development of High-Strength Alkali-Activated Pastes Containing High Volumes of Waste Brick and Ceramic Powders. **Construction and Building Materials**. Vol. 218, pp. 519-529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.143

[24] Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. **Minerals Engineering**. Vol. 22, Issue 12, pp. 1073-1078. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.03.022

[25] Collins, F., Lambert, J., and Duan, W. H. (2012). The Influences of Admixtures on the Dispersion, Workability, and Strength of Carbon Nanotube-OPC Paste Mixtures. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 34, Issue 2, pp. 201-207. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.013

[26] American Society for Testing and Materials. (2019). Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. ASTM C191-19. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1

[27] American Society for Testing and Materials. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). ASTM C109/C109M-20b. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1

[28] Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., and Sata V. (2020). Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Fire Resistance of Recycled Aggregate High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 252, p. 119797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119797

[29] Tho-In, T., Latulee, C., Phoo-ngernkham, T., Amornpinyo, P., Phonkasi, S., and Yodsiri, P. (2021). Influence of Ordinary Portland Cement and Different Alkali Solution Ratio in Geoplolymer Mortar on Time of Setting and Compressive Strength for Use as a Repaired Materails. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 14, No. 3, pp. 20-31 (in Thai)

[30] Phair, J. W. and Van Deventer, J. S. J. (2001). Effect of Silicate Activator pH on the Leaching and Material Characteristics of Waste-Based Inorganic Polymers. **Minerals Engineering**. Vol. 14, Issue 3, pp. 289-304. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00002-4

[31] Rattanasak, U., Pankhet, K., and Chindaprasirt, P. (2011). Effect of Chemical Admixtures on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**. Vol. 18, No. 3, pp. 364-369. DOI: 10.1007/s12613-011-0448-3

[32] Nath, P. and Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on Setting, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. **Construction and Building Materials**. Vol. 66, pp. 163-171. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080

[33] Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. **Fuel**. Vol. 90, Issue 6, pp. 2118-2124. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.01.018

[34] Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., and Sahmaran, M. (2021). Synthesis and Optimization of Binary Systems of Brick and Concrete Wastes Geopolymers at Ambient Environment. **Construction and Building Materials**. Vol. 276, p. 122217

[35] Tuyan, M., Andiç-Çakir, Ö., and Ramyar, K. (2018). Effect of Alkali Activator Concentration and Curing Condition on Strength and Microstructure of Waste Clay Brick Powder-based Geopolymer. **Composites Part B: Engineering**. Vol. 135, pp. 242-252. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.10.013

[36] Gunasekara, C., Law, D. W., and Setunge S. (2016). Long Term Engineering Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete. In **Proceedings of the Sustainable Construction Materials and Technologies**. Las Vegas: USA

[37] Chen, W. and Zhu, Z. (2018). Utilization of Fly Ash to Enhance Ground Waste Concrete-Based Geopolymer. **Advances in Materials Science and Engineering**. Vol. 2018, DOI: 10.1155/2018/4793917

ISSN 2672-9369 (Online)

[38] Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., and Lukey, G. C. (2002). The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash - and Kaolinite-Based Geopolymers. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 89, pp. 63-73. DOI: 10.1016/S1385-8947 (02)00025-6

[39] Nuaklong, P., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2016). Influence of Recycled Aggregate on Fly Ash Geopolymer Concrete Properties. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 112, Part 4, pp. 2300-2307. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.109

[40] Zhang, J., Li, S., Li, Z., Liu, C., and Gao, Y. (2020). Feasibility Study of Red Mud for Geopolymer Preparation: Effect of Particle Size Fraction. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. Vol. 22, No. 5, pp. 1328-1338. DOI: 10.1007/s10163-020-01023-4

[41] Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2016). Improvement of Durability of Cement Pipe with High Calcium Fly Ash Geopolymer Covering. **Construction and Building Materials**. Vol. 112, pp. 956-961. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.023

[42] Dong. M., Feng, W., Elchalakani, M., (Kevin) Li, G., Karrech, A., and May, E. F. (2017). Development of a High Strength Geopolymer by Novel Solar Curing. **Ceramics International**. Vol. 43, Issue 14, pp. 11233-11243. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.05.173

[43] Djobo, J. N. Y., Tchakouté, H. K., Ranjbar, N., Elimbi, A., Tchadjié, L. N., and Njopwouo, D. (2016). Gel Composition and Strength Properties of Alkali-Activated Oyster Shell-Volcanic Ash: Effect of Synthesis Conditions. **Journal of the American Ceramic Society**. Vol. 99, Issue 9, pp. 3159-3166. DOI: 10.1111/jace.14332

[44] Lee, W. K. W. and Van Deventer, J. S. J. (2002). The Effects of Inorganic Salt Contamination on the Strength and Durability of Geopolymers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol. 211, No. 2-3, pp. 115-126. DOI: 10.1016/S0927-7757(02) 00239-X

[45] Nana, A., Epey, N., Rodrique, K. C., Deutou, J. G. N., Djobo, J. N. Y., Tomé, S., Alomayri, T. S., Ngouné, J., Kamseu, E., and Leonellif, C. (2021). Mechanical Strength and Microstructure of Metakaolin/Volcanic Ash-Based Geopolymer Composites Reinforced with Reactive Silica from Rice Husk Ash (RHA). **Materialia**. Vol. 16, p. 101083. DOI: 10.1016/j.mtla.2021.101083

[46] Lecomte, I., Henrist, C., Liégeois, M., Maseri, F., Rulmont, A., and Cloots, R. (2006). (Micro)-Structural Comparison Between Geopolymers, Alkali-Activated Slag Cement and Portland Cement. **Journal of the European Ceramic Society**. Vol. 26, Issue 16, pp. 3789-3797. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.12.021

[47] Uchino, T., Sakka, T., Hotta, K., and Iwasaki, M. (1989). Attenuated Toatal Reflectance Fourier-Transform Infrared Spectra of a Hydrated Sodium Soilicate Glass. **Journal of the American Ceramic Society**. Vol. 72, Issue 11, pp. 2173-2175. DOI: 10.1111/j.1151-2916. 1989.tb06051.x

[48] Ben Messaoud, I., Hamdi, N., and Srasra, E. (2018). Physicochemical Characterization of Geopolymer Binders and Foams Made from Tunisian Clay. **Advances in Materials Science and Engineering**. Vol. 2018, DOI: 10.1155/2018/9392743

[49] Mezni, M., Hamzaoui, A., Hamdi, N., and Srasra, E. (2011). Synthesis of Zeolites from the Low-Grade Tunisian Natural Illite by Two Different Methods. **Applied Clay Science**. Vol. 52, Issue 3, pp. 209-218. DOI: 10.1016/j.clay.2011.02.017

[50] Jaramillo Nieves, L. J., Elyseu, F., Goulart, S., Pereira, M. D. S., Valvassori, E. Z., and Bernardin, A. M. (2021). Use of Fly and Bottom Ashes from a Thermoelectrical Plant in the Synthesis of Geopolymers: Evaluation of Reaction Efficiency. **Energy Geoscience**. Vol. 2, Issue 2, pp. 167-173. DOI: 10.1016/j.engeos.2020.09.004

ISSN 2672-9369 (Online)

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำผักสดตัดแต่งชนิดผักใบด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

The Optimization of Parameters for Vegetable Spin Drying Using Design of Experiment

เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด[1] และเดือนแรม แพ่งเกี่ยว[1*]

Accarat Chaoumead[1] and Duanraem Phaengkieo[1*]

Received: *July 3, 2022;* ***Revised:*** *December 9, 2022;* ***Accepted:*** *December 9, 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดของการสลัดน้ำออกจากผักและเพิ่มอายุการเก็บรักษา ทำการทดสอบตัวอย่างผักใบ 3 ชนิด ได้แก่ ผักกาดหอม กรีนคอส และกรีนโอ๊ค ทดสอบตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรทดสอบ 3 ระดับ ได้แก่ น้ำหนัก ทดสอบน้ำหนักที่ 1 2 และ 3 กิโลกรัม ความเร็วรอบ 85 130 และ 180 รอบต่อนาที และระยะเวลา 5 10 และ 15 นาที โดยเอาต์พุต คือ ปริมาณน้ำที่สลัดออกจากผักและอายุการเก็บรักษา ซึ่งจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 64 การทดลอง แบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สลัดออกจากผักกับน้ำหนักเริ่มต้น ผลการทดลองพบว่า ผักกาดหอม น้ำหนัก 3 กิโลกรัม สลัดด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ระยะเวลา 15 นาที สามารถสลัดน้ำออกจากผักได้มากสุด 98 % กรีนคอสน้ำหนัก 1 กิโลกรัม สลัดด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที สามารถสลัดน้ำออกจากผักได้มากสุด 96.50 % และกรีนโอ๊คน้ำหนัก 1 กิโลกรัม สลัดด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ระยะเวลา 15 นาที สามารถสลัดน้ำออกจากผักได้มากสุด 96.50 % ส่วนที่ 2 เปรียบเทียบอายุการเก็บรักษาของผักหลังการสลัด โดยบรรจุในถุงพลาสติกเจาะรูและเก็บรักษาในตู้เย็นอุณหภูมิ 8 - 12 ^{o}C ผลการทดลองพบว่า ผักกาดหอมมีอายุการเก็บรักษา 15 วัน กรีนคอสมีอายุการเก็บรักษา 12 วัน และกรีนโอ๊คมีอายุการเก็บรักษา 13 วัน โดยมีอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นคิดเป็น 80 66.67 และ 20.08 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผักที่ไม่ผ่านการล้างและสลัดน้ำ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสลัดน้ำออกจากผักแต่ละชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : เครื่องสลัดน้ำ; ผักสดตัดแต่ง; ผักใบ; วิธีการออกแบบการทดลอง

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก*

[1] *Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok*

[*] *Corresponding Author, Tel. 09 5642 2229, E - mail: duanraem@rmutl.ac.th*

Abstract

This study proposes using a factorial experimental design method to determine optimal parameters for controlling water removal from fresh-cut vegetables. The objective was to achieve maximum efficiency of water removal and increase the shelf life. The tests were conducted on samples of three leafy vegetables, including lettuce, green cos and green oak, with the samples weighing 1, 2, and 3 kilogram; the speeds of water removal were 85, 130, and 180 rpm; and time was 5, 10, and 15 minutes. The output parameters were the amount of vegetable water removed and the shelf life which made for 64 tests in total. The amount of water removed from vegetables was compared with the initial weight. The results showed that removal of water from lettuce weighing 3 kilograms, at 180 rpm, for 15 minutes was up to 98 %; 96.50 % for 1 kilogram of green cos at 180 rpm for 10 minutes can remove water from vegetables up to and 96.50 % for 1 kilogram of green oak at 180 rpm for 15 minutes. The shelf life of vegetables after drying was compared when stored in the fridge in a perforated plastic bag at 8 - 10 °C. The results showed that lettuce had a 15-day shelf life, green cos had a 12-day shelf life, and green oak had a 13-day shelf life. The shelf life was increased by 80, 66.67 and 20.08 %, respectively, compared with the conventional method. Therefore, it can be concluded that the proposed method was able to obtain optimal parameters for effective spin-drying of each type of vegetable.

Keywords: Spin Drying Machine; Fresh-Cut Vegetables; Leafy Vegetables; Design of Experiment (DOE)

บทนำ

ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตสินค้าเกษตรเพื่อบริโภคในประเทศเป็นหลัก โดยผักสดเป็นอาหารที่มีความสำคัญทั้งทางเศรษฐกิจและต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยในปี พ.ศ. 2563 มีการบริโภคสินค้าเกษตรและอาหารมากกว่าร้อยละ 30 ของทั้งหมด และมีการส่งออกผักและผลไม้สดเป็นมูลค่า 80,858 ล้านบาท โดยเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2562 คิดเป็น 9.52 % [1] จากการตรวจสารพิษตกค้างในผักและผลไม้สดที่บริโภคในประเทศพบว่าเกินมาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบปัญหาการส่งออกผักผลไม้ไปจำหน่ายในกลุ่มสหภาพยุโรป (European Union: EU) เนื่องจากพบการปนเปื้อนสารตกค้างและจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่อง และกลุ่มสหภาพยุโรปได้เพิ่มความเข้มงวดในกฎระเบียบที่เรียกว่า EC Regulation 66/2009 โดยเพิ่มระดับการสุ่มตรวจสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตสำหรับสินค้าผักในกลุ่ม มะเขือ กะหล่ำ และถั่วฝักยาวเป็นระดับ 50 % โดยพบปัญหาการปนเปื้อนตั้งแต่ผู้รวบรวมสินค้าผักและโรงคัดบรรจุที่มีการล้าง คัด ตัดแต่งก่อนบรรจุลงส่งต่อไปยังแหล่งจำหน่าย การใช้น้ำในการล้างและกำจัดสิ่งสกปรกที่ผิวผักจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษา เพราะสามารถช่วยลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ผิว การเติมสารฆ่าเชื้อลงในน้ำล้าง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ที่ผิวเพิ่มขึ้น 100 เท่า เมื่อล้างผักสะอาดเรียบร้อยแล้วต้องทำการสลัดน้ำออกจากผักจนผักแห้ง ลักษณะของผักบางชนิดนั้นมีซอก มีความหยิกงอ ดังนั้น เกษตรกรต้องสลัดน้ำออกจากผักด้วยมือซึ่งใช้เวลานานทำให้คุณค่าทางอาหารลดลงตามอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมและไม่สามารถควบคุมคุณภาพได้จึงทำให้เกิดความช้ำและน้ำที่คงเหลือที่ผัก ซึ่งอาจทำให้ผักเน่าเสียเมื่ออยู่ในบรรจุภัณฑ์ขณะทำการขนส่งได้ [2] – [3] จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องสลัดน้ำในหลากหลายผลิตผล (การประยุกต์ใช้งาน) อาทิ ดอกดาวเรือง เห็ด ผักใบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์และเงื่อนไขสำหรับการควบคุมการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น ลดระยะเวลาการสลัดน้ำ เพิ่มประสิทธิภาพการสลัดน้ำ ลดค่าใช้จ่าย เพิ่มกำลังการผลิต [3] – [7] โดยงานวิจัยดังกล่าวใช้รูปแบบการทำงานของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ด้วยระบบมอเตอร์หมุนถังควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติหรือควบคุมด้วยผู้ใช้งาน ซึ่งเมื่อพิจารณาปัจจัยที่สำคัญสำหรับการสลัดน้ำ

ISSN 2672-9369 (Online)

ได้แก่ ความเร็วรอบของมอเตอร์ ระยะเวลาการทำงานและปริมาณของผลิตผล จากการตั้งค่าเริ่มต้นการทำงานและหยุดการทำงานตามผู้ใช้งานกำหนดอาจยังไม่สามารถควบคุมคุณภาพของการสลัดน้ำออกจากผักที่มีความหลากหลายของลักษณะใบหรือปริมาณน้ำหนักที่ไม่แน่นอนได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาค่าความเหมาะสมของแต่ละตัวแปรเพื่อศึกษาความเป็นไปได้และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและเอาต์พุตทั้งหมด ซึ่งที่ผ่านมาวิธีการออกแบบการทดลองนิยมนำมาประยุกต์ในงานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลายในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการออกแบบ อาทิ การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าความเหมาะสมในการคั่วเมล็ดกาแฟ การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับการควบคุมที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแกนยึดหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเอาต์พุตที่สนใจ [8] - [12] เนื่องจากวิธีการออกแบบการทดลองสามารถใช้สำหรับสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติอย่างเหมาะสมได้ [13] - [14]

จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาต้นแบบเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบและการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการสลัดน้ำด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ซึ่งสามารถทำงานแบบอัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดของการสลัดน้ำออกจากผักและเพิ่มอายุการเก็บรักษาเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการสลัดแบบเดิม

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำผักสดตัดแต่งชนิดผักใบด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อใช้สำหรับการควบคุมการทำงานของต้นแบบเครื่องสลัดน้ำออกจากผัก ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

1. **ต้นแบบเครื่องสลัดน้ำออกจากผัก**

ต้นแบบเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสำหรับงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบ 7 ส่วน ได้แก่ ถังภายนอก ถังภายใน ปุ่ม on/off สั่งการทำงาน มอเตอร์ ท่อน้ำทิ้ง ล้อเลื่อนและฝาปิด/เปิด แสดงรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะดังตารางที่ 1 และการออกแบบโครงสร้างและต้นแบบเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องสลัดน้ำออกจากผัก

Parameters	Specification
Size of Structure (Outside)	90 x 90 x 100 cm.
Radian of Structure (Inside)	78 cm.
High of Structure (Inside)	70 cm.
Volume	10 kg.
AC Motor	220 V, 1/2 hp, 5o Hz. , Speed 1500 rpm.
Operation Control	Automatic

2. **หลักการทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ**

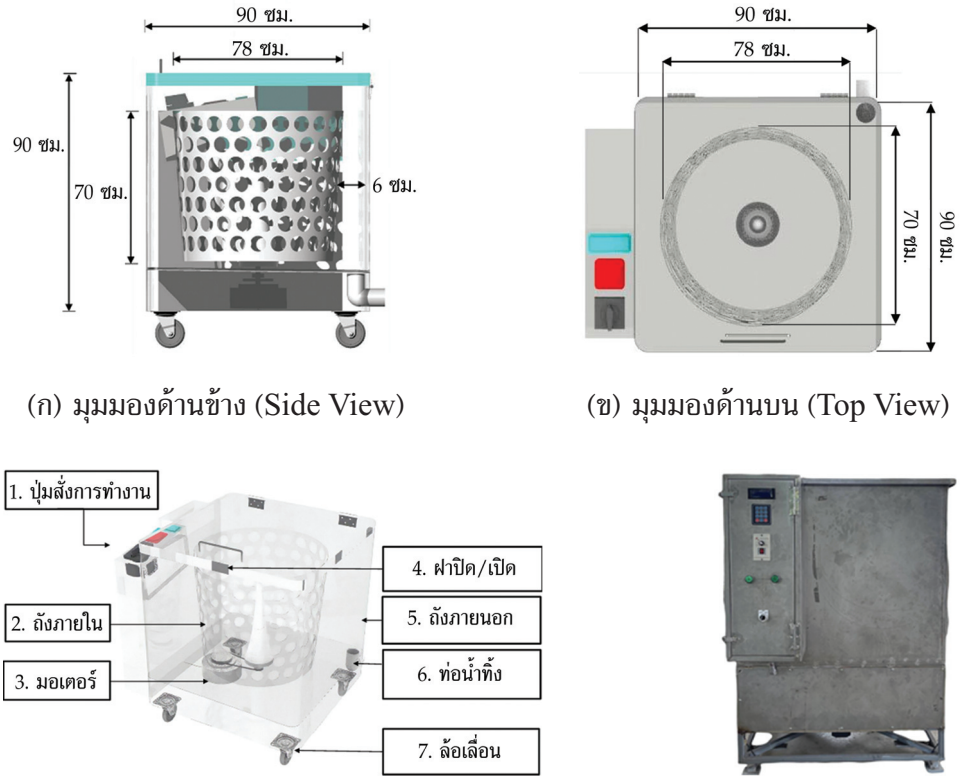
การทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ส่วนของระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ และส่วนที่ 2 ส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งแสดงรายละเอียดดังนี้

2.1 **ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ**

ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบสามารถกำหนดความเร็วรอบได้ 0 - 180 รอบต่อนาที น้ำหนักสูงสุดที่สามารถสลัดได้ไม่เกิน 10 กิโลกรัม และสามารถกำหนดเวลา

ได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ แสดงผังงานของระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบดังรูปที่ 2 และมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ใส่ผักตามที่ผู้ใช้งานต้องการ
ขั้นตอนที่ 2 เปิดสวิตซ์
ขั้นตอนที่ 3 ปรับความเร็วรอบตามที่ผู้ใช้งานต้องการ
ขั้นตอนที่ 4 ระบบทำงาน
ขั้นตอนที่ 5 หยุดการทำงานตามเวลาที่ผู้ใช้งานกำหนด ปรับความเร็วรอบของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักไปที่ตำแหน่งเริ่มต้น
ขั้นตอนที่ 6 ปิดสวิตซ์



(ก) มุมมองด้านข้าง (Side View) (ข) มุมมองด้านบน (Top View)

(ค) มุมมองไอโซเมตริก (Isometric View) (ง) ลักษณะต้นแบบเครื่องเครื่องสลัด

รูปที่ 1 ต้นแบบเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ

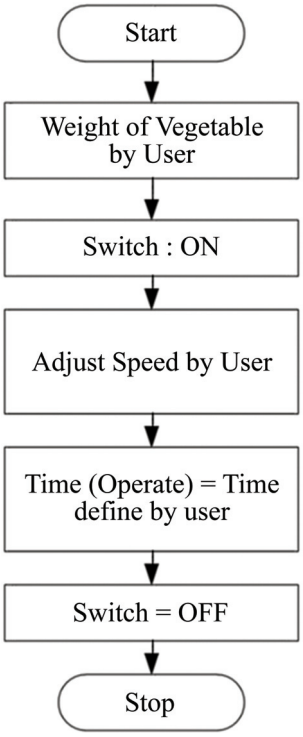
2.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ

โปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลตามเงื่อนไขที่กำหนด (เปอร์เซนต์การสลัดน้ำไม่น้อยกว่า 95 %) ซึ่งรับอินพุต คือ ค่าจากคีย์แพดและค่าน้ำหนักจากเซนเซอร์ชั่งน้ำหนัก และสั่งงานเอาต์พุต คือ มอเตอร์และจอแสดงผล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

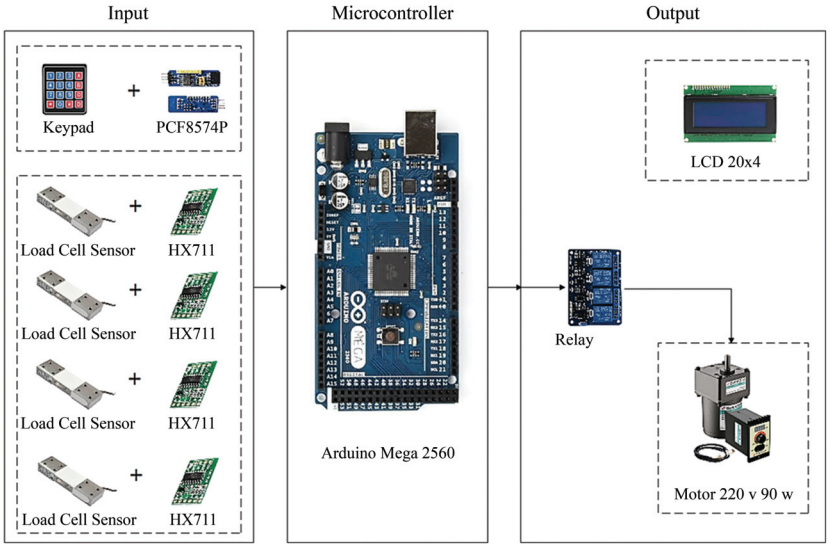
ขั้นตอนที่ 1 เลือกฟังก์ชันการทำงานจากคีย์แพด ซึ่งสามารถเลือกชนิดผักได้ 2 ชนิด ได้แก่ A คือ ผักใบหยัก และ B คือ ผักก้านตรง
ขั้นตอนที่ 2 รับค่าน้ำหนักปัจจุบันจากเซนเซอร์ชั่งน้ำหนัก
ขั้นตอนที่ 3 โปรแกรมทำงานตามเงื่อนไขของสมการควบคุม
ขั้นตอนที่ 4 ระบบหยุดทำงานเมื่อน้ำหนักลดลงตามสมการ

แสดงไดอะแกรมของระบบและขั้นตอนการทำงานของของโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบดังรูปที่ 3 และ 4

ISSN 2672-9369 (Online)



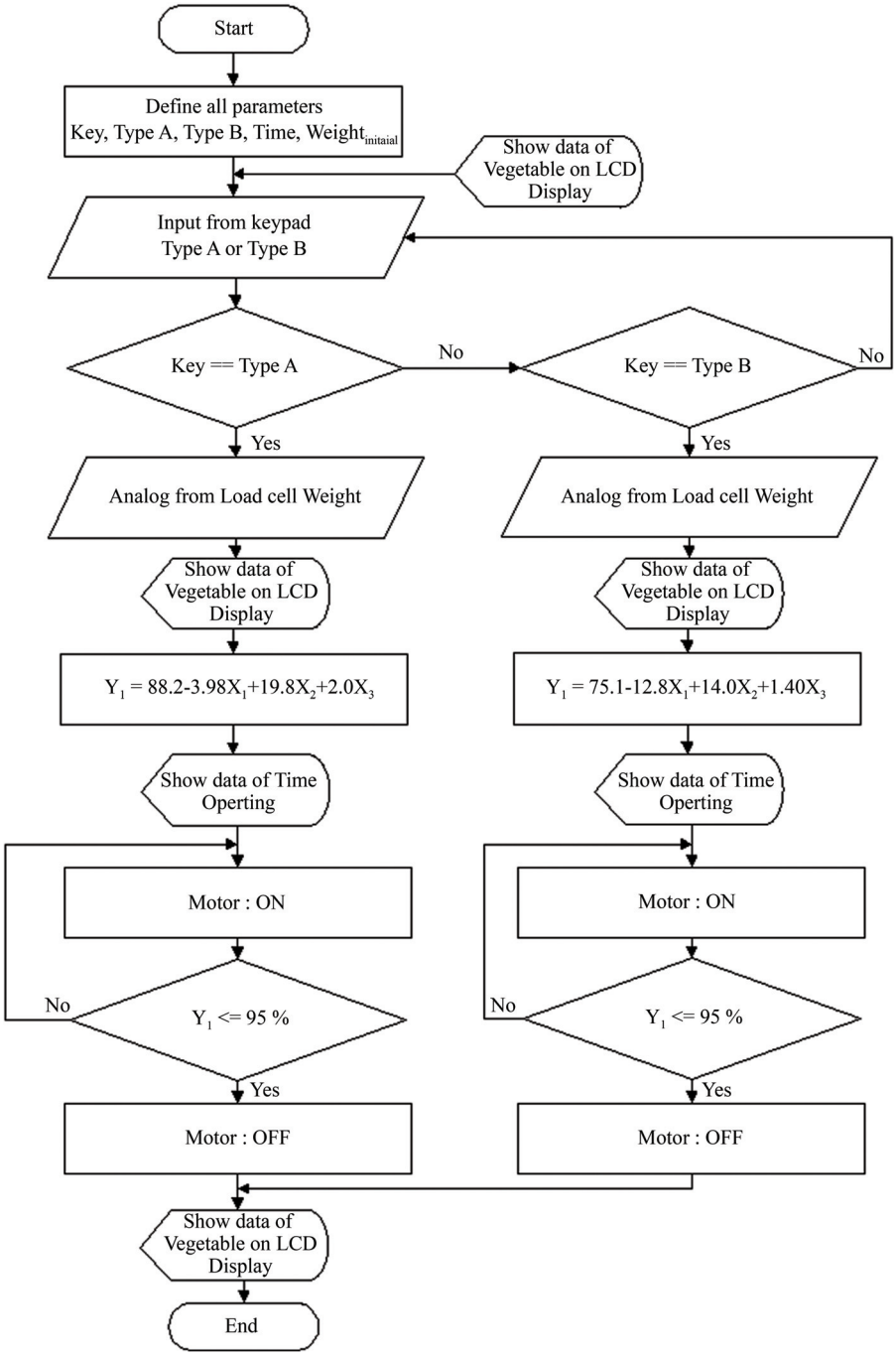
รูปที่ 2 ผังงานระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ



รูปที่ 3 ไดอะแกรมของระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ

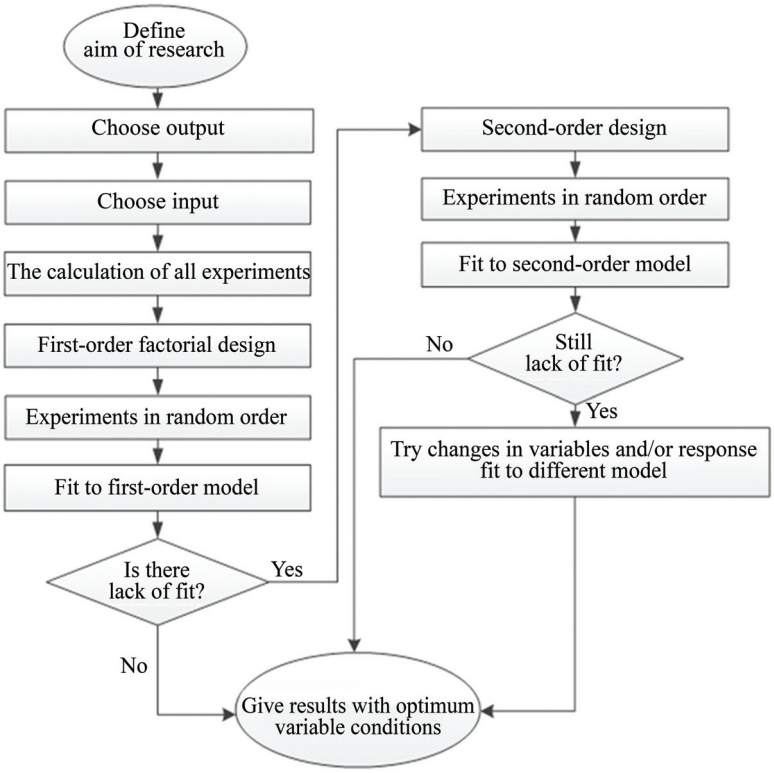
3. การออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

วิธีการทดลองแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full-Factorial Experimental Design Method) เป็นหนึ่งในวิธีของวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบของการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ แสดงขั้นตอนการทำงานและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการออกแบบด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ดังรูปที่ 5 และเมื่อพิจารณาตัวแปรสำหรับการออกแบบในงานวิจัยทั้งหมด 3 ตัวแปร สามารถกำหนดรูปแบบได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 4 ผังงานโปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 5 แผนภาพการไหลของวิธี Full-Factorial Experimental Design Method

ตารางที่ 2 การเข้ารหัสของตัวแปรอินพุตสำหรับการสลัดน้ำผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ

Variables	Unit	Symbol	Coded and Uncoded Levels		
			-1	0	+1
Weight	kg.	X_1	1	2	3
Speed	rpm	X_2	85	130	180
Time	min	X_3	5	10	15

และพิจารณาเอาต์พุต (Y) คือ ปริมาณน้ำที่สลัดออกจากผัก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\%W = \left(\frac{W_{initial} - W_{final}}{W_{initial}} \right) \times 100 \tag{1}$$

โดยที่

$\%W$ คือ เปอร์เซ็นต์การสลัดน้ำออกจากผัก (%)
$W_{initial}$ คือ น้ำหนักผักก่อนการสลัดน้ำออกจากผัก (kg)
W_{final} คือ น้ำหนักผักหลังการสลัดน้ำออกจากผัก (kg)

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาค่าจำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้ มีค่าเท่ากับ a^k โดยที่ a คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และ k คือ จำนวนปัจจัย [15] ในงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 3 ระดับ ผักที่เลือกนำมาใช้ในการทดลองเป็นผักที่มีลักษณะผักใบก้านตรง และผักใบหยัก แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 3 ระดับ โดยระดับที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ 85 130 และ 180 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นระดับความเร็วรอบต่ำ กลาง และสูง โดยความเร็ว 85 และ 180 รอบต่อนาที คือความเร็วรอบต่ำสุดและความเร็ว

รอบสูงสุดที่เครื่องสลัดน้ำผักที่พัฒนาขึ้นสามารถทำได้ ซึ่งแต่ละระดับความเร็วมีการเพิ่มขึ้นประมาณ 50 รอบต่อนาที จากการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง (3^3 Full Factorial Experiment) แสดงแผนการทดลอง 3^3 แฟกทอเรียล ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แผนการทดลอง 3^3 แฟกทอเรียลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ

Run	Factors			Run	Factors			Run	Factors		
	X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3
1	1	1	1	10	0	1	1	19	-1	1	1
2	1	1	0	11	0	1	0	20	-1	1	0
3	1	1	-1	12	0	1	-1	21	-1	1	-1
4	1	0	1	13	0	0	1	22	-1	0	1
5	1	0	0	14	0	0	0	23	-1	0	0
6	1	0	-1	15	0	0	-1	24	-1	0	-1
7	1	-1	1	16	0	-1	1	25	-1	-1	1
8	1	-1	0	17	0	-1	0	26	-1	-1	0
9	1	-1	-1	18	0	-1	-1	27	-1	-1	-1

ในการทดสอบค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบ โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ซึ่งค่า R^2 ยิ่งมาก หมายถึง สมการมีค่าความเหมาะสมมาก ซึ่งแสดงรูปแบบตารางการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 4 เมื่อ N คือจำนวนข้อมูล p คือจำนวนพจน์ตัวแปรอิสระในสมการการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแยกเป็น 3 ส่วน คือ ความแปรปรวนรวม (Sum Square Total: *SST*) เป็นความแปรปรวนรวมของข้อมูล ส่วนที่อธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Sum Squares Regression; *SSR*) และส่วนที่อธิบายไม่ได้ด้วยสมการถดถอย (Sum Squares Error; *SSE*) ดังสมการที่ (2)- (6) [15] - [17]

$$SST = SSR + SSE \tag{2}$$

$$SSR = \sum_{i=1}^{N}\left(Y_i' - \overline{Y}\right)^2 \tag{3}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{N}\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2 \tag{4}$$

เมื่อ $\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2$ คือ ผลบวกของผลต่างกำลังสองของ Y จากค่าเฉลี่ย

ซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่าง *SSR* กับ *SSE* หาได้จาก

$$F = \frac{Mean\ \ Square\ \ Regression}{Mean\ \ Square\ \ Residual} = \frac{SSR/(p-1)}{SSE/(N-p)} \tag{5}$$

ISSN 2672-9369 (Online)

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) หาได้จาก

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \tag{6}$$

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) [16]

Source of Variation	Degree of Freedom (DF)	Sum of Squares (SS)	Mean Square (MS)
Regression	p-1	SSR	SSR/(p-1)
Residual (Error)	N-p	SSE	SSE/(N-p)
Total	N-1	SST	

ผลการวิจัย

1. **ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง**

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบตัวอย่างผักใบ 3 ชนิด ได้แก่ ผักกาดหอม กรีนคอส และกรีนโอ๊ค ทดสอบปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยทดสอบ 3 ระดับ แบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี Full-Factorial Experimental ของผักกาดหอม กรีนคอส และกรีนโอ๊ค โดยผลการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เมื่อมีตัวแปร 3 อินพุต และ 2 เอาต์พุต ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ซึ่งแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 5 - 7

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี Full-Factorial Experimental ผักกาดหอม

Run	Factors			Y_1	Run	Factors			Y_1	Run	Factors			Y_1
	X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3	
1	1	1	1	98.0	10	0	1	1	97.5	19	-1	1	1	96.5
2	1	1	0	97.5	11	0	1	0	97.0	20	-1	1	0	96.5
3	1	1	-1	96.0	12	0	1	-1	97.0	21	-1	1	-1	96.0
4	1	0	1	96.0	13	0	0	1	90.5	22	-1	0	1	94.0
5	1	0	0	97.5	14	0	0	0	86.5	23	-1	0	0	94.0
6	1	0	-1	95.0	15	0	0	-1	85.0	24	-1	0	-1	92.7
7	1	-1	1	51.0	16	0	-1	1	63.0	25	-1	-1	1	87.5
8	1	-1	0	49.5	17	0	-1	0	61.5	26	-1	-1	0	83.5
9	1	-1	-1	47.0	18	0	-1	-1	71.5	27	-1	-1	-1	80.0

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี Full-Factorial Experimental ผักกรีนคอส

Run	Factors			Y_2	Run	Factors			Y_2	Run	Factors			Y_2
	X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3	
1	1	1	1	83.5	10	0	1	1	90.0	19	-1	1	1	94.5
2	1	1	0	82.5	11	0	1	0	91.5	20	-1	1	0	96.5
3	1	1	-1	78.5	12	0	1	-1	85.0	21	-1	1	-1	93.5
4	1	0	1	75.0	13	0	0	1	91.5	22	-1	0	1	92.4

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี Full-Factorial Experimental ผักกรีนคอส (ต่อ)

Run	Factors			Y_2	Run	Factors			Y_2	Run	Factors			Y_2
	X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3	
5	1	0	0	72.5	14	0	0	0	85.5	23	-1	0	0	90.5
6	1	0	-1	70.5	15	0	0	-1	83.0	24	-1	0	-1	88.5
7	1	-1	1	69.0	16	0	-1	1	83.5	25	-1	-1	1	86.5
8	1	-1	0	65.5	17	0	-1	0	77.5	26	-1	-1	0	92.0
9	1	-1	-1	47.0	18	0	-1	-1	74.5	27	-1	-1	-1	85.0

ตารางที่ 7 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี Full-Factorial Experimental ผักกรีนโอ๊ค

Run	Factors			Y_3	Run	Factors			Y_3	Run	Factors			Y_3
	X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3	
1	1	1	1	84.5	10	0	1	1	89.5	19	-1	1	1	96.5
2	1	1	0	84.0	11	0	1	0	91.0	20	-1	1	0	94.0
3	1	1	-1	79.0	12	0	1	-1	86.5	21	-1	1	-1	94.0
4	1	0	1	68.0	13	0	0	1	83.0	22	-1	0	1	91.0
5	1	0	0	65.5	14	0	0	0	86.5	23	-1	0	0	90.0
6	1	0	-1	61.5	15	0	0	-1	73.5	24	-1	0	-1	88.0
7	1	-1	1	42.5	16	0	-1	1	60.5	25	-1	-1	1	84.0
8	1	-1	0	44.0	17	0	-1	0	58.5	26	-1	-1	0	80.0
9	1	-1	-1	39.0	18	0	-1	-1	57.5	27	-1	-1	-1	80.5

เมื่อนำค่าในตารางที่ 5 - 7 มาวิเคราะห์และสร้างเป็นสมการต้นแบบ ดังสมการที่ (7) - (9)

$$Y_1 = 88.2 - 3.98X_1 + 19.8X_2 + 2.02X_3 \quad (7)$$

$$Y_2 = 82.4 - 9.74X_1 + 6.39X_2 + 3.36X_3 \quad (8)$$

$$Y_3 = 75.1 - 12.8X_1 + 14.0X_2 + 1.40X_3 \quad (9)$$

เมื่อ

Y_1 คือ เปอร์เซนต์การสลัดน้ำของผักกาดหอม
Y_2 คือ เปอร์เซนต์การสลัดน้ำของผักกรีนคอส
Y_3 คือ เปอร์เซนต์การสลัดน้ำของผักกรีนโอ๊ค
X_1 คือ น้ำหนักของผัก
X_2 คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์
X_3 คือ เวลาที่ใช้สลัด

2. **การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)**

จากผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Full-Factorial Experimental เมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยการทดสอบค่าความเหมาะสมของสมการต้นแบบ ด้วยค่า R^2 พบว่า สมการต้นแบบ Y_1

ISSN 2672-9369 (Online)

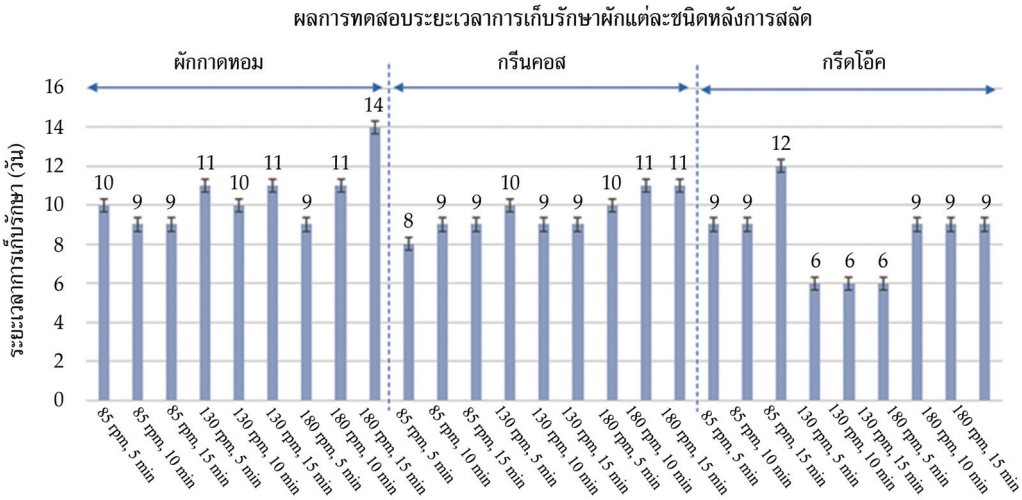
มีค่า R^2 เท่ากับ 76.9 % และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.001 Y_2 มีค่า R^2 เท่ากับ 84.20 % และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.001 และ Y_3 มีค่า R^2 เท่ากับ 89.30% และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.001 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA สำหรับการสลัดน้ำของผักกาดหอม กรีนคอส และกรีนโอ๊ค ดังตารางที่ 8 จากการศึกษาเอกสารวิชาการและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง พบว่า การออกแบบการทดลองที่ดีควรมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 > 70$ % และค่า P- Value (ความน่าจะเป็น) < 0.05 (α) แสดงว่าแบบจำลองนี้มีความเพียงพอในการฟิตข้อมูลและถือว่าเป็นข้อมูลที่ดี สามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด [17]

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

Variables	Source	DF	SS	MS	F	P
Y_1	Regression	3	7419.5	2473.2	25.59	0.001
	Residual Error	23	2222.9	96.6		
	Total	26	9642.4			
Y_2	Regression	3	2646.57	882.19	40.80	0.001
	Residual Error	23	497.27	21.62		
	Total	26	3143.85			
Y_3	Regression	3	6562.8	2187.6	63.90	0.001
	Residual Error	23	787.4	34.2		
	Total	26	7350.2			

3. ผลการวิเคราะห์ด้านคุณภาพของผักสดตัดแต่งชนิดใบหลังการสลัดน้ำออกจากผัก

การเก็บรักษาผลิตผลที่อุณหภูมิต่ำเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการทำให้กระบวนการต่าง ๆ ทางชีวภาพช้าลงและยืดอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้ เนื่องจากสามารถลดอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ [18] ซึ่งผักสดตัดแต่งชนิดใบเมื่อนำไปบรรจุตามกรรมวิธี คือ บรรจุถุงชนิด Oriented Polypropylene (OPP) เจาะรูขนาดรูเข็ม เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 - 12 °C [19] สามารถนำมาวิเคราะห์คุณภาพของผักสด โดยพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษาและความสมบูรณ์ของผักทั้ง 3 ชนิด และทดสอบที่ความเร็วรอบ 85 130 และ 180 รอบต่อนาที ระยะเวลาการสลัดน้ำออกจากผัก 5 10 และ 15 นาที แสดงผลการทดสอบคุณภาพของผักสดตัดแต่งชนิดใบหลังการสลัดน้ำ ด้านระยะเวลาการเก็บรักษาและความสมบูรณ์ของผักทั้ง 3 ชนิดดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการทดสอบระยะเวลาเก็บรักษาผักแต่ละชนิดหลังการสลัดน้ำออกจากผัก

จากผลการทดสอบระยะเวลาเก็บรักษาผักแต่ละชนิดหลังการสลัดน้ำออกจากผักพบว่า ผักกาดหอมที่ผ่านการสลัดน้ำออกจากผักที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที เวลา 15 นาที สามารถเก็บรักษาได้นานที่สุด คือ 14 วัน ผักกรีนคอสที่ผ่านการสลัดน้ำออกจากผักที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที เวลา 15 นาที สามารถเก็บรักษาได้นานที่สุด คือ 11 วัน ผักกรีนโอ๊คที่ผ่านการสลัดน้ำออกจากผักที่ความเร็ว 85 รอบต่อนาที เวลา 15 นาที สามารถเก็บรักษาได้นานที่สุด คือ 12 วัน ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ [19] ซึ่งทำการทดสอบเก็บผลิตผลสดหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา โดยบรรจุในถุง OPP ที่อุณหภูมิ 7 - 15 ^{o}C สามารถเก็บรักษาผลิตผลได้มากกว่า 10 วัน

4. ผลการทดสอบการสลัดน้ำออกจากผักด้วยโปรแกรมควบคุมการทำงานอัตโนมัติ

ผลการทดสอบการสลัดน้ำออกจากผักด้วยโปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยใช้สมการที่ (6) - (8) สำหรับเป็นสมการควบคุมการทำงาน ใช้ตัวอย่างผักชนิด A คือ ใบหยัก และผักชนิด B คือ ผักก้านตรง น้ำหนัก 1 กิโลกรัม ทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง และพิจารณาความแม่นยำของการทำงานของโปรแกรมตามเงื่อนไขที่กำหนด แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 9 จากผลการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติพบว่า เมื่อนำผักชนิด A คือ ผักใบหยัก น้ำหนัก 1 กิโลกรัม โปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำทั้ง 5 ครั้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ เปอร์เซ็นต์การสลัดน้ำออกจากผักไม่น้อยกว่า 95 % และเมื่อนำผักชนิด B คือ ผักก้านตรง น้ำหนัก 1 กิโลกรัม โปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำทั้ง 5 ครั้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ เปอร์เซ็นต์การสลัดน้ำออกจากผักไม่น้อยกว่า 95 % เช่นกัน

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ

ชนิดผักที่ทดสอบ	เปอร์เซ็นต์การสลัดน้ำออกจากผัก					เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
A	96.0	96.0	95.0	95.0	96.0	95.6
B	95.0	95.0	97.0	97.0	97.0	96.0

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดของการสลัดน้ำออกจากผักและเพิ่มอายุการเก็บรักษา ทำการทดสอบตัวอย่างผักใบ 3 ชนิด ได้แก่ ผักกาดหอม กรีนคอส และกรีนโอ๊ค ทดสอบพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ แต่ละพารามิเตอร์ทดสอบ 3 ระดับ ได้แก่ น้ำหนักทดสอบน้ำหนักที่ 1 2 และ 3 กิโลกรัม ความเร็วรอบ 85 130 และ180 รอบต่อนาที และระยะเวลา 5 10 และ 15 นาที โดยเอาต์พุต คือ ปริมาณน้ำที่สลัดออกจากผักและอายุการเก็บรักษา ซึ่งจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 64 การทดลอง แบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สลัดออกจากผักกับน้ำหนักเริ่มต้น ผลการทดลองพบว่า ผักกาดหอมน้ำหนัก 3 กิโลกรัม สลัดด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ระยะเวลา 15 นาที สามารถสลัดน้ำออกจากผักได้มากสุด 98 % กรีนคอสน้ำหนัก 1 กิโลกรัม สลัดด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที สามารถสลัดน้ำออกจากผักได้มากสุด 96.50 % และกรีนโอ๊คน้ำหนัก 1 กิโลกรัม สลัดด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ระยะเวลา 15 นาที สามารถสลัดน้ำออกจากผักได้มากสุด 96.50 % ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของเครื่องสลัดแบบเหวี่ยงหนีศูนย์ คือ ความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ในการสลัดมีผลต่อการสลัดแห้ง [3], [7], [20] ดังตารางที่ 10

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 10 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการสลัดน้ำออกจากผักสดตัดแต่งชนิดผักใบด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

ชนิดผัก	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วในการสลัด (rpm)	ระยะเวลา (min)	การสลัดน้ำ (%)
ผักกาดหอม	3	180	15	98.00
กรีนคอส	1	180	10	96.50
กรีนโอ๊ค	1	180	15	96.50

ส่วนที่ 2 เปรียบเทียบอายุการเก็บรักษาของผักหลังการสลัด บรรจุในถุงพลาสติกเจาะรูและเก็บรักษาในตู้เย็นอุณหภูมิ 8 - 12 ^{o}C ผลการทดลองพบว่าผักกาดหอมมีอายุการเก็บรักษา 15 วัน กรีนคอสมีอายุการเก็บรักษา 12 วัน และกรีนโอ๊คมีอายุการเก็บรักษา 13 วัน โดยมีอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นคิดเป็น 80 66.67 และ 20.08 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผักที่ไม่ผ่านการล้างและสลัดน้ำ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสลัดน้ำออกจากผักแต่ละชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ดำเนินงานวิจัย

References

[1] Department of International Trade Promotion. (2020). **Annual Report 2020**. Access (20 March 2021). Available (https://www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/731355/731355.pdf&title=731355&cate=900&d=0)

[2] Brackett, R. E. (2000). **Safe Handling of Fruits and Vegetables**. Safe Handling of Foods. New York; Marcel Dekker, Inc.

[3] Poondee, J. and Nimjit, S. (2021). Optimal Storage Pattern for Extremely Delicate Produce: Case Study of Sunflower Sprouts. **Srinakharinwirot University Engineering Journal**. Vol. 16, No. 3, pp. 75-83

[4] Kruekumary, P., Ngernnate, T., Hebkham, W., and Thongdee, P. (2016). Development of Spinning Marigolds Dehydrator Machine. In **Proceeding of 3th Conference on Research and Creative Innovations**. pp. 1-6. Chiang Mai

[5] Surekham, W. and Somjai, S. (2017). A Salad of Mushrooms Community Enterpris Ban Kum 2/8 Moo 2 Bang Phae Sub-district, Bang Phae District, Ragchaburi Province. In **Proceeding of 5th Muban Chombueng Rajabhat University's National Conference**. pp. 249-254. Ratchaburi

[6] Putakamnerd, C., Warapat, C., and Winyangkul, S. (2019). Design and Construction of Spinning Machine for Vegetable. In **Proceeding of the 6th NEU National and International Conference 2019 (NEUNIC 2019)**. North Eastern University: Khon Kaen. pp. 1050-1057

[7] Yamfang, M. (2019). Design and Construction of Water and Oil Removal Machine for Pork Snack Production. **Journal of Engineering, RMUTT**. Vol. 17, No. 2, pp. 99-111

[8] Li, J. T., Liu, Z. J., Jabbar, M. A., and Gao, X. K. (2004). Design Optimization for Cogging Torque Minimization Using Response Surface Methodology. **IEEE Transactions on Magnetics**. Vol. 40, Issue 2, pp. 1176-1179. DOI: 10.1109/TMAG.2004.824809

[9] Sezgin, H., Bahadir, S. K., Boke, Y. E., and Kalaoglu, F. (2014). Thermal Analysis of E-Textile Structures Using Full-Factorial Experimental Design Method. **Journal of Industrial Textiles**. pp. 1-13. DOI: 10.1177/1528083714540699

[10] Li, Z., Zhang, L., Lun, Q., and Jin, H. (2014). Optimal Design of Multi-DOF Deflection Type PM Motor by Response Surface Methodology. **Journal of Electrical Engineering and Technology**. Vol. 10, Issue 3, pp. 965-970

[11] Limratchapong, T. and Huailuek, N. (2019). **Design of Experiment for Evaluating the Optimal Condition in Coffee Beans Roasting**. B. Eng. Management and Logistics Engineering Dhurakij Pundit University

[12] Jittraboon, C. (2018). **Design of Experiment to Determine the Appropriate Control Level in Hard Disk Pivot Manufacturing Process**. M. Eng. Engineering Management Kasetsart University

[13] Vennilaaa, D. B., Karuppusamib, G., and Senthila, P. (2016). Analysis of Different Infiltration Effect for Selective Laser Sintering Process Through Taguchi Method. **Australian Journal of Mechanical Engineering**. Vol. 14, Issue 3, pp. 217-223. DOI: 10.1080/14484846.2015.1093255

[14] Srebrenkoska, S., Kochov, A., and Minovski, R. (2016). Six Sigma and Design of Experiments for Improving the Production of Composite Pipes. **Journal for Technology of Plasticity**. Vol. 41, No. 2, pp. 11-17

[15] Sudasna-na-Ayudthya, P. and Luangpaiboon, P. (2008). **Design and Analysis of Experiments**. Bangkok: Top Publishers

[16] Silpcharu, T. (2012). **Research and Statistical Analysis with SPSS and AMOS**. Bangkok: Business R&D Publishers

[17] Haaland, P. D. (1989). **Experimental Design in Biotechnology**. New York: Marcel Dekker Publishers

[18] Giannakourou, M. C. and Tsironi, T. N. (2021). Application of Processing and Packaging Hurdles for Fresh-Cut Fruits and Vegetables Preservation. **Foods**. Vol. 10, Issue 4, pp. 1-23. DOI: 10.3390/foods10040830

[19] Kwanhong, P., Songchan, K., and Srithanyarat, S. (2021). **Annual Report Using Different Packaging for Storage of Minimally Processed Vegetables**. Access (10 May 2021). Available (http://www.doa.go.th)

[20] Maunkhaw, D. and Dulyakul, Y. (2016). The Study and Design of Plastic Spinning Process for Plastic Recycling. In **Proceeding of the 8th Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus**. Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus: Nakhon Pathom. pp. 363-371

ISSN 2672-9369 (Online)

การศึกษาลักษณะของคลื่นผิวน้ำที่ส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำ

The Effect of Surface Waves on Power Conversion Efficiency of Underwater Solar Panels

จักราวุธ นิลทา[1] และอัครินทร์ อินทนิเวศน์[2*]

Jakrawut Ninta[1] and Akarin Intaniwet[2*]

Received: *August 29, 2022;* ***Revised:*** *December 13, 2022;* ***Accepted:*** *December 13, 2022*

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของคลื่นผิวน้ำที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาลักษณะคลื่นที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ดีที่สุดที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อม และแสงอาทิตย์จริง ผลการทดสอบที่ได้ถูกนำไปสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการผลิตไฟฟ้ารายปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำ โดยใช้ตัวแปรสำคัญในการทำนายการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายปี ได้แก่ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าคลื่นผิวน้ำที่มีความสูง 0.3 เซนติเมตร สามารถทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงถึง 24.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 12.78 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำผลการทดลองไปทำนายการผลิตไฟฟ้ารายปีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีกำลังการติดตั้ง 1 เมกะวัตต์ พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำสร้างรายได้จากการจำหน่ายไฟฟ้าปีละ 9,804,636 บาท/ปี ซึ่งมากกว่าระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกประมาณ 227,059.74 บาท/ปี

คำสำคัญ : แผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำ; คลื่นผิวน้ำ; ประสิทธิภาพ

[1] *วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่*
[2] *หน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่*
[1] *School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai*
[2] *Smart Energy and Environmental Research Unit, Maejo University, Chiang Mai*
[*] *Corresponding Author, Tel. 08 2626 7600, E - mail: a.intaniwet@hotmail.co.th*

Abstract

This work reports the effect of surface waves on the power generation of solar panels. The experiments were carried out to determine the optimal wave characteristics for solar panels to generate maximum power when installed under water at the depth of 1 cm. Several electrical parameters were obtained under natural sunlight and ambient conditions for the comparison. The results were used to create a mathematical model which was used to predict the annual power generation of underwater solar panels. The key parameters employed in the prediction of the annual solar power generation included solar radiation, ambient and panel temperature. The results revealed that the solar panel installed underwater with surface wave height of 0.3 cm showed the highest power conversion efficiency of 24.06 %, compared to 12.78 % from the one installed on land. The annual power generation of an installed underwater solar panels with the surface wave height of 0.3 cm and capacity of 1 MW was estimated, by a mathematical model, to provide an yearly income of 9,804,636 THB, which was 227,059 THB higher than that from the on-ground installation system.

Keywords: Solar Photovoltaic Panel; Surface Waves; Efficiency

บทนำ

พลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิล โดยเทคโนโลยีพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาผลิตไฟฟ้า คือ เทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจัดเป็นเทคโนโลยีที่มีความง่ายในการติดตั้งใช้งาน และการบำรุงรักษา เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนสามารถเข้าถึงได้อย่างแพร่หลาย ไม่มีต้นทุนในส่วนของแสงอาทิตย์ และมีระยะเวลาคืนทุนต่ำ แต่เทคโนโลยีนี้มีปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้อย่างถาวร เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าต้องนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปติดตั้งบริเวณกลางแจ้ง เพื่อให้แผงรับรังสีอาทิตย์และเข้าสู่กระบวณการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป ซึ่งกระบวนการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องรับรังสีอาทิตย์ตลอดเวลาทำให้อุณหภูมิของแผงสูงขึ้นตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ [1] และทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ลดลง ส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าลดลง นอกจากนั้นยังมีปัญหาฝุ่นที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ โดยฝุ่นจะทำให้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ผ่านหน้าแผงตกกระทบไปยังตัวเซลล์น้อยลงกว่าเดิม ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยลงไปด้วย สำหรับการการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นราบยังมีความจำเป็นต้องใช้พื้นที่สำหรับการติดตั้ง โดยการติดตั้งทุก ๆ 1 กิโลวัตต์จะต้องใช้พื้นที่เปล่าประมาณ 10 ตารางเมตร ซึ่งถ้าเป็นการติดตั้งบนหลังคาของอาคารก็จะเป็นการใช้พื้นที่ว่างเปล่าให้เกิดประโยชน์ แต่ถ้าบริเวณนั้นเป็นพื้นที่สำหรับการทำเกษตรกรรม หรือมีแหล่งน้ำตามธรรมชาติ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นที่เหล่านั้นอาจจะทำให้เกิดประเด็นการใช้พื้นที่ไม่เหมาะสมเกิดขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวได้มีนักวิจัยทำการคิดค้นแนวทางแก้ปัญหาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการระบายความร้อนด้วยน้ำบริเวณหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [2] – [4] ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหน้าแผงลดลงไปสูงสุดร้อยละ 16 และมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับแผงที่ไม่ได้รับการระบายความร้อน นอกจากนั้นยังมีการทดลองติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในน้ำตื้นและน้ำลึก [5] โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (a-Si) พบว่ากำลังการผลิตไฟฟ้า

ISSN 2672-9369 (Online)

ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในน้ำลึก (12 เซนติเมตร) มีค่าน้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในน้ำตื้น (2 เซนติเมตร) โดยที่ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระดับน้ำตื้นและน้ำลึกอยู่ที่ร้อยละ 2.2 - 7.8 และร้อยละ 1.5 - 6.28 นอกจากนั้นยังมีการศึกษาสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ที่จมอยู่ใต้น้ำ โดยทำการทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว [6] มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับผลลัพธ์และการตรวจสอบและทำความศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำ พบว่าน้ำสามารถดูดซับความเข้มแสงที่ไม่มีความจำเป็นต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าระดับความลึกที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำอยู่ที่ประมาณ 1 - 5 เซนติเมตร

จากวิธีการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้สนใจศึกษาการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปติดตั้งใต้น้ำเพื่อลดปัญหาอุณหภูมิและฝุ่นที่เกิดขึ้นกับการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งหลังจากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงจุดบกพร่องในการทดสอบ เนื่องมาจากในสภาวะจริงอาจจะเกิดคลื่นบริเวณผิวน้ำที่ส่งผลกระทบต่อการส่องผ่านของแสงจากผิวน้ำ จึงทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาผลกระทบของคลื่นผิวน้ำที่ส่งผลในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร จากผิวน้ำเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำ จากนั้นได้ทำการนำผลการทดสอบไปสร้างสมการทำนายการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1 เมกะวัตต์ ที่ติดตั้งอยู่ใต้น้ำตามเงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบที่ดีที่สุดต่อไป

วิธีการดำเนินงานวิจัย

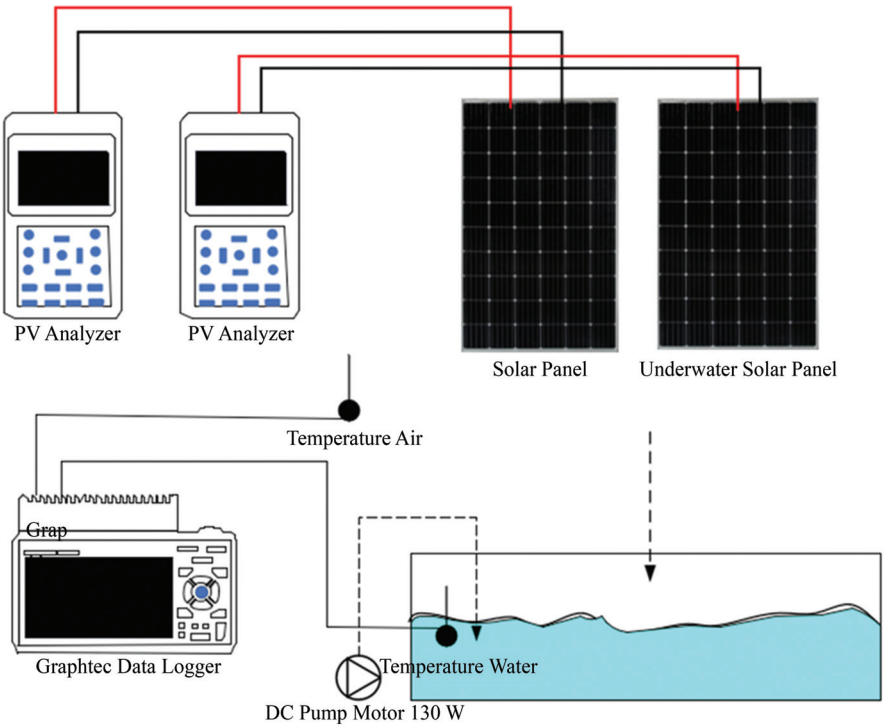
วิธีดำเนินการศึกษา

การทดสอบคลื่นผิวน้ำที่ส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำ แบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การศึกษาลักษณะของคลื่นผิวน้ำที่ส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำ และนำระดับคลื่นที่ดีที่สุดมาทำนายการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่คาดว่าจะผลิตได้ในตลอดทั้งปี เพื่อเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก โดยขั้นตอนการทดลองในแต่ละส่วนจะถูกอธิบายในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

1. **การศึกษาลักษณะของคลื่นผิวน้ำที่ส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำ**

ทำการทดสอบโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon) ขนาด 100 วัตต์ V_{mp} 18.2 โวลต์ I_{mp} 5.49 แอมป์ V_{oc} 22.3 โวลต์ I_{sc} 5.82 แอมป์ NOCT 45 ^{o}C และมีพื้นที่ในการรับค่ารังสีอาทิตย์ 0.616 ตารางเมตร จำนวน 2 แผง ติดตั้งไว้ในบ่อผ้าใบขนาด 2.0 × 3.0 × 0.5 ลูกบาศก์เมตร ที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร จำนวน 1 แผง และติดตั้งบนบก 1 แผง หลังจากนั้นทำการติดตั้งเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar PV Analyzer, PROVA210, ค่าความคลาดเคลื่อน ±1 %) กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแผงเพื่อบันทึกข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K, ค่าความคลาดเคลื่อน ±2.2 ^{o}C) ใช้ในการวัดข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิน้ำ และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ (Apogee, ค่าความคลาดเคลื่อน ±10 %) จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บข้อมูล 10 ช่อง (Graphtec 10 channel, ค่าความคลาดเคลื่อน ±0.1 %) เพื่อทำการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นทุก 5 นาที โดยเริ่มตั้งแต่เวลา 08.00 - 16.00 น. นอกจากนั้นทำการติดตั้งปั๊มน้ำกระแสตรงขนาด 130 วัตต์ เพื่อใช้ในการสร้างคลื่นกระแทกผิวน้ำจากด้านบนให้เกิดคลื่นผิวน้ำในอัตราการไหล 34.07 45.42 และ 56.78 ลิตรต่อนาที เพื่อเป็นการจำลองคลื่นที่ผิวน้ำที่เกิดจากลมที่มีอัตราการไหลน้อยกว่า 2.6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากลมคือองค์ประกอบสำคัญในการสร้างคลื่นผิวน้ำ และลมที่มีความเร็วน้อยกว่า 2.6 เมตรต่อนาที จะสร้างคลื่นผิวน้ำที่มีความสูงไม่เกิน 7 เซนติเมตร [7] - [8] หลังจากทำการทดลองศึกษาการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวและทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะทำการวิเคราะห์

ผลตามค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุดโดยการเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก โดยวิเคราะห์จากค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบริเวณหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเลือกวันที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกันมากที่สุด อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อสามารถวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองในขั้นตอนแรกจะนำผลการทดลองที่ดีที่สุดไปสร้างสมการสำหรับใช้ในการทำนายการผลิตไฟฟ้าตลอดทั้งปีในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป โดยขั้นตอนการทดสอบจะอธิบายเป็นแผนภาพอย่างง่ายในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังอธิบายขั้นตอนการทดลอง

2. การทำนายการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี

ขั้นตอนการสร้างสมการการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับแผงที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำจะใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาใช้ในการทำนายการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำในเงื่อนไขที่ดีที่สุดของการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งตัวแปรที่นำมาใช้ในการสร้างสมการ ได้แก่ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบริเวณหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำ อุณหภูมิแวดล้อมตลอดทั้งวัน และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการทำนายการผลิตไฟฟ้าแล้ว จะทำการทำนายการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำตลอดทั้งปี

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ใช้เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนใช้ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์การผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [9] ซึ่งข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่นำมาทำการทำนายการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นข้อมูลตัวแทนรายชั่วโมงของเดือนแต่ละเดือนในตารางที่ 1

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 1 ตัวแทนค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงในแต่ละเดือน

	ตัวแทนค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายเดือน (วัตต์ต่อตารางเมตร)											
เวลา	**ม.ค.**	**ก.พ.**	**มี.ค.**	**เม.ย.**	**พ.ค.**	**มิ.ย.**	**ก.ค.**	**ส.ค.**	**ก.ย.**	**ต.ค.**	**พ.ย.**	**ธ.ค.**
07.00 น.	179	231	244	237	266	354	387	380	316	191	108	130
08.00 น.	389	455	462	439	403	515	546	546	489	348	285	325
09.00 น.	601	675	678	642	553	649	675	678	630	478	469	527
10.00 น.	775	853	852	809	687	745	764	768	728	580	627	701
11.00 น.	879	953	952	910	770	797	807	811	778	662	730	813
12.00 น.	892	957	959	925	784	802	802	802	775	674	757	842
13.00 น.	813	864	870	851	727	759	748	742	721	616	703	781
14.00 น.	655	692	704	703	610	617	650	637	617	516	578	644
15.00 น.	450	473	492	508	456	545	514	492	473	397	407	456
16.00 น.	236	248	272	302	322	388	350	317	297	248	222	252
17.00 น.	47	53	81	119	175	212	168	125	101	80	54	67

ในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ในการทำนายการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายปี ผู้วิจัยเลือกใช้ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมย้อนหลังรายปีของกรมอุตุนิยมวิทยาปี พ.ศ. 2561 [10] เพื่อใช้เป็นตัวแทนอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด และต่ำสุดของเดือนแต่ละเดือนใน 1 ปีในตารางที่ 2 และใช้สมการทำนายอุณหภูมิแวดล้อมในแต่ละชั่วโมงเพื่อเป็นตัวแทนอุณหภูมิที่จะนำไปใช้ในการทำนายอุณหภูมิแวดล้อมรายชั่วโมง [11] ในสมการที่ (1)

ตารางที่ 2 ตัวแทนอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดและต่ำสุดรายปี

อุณหภูมิ (°C)	ตัวแทนอุณหภูมิแวดล้อมรายเดือน (วัตต์ต่อตารางเมตร)											
	ม.ค.	**ก.พ.**	**มี.ค.**	**เม.ย.**	**พ.ค.**	**มิ.ย.**	**ก.ค.**	**ส.ค.**	**ก.ย.**	**ต.ค.**	**พ.ย.**	**ธ.ค.**
สูงสุด	30.3	35.5	35.5	38.5	36.5	39.5	35.2	33.0	34.8	35.5	33.0	29.0
ต่ำสุด	16.9	17.4	20.5	25.4	24.5	24.0	24.8	23.8	24.0	23.5	23.3	21.6

$$T_a = \frac{1}{2}\left[\left(T_{max} + T_{min}\right) + \left(T_{max} - T_{min}\right) sin\left(\frac{2\pi}{24}\left(t - 9\right)\right)\right] \quad (1)$$

เมื่อ

T_{max} คือ อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดของเดือนที่ต้องการวิเคราะห์ (°C)
T_{min} คือ อุณหภูมิแวดล้อมต่ำสุดของเดือนที่ต้องการวิเคราะห์ (°C)
t คือ เวลาที่ต้องการพิจารณา (ชั่วโมง)

เมื่อทำการทราบข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมรายชั่วโมงแล้วจะสามารถคำนวณอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก [12] ในเวลาเดียวกันได้ในสมการที่ (2)

$$T_P = T_a + \frac{\left(NOCT - 20\right)}{800} \times I_G \quad (2)$$

เมื่อ

T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อมรายชั่วโมงที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) (°C)
$NOCT$ คือ ค่าอุณหภูมิเซลล์ใช้งานที่อ้างอิงโดยการทดสอบ (°C)
I_G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่ได้จากตารางที่ 1 (วัตต์ต่อตารางเมตร)

ในส่วนอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำที่มีน้ำเป็นปัจจัยหลักในการช่วยเรื่องการดูดซับสะท้อนแสง และระบายความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงจำเป็นต้องคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำตลอดทั้งวันเพื่อนำผลการคำนวณอุณหภูมิน้ำไปใช้ในการหาอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำตลอดทั้งวัน ซึ่งการคำนวณอุณหภูมิน้ำ และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำจะใช้สมการที่ (3) และ (4) ในการคำนวณ

$$T_W = 2.5396 \times I_G^{-0.22105} \times T_a^{1.0744} \tag{3}$$

เมื่อ

T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ (°C)
I_G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่ได้จากตารางที่ 1 (วัตต์ต่อตารางเมตร)
T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อมรายชั่วโมงที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) (°C)

$$T_{pw} = 0.015347 \times I_G^{0.50735} \times T_a^{-0.98435} \times T_w^{2.5216} \tag{4}$$

เมื่อ

T_{pw} คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำ (°C)
I_G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่ได้จากตารางที่ 1 (วัตต์ต่อตารางเมตร)
T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อมรายชั่วโมงที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) (°C)
T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ (°C)

เมื่อทำการคำนวณตัวแทนข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อม และข้อมูลตัวแทนอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำได้จากการคำนวณในสมการที่ (1) - (4) แล้ว จะนำผลการคำนวณไปใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำตลอดทั้งปีในสมการที่ (5) และ (6) และทำการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายชั่วโมงในสมการที่ (7) หลังจากนั้นทำการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันในสมการที่ (8) และทำการคำนวณประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [13] ได้ในสมการที่ (9)

$$P_{max} = 0.22983 \times I_G^{0.8288} \times T_a^{0.00279} \times T_p^{0.01028} \times 10000 \tag{5}$$

เมื่อ

I_G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก (วัตต์ต่อตารางเมตร)
T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม (°C)
T_p คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก (°C)

ISSN 2672-9369 (Online)

$$P_{max} = 0.1854 \times I_G^{0.93072} \times T_a^{-0.00067} \times T_p^{0.0543} \times 10000 \quad (6)$$

เมื่อ

I_G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำ, ($I_{G_{บนบก}}$ × 0.5976) (วัตต์ต่อตารางเมตร)

T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม (°C)

T_p คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำ (°C)

$$E = P \times t \quad (7)$$

เมื่อ

P คือ กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำ (วัตต์)

t คือ เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง)

$$E_{Daily} = \sum_{t=08.00}^{16.00} E_t \quad (8)$$

เมื่อ

E_{Daily} คือ พลังงานรวมที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน (วัตต์ชั่วโมงต่อวัน)

E_t คือ พลังงานรายชั่วโมงที่ผลิตได้ตลอดทั้งวัน (วัตต์ชั่วโมง)

$$\eta\% = \frac{P_{max}}{I_G \times A} \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ

P_{max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดที่ต้องการพิจารณา (วัตต์)

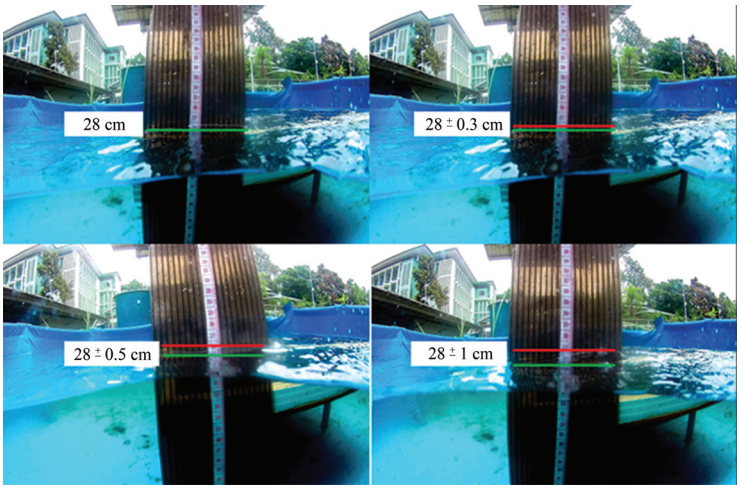
I_G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

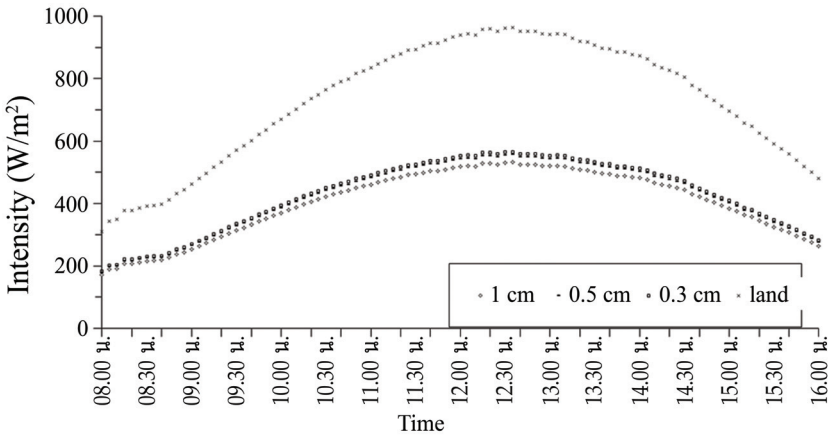
ผลการทดลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำจะทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามเงื่อนไขการทดลองที่กล่าวมาก่อนหน้านี้คือ การทดสอบผลของคลื่นขนาดต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และการนำข้อมูลที่ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดไปสร้างสมการสำหรับทำนายผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปี ดังรายระเอียดต่อไปนี้

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร เมื่อมีคลื่นผิวน้ำความสูงเท่ากับ 0.3 0.5 และ 1 เซนติเมตร ในรูปที่ 2 โดยทำการวัดในช่วงเวลา 8.00 - 16.00 น. จากรูปจะสังเกตุได้ว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงที่ติดตั้งใต้น้ำมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าของแผงที่ติดตั้งบนบกอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สำหรับแผงที่ติดตั้งใต้น้ำเมื่อมีความสูงของคลื่นต่าง ๆ พบว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบเมื่อคลื่นผิวน้ำมีความสูงเท่ากับ 0.3 เซนติเมตรจะมีค่าสูงที่สุด จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าลักษณะของคลื่นมีผลต่อการส่องผ่านและการสะท้อนของแสง เนื่องจากคลื่นผิวน้ำในแต่ละลูกคลื่นจะมีลักษณะคล้ายกับเลนส์เว้าและเลนส์นูน เมื่อแสงตกกระทบกับคลื่นที่มีลักษณะต่างกันในแต่ละช่วงเวลา มุมของแสงที่ตกกระทบกับคลื่นผิวน้ำจะมีการทะลุผ่านและสะท้อนของแสงออกไปต่างกันในแต่ละคลื่นที่เกิดจากอัตราการไหลต่างกัน จากการทดสอบพบว่าแสงที่ทะลุผ่านผิวน้ำ

ไปตกกระทบบริเวณหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการลดลงตามความสูงของคลื่นผิวน้ำ หลังจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำพบว่าอัตราการส่องผ่านของแสงใต้น้ำที่ขนาดความสูงของคลื่นเท่ากับ 0.3 0.5 และ 1 เซนติเมตร จะมีค่าเฉลี่ยตลอดวันอยู่ที่ 427.47 421.55 และ 401.76 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงบนบกพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 728.68 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยจะพบว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำจะมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลงประมาณร้อยละ 58.66 ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ระดับความสูงของคลื่นผิวน้ำในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

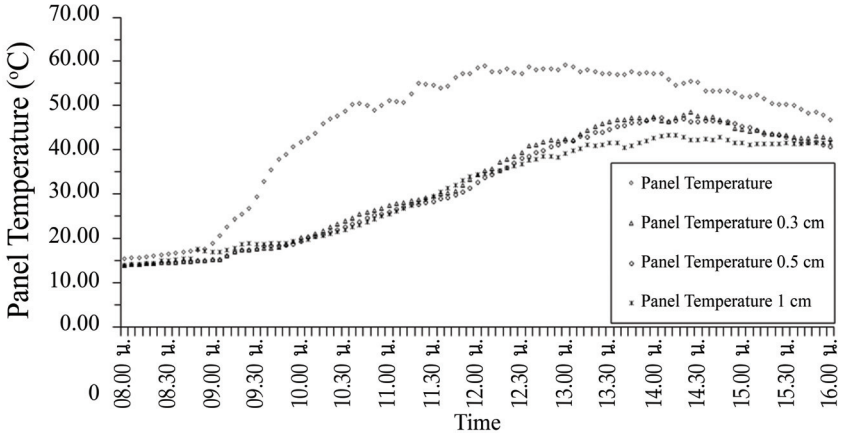


รูปที่ 3 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนบกและใต้น้ำ

รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำที่มีความสูงของคลื่น 0.3 0.5 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 3 ที่แสดงให้เห็นถึงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบบริเวณหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ยังไม่ถูกน้ำสะท้อน หรือดูดซับความยาวคลื่นแสงออกไป ส่งผลทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากที่สุดในการทดลอง ซึ่งลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก ซึ่งอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่เวลาประมาณ 12.00 - 13.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นสูงสุดของวันในรูปที่ 3 หลังจากนั้นอุณหภูมิแผงจะลดลงอย่างช้า ๆ ตามค่ารังสีอาทิตย์ที่ลดลงไปเช่นเดียวกัน แตกต่างกับอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

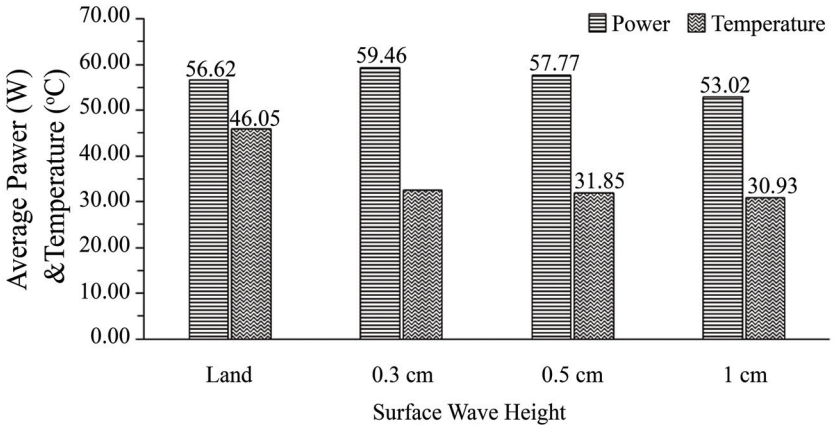
ISSN 2672-9369 (Online)

ที่ติดตั้งใต้น้ำที่ได้รับการดูดซับและสะท้อนคลื่นแสงออกไปบางส่วนทำให้อุณหภูมิของแผงมีค่าน้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก โดยอุณหภูมิแผงจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายกับเส้นตรงจนสูงสุดที่เวลาประมาณ 14.00 - 14.30 น. หลังจากนั้นอุณหภูมิของแผงจะลดลง ซึ่งอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำที่ความสูงคลื่น 0.3 เซนติเมตร มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำที่ความสูงคลื่น 0.5 และ 1 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความสูงคลื่น 0.3 เซนติเมตร แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มากกว่าระดับความสูงคลื่นอีก 2 ระดับในการทดลอง สำหรับอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำตลอดทั้งวันในแต่ละเงื่อนไขจะแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำในแต่ละเงื่อนไข

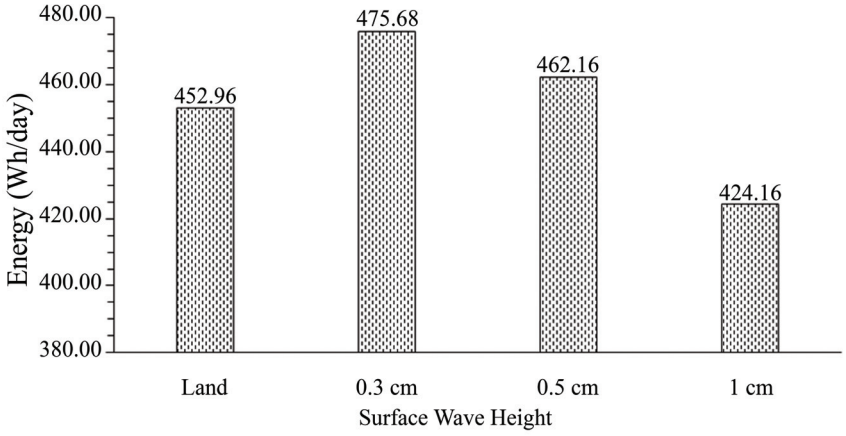
รูปที่ 5 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อติดตั้งตามเงื่อนไขต่าง ๆ จากรูปพบว่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกมีกำลังการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 56.62 วัตต์ และอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 46.05 °C สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำระดับความลึก 1 เซนติเมตร จะมีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 59.46 วัตต์ เมื่อขนาดของคลื่นเท่ากับ 0.3 เซนติเมตร กำลังเฉลี่ยนี้สูงกว่าของแผงที่ติดตั้งบนบกประมาณร้อยละ 5 และมีอุณหภูมิแผงเฉลี่ยลดลงเมื่อเทียบกับการติดตั้งบนบกประมาณ 13.5 °C



รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 6 แสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งตามเงื่อนไขต่าง ๆ จากการวิเคราะห์พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร ที่ความสูงคลื่น 0.3 เซนติเมตร มากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก โดยที่

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำมีความสูงคลื่นผิวน้ำ 0.3 เซนติเมตร มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวันเท่ากับ 475.68 วัตต์ชั่วโมง ซึ่งมีค่ามากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกที่สามารถผลิตได้ 452.96 วัตต์ชั่วโมง



รูปที่ 6 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

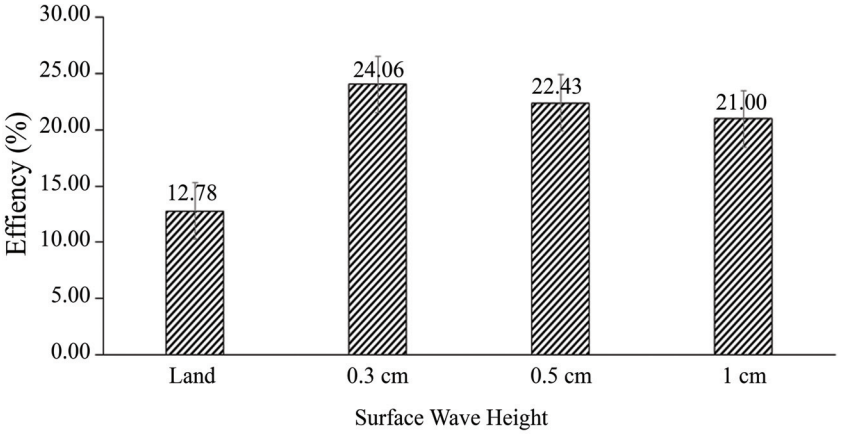
รูปที่ 7 แสดงค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งตามเงื่อนไขต่าง ๆ จากการคำนวณพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำที่มีความสูงคลื่นผิวน้ำเท่ากับ 0.3 เซนติเมตร มีค่าสูงที่สุดโดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 24.06 เปอร์เซ็นต์ และมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เมื่อมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มาตกกระทบบริเวณหน้าแผง โดยความยาวคลื่นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนต้องการในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงประมาณ 350 - 1,100 นาโนเมตร [14] และช่วงความยาวคลื่นอื่นที่น้อยกว่าหรือมากกว่าความยาวคลื่นดังกล่าวที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถนำไปผลิตไฟฟ้าได้แต่จะเปลี่ยนเป็นความร้อนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และส่งผลต่อปริมาณกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ซึ่งหลังจากการทดลองการศึกษาการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำพบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำมีค่าสูงกว่าของแผงที่ติดตั้งบนบก นอกจากนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงที่ติดตั้งใต้น้ำมีค่าสูงกว่าของแผงที่ติดตั้งบนบก แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้บนบกเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีความจำเป็นและไม่มีความจำเป็นในการผลิตไฟฟ้า จึงทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าลดลง ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำจะมีน้ำช่วยดูดซับและสะท้อนค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากผิวน้ำและคลื่นผิวน้ำก่อนตกกระทบหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเป็นเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของแผงที่ติดตั้งใต้น้ำสูงกว่าแผงที่ติดตั้งบนพื้น กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก

ในการทำนายการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายปี ผู้วิจัยจะสร้างเงื่อนไขการทำนายโดยการกำหนดขนาดของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 1 เมกะวัตต์ โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 100 วัตต์ จำนวน 10,000 แผง และทำการทดลองในเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดลองส่วนที่ 1 ทำนายการผลิตไฟฟ้ารายปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกในสมการที่(5) และทำนายการผลิตไฟฟ้ารายปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำที่มีระดับความสูงของคลื่นผิวน้ำ 0.3 เซนติเมตร ได้ในสมการที่ (6) โดยที่ตัวแปรที่สำคัญในการทำนายได้กล่าวไว้ในวิธีการทดลอง

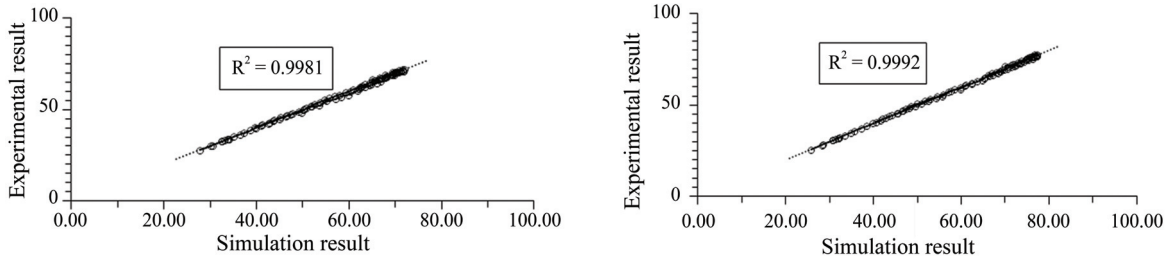
รูปที่ 8 แสดงผลที่ได้จากการใช้สมการทำนายเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นทั้งของแผงที่ติดตั้งบนบก และแผงที่ติดตั้งใต้น้ำที่ความลึก 1 เซนติเมตร

ISSN 2672-9369 (Online)

และมีคลื่นผิวน้ำความสูง 0.3 เซนติเมตร จากรูปพบว่าผลที่ได้จากสมการทำนายมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกอยู่ที่ 0.9981 และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำอยู่ที่ 0.9992 ทั้งนี้สมการที่ใช้ในการทำนายการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวได้กำหนดเงื่อนไขในการใช้สมการให้แม่นยำมากขึ้นคือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการคำนวณจะต้องมากกว่า 300 วัตต์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



(ก) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก (ข) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำ

รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ทำให้ผู้วิจัยตัดสินใจในการนำสมการดังกล่าวมาทำนายการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกและใต้น้ำที่กำลังการติดตั้งขนาด 1 เมกะวัตต์ ผลการทำนายพบว่าพลังงานไฟฟ้ารายเดือนที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำมีค่ามากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำมีผลิตทางพลังงานไฟฟ้าดีกว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนบก พลังงานรวมที่ผลิตได้ตลอดปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำมีค่า 1,732.27 เมกะวัตต์ชั่วโมง และพลังงานที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกตลอดทั้งปีอยู่ที่ 1692.15 เมกะวัตต์ชั่วโมง เมื่อทำการจำหน่ายไฟฟ้าจากการที่เป็นผลผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำในสัญญาแบบ Feed-in Tariff ที่รับซื้อไฟฟ้าในราคาหน่วยละ 5.66 บาท พบว่าในระยะเวลา 1 ปี จะมีรายได้จากการจำหน่ายปีละ 9,804,636.84 บาท/ปี ซึ่งมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกที่มีรายได้ 9,577,577.10 บาท/ปี ผลต่างรายได้จากการผลิตไฟฟ้าทั้งสองแบบมีค่า 227,059.74 บาท/ปี รายละเอียดการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายเดือนดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดการวิเคราะห์การผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปี

เดือน	พลังงานไฟฟ้ารายปี	
	บนบก เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน	ใต้น้ำ เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน
มกราคม	143.04	146.38
กุมภาพันธ์	138.74	143.54
มีนาคม	155.91	161.74
เมษายน	153.69	159.34
พฤษภาคม	134.56	136.87
มิถุนายน	151.16	155.04
กรกฎาคม	151.78	156.13
สิงหาคม	149.68	153.72
กันยายน	138.13	141.07
ตุลาคม	120.04	119.75
พฤศจิกายน	119.62	120.43
ธันวาคม	135.80	138.26
รวม	**1692.15 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี**	**1732.27 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี**
รายได้จากการจำหน่ายไฟ	**9,577,577.10 บาท**	**9,804,636.84 บาท**

สรุปผลและอภิปรายผล

จากการศึกษาคลื่นผิวน้ำที่ส่งผลกระทบต่อสรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใต้น้ำที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร พบว่าคลื่นที่มีความสูง 0.3 เซนติเมตร มีส่วนช่วยในการผลิตไฟฟ้าให้มากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบก โดยที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งใต้น้ำภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวมีผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 59.46 วัตต์ ซึ่งมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกที่ผลิตได้เพียง 56.62 วัตต์ และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองส่วนแรก ไปทำการทำนายการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนบกมีค่า 1,732.27 เมกกะวัตต์ชั่วโมง และพลังงานที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกตลอดทั้งปีอยู่ที่ 1692.15 เมกกะวัตต์ชั่วโมง เมื่อทำการจำหน่ายไฟฟ้าจากการที่เป็นผลผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำในสัญญาแบบ Feed-in Tariff ที่รับซื้อไฟฟ้าในราคาหน่วยละ 5.66 บาท พบว่าในระยะเวลา 1 ปีจะมีรายได้จากการจำหน่ายปีละ 9,804,636.84 บาท/ปี ซึ่งมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนบกที่มีรายได้ 9,577,577.10 บาท/ปี ผลต่างรายได้จากการผลิตไฟฟ้าทั้งสองแบบมีค่า 227,059.74 บาท/ปี

ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยระดับเล็กจึงไม่มีเครื่องมือในการวิเคราะห์การสะท้อนของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ทำได้เพียงอ้างอิงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการสะท้อนของแสงและความยาวคลื่นแสงเพียงเท่านั้น ทั้งนี้งานวิจัยแนวอาจเป็นแนวทางในการต่อยอดความคิดที่จะสร้างงานวิจัยอื่น รวมไปถึงต้นทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ใต้น้ำขนาดใหญ่ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นเพียงต้นแบบทางความคิดที่จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปติดตั้งใต้น้ำเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นกับการผลิตไฟฟ้า จึงไม่อาจประเมินต้นทุนในการติดตั้ง

ISSN 2672-9369 (Online)

โรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ และในส่วนของระยะเวลาในการใช้งานยังไม่สามารถประเมินได้เนื่องมาจากยังเป็นงานวิจัยที่ค่อนข้างใหม่และระยะเวลาในการทำการทดลองไม่เพียงพอ

สำหรับปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผู้วิจัยไม่ได้นำมาวิเคราะห์เนื่องมาจากเกินวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยนี้ และอาจส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใต้น้ำ ได้แก่ ความขุ่นของน้ำในสภาวะแวดล้อมจริง และสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวจำพวกสาหร่ายที่อาจเกิดขึ้นบริเวณหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์หากติดตั้งใต้น้ำเป็นเวลานาน ซึ่งอาจส่งผลต่อการรับแสงและการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนทุนและค่าใช้จ่ายในการศึกษา และขอขอบคุณ “ทุนเรียนดี” ในโครงการทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (SEEU) ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน

References

[1] Wang, M. -H. and Chen, M. -J. (2012). Two-Stage Fault Diagnosis Method Based on the Extension Theory for PV Power Systems. **International Journal of Photoenergy**. Vol. 2012, DOI: 10.1155/2012/892690

[2] Nižetić, S., Čoko, D., Yadav, A., and Grubišić-Čabo, F. (2016). Water Spray Cooling Technique Applied on a Photovoltaic Panel: the PerformanceResponse. **Energy Conversion and Management**. Vol. 108, pp. 287-296. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.079

[3] Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., and El-Sherif, H. (2013). Enhancing the Performance of Photovoltaic Panels by Water Cooling. **Ain Shams Engineering Journal**. Vol. 4, Issue 4, pp. 869-877. DOI: 10.1016/j.asej.2013.03.005

[4] Abdo, S., Saidani-Scott, H., Borges, B., and Abdelrahman, M. A. (2020). Cooling Solar Panels Using Saturated Activated Alumina with Aaline Water: Experimental Study. **Solar Energy**. Vol. 208, pp. 345-356. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.079

[5] Ajitha, A., Kumar, N. M., Jiang, X. X., Reddy, G. R., Jayakumar, A., Praveen, K., and Anil Kumar, T. (2019). Underwater Performance of Thin-Film Photovoltaic Module Immersed in Shallow and Deep Waters Along with Possible Applications. **Results in Physics**. Vol. 15, p. 102768. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102768

[6] Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M., and Scandura, P. F. (2010). Submerged Photovoltaic Solar Panel: SP2. **Renewable Energy**. Vol. 35, Issue 8, pp. 1862-1865. DOI: 10.1016/j.renene.2009.10.023

[7] Pelikán P. and Koutný L. (2016). Hindcast of Wind Driven Wave Heights in Water Reservoirs. **Soil & Water Res**. Vol. 11, pp. 205-211. DOI: 10.17221/105/2015-SWR

[8] Fauzi, R. and Wiryanto, L. (2020). The Effects of Wind on the Generation of Surface Wave in a Shallow Water. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Vol. 618, p. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/618/1/012003

[9] TDETlab. (2019). **Mathematical Modeling Program for Solar Hot Water Production System**. Access (10 December 2021). Available (http://www.tdetlab.com/publication)

[10] Northern Meteorological Center. (2018). **Chiang Mai Climate Statistics**. Access (10 December 2021). Available (http://www.cmmet.tmd.go.th)

[11] Chaichana, C., Kiatsiriroat, T., and Nuntaphan, A. (2010). Comparison of Conventional Flat-Plate Solar Collector and Solar Boosted Heat Pump Using Unglazed Collector for Hot Water Production in Small Slaughterhouse. **Heat Transfer Engineering**. Vol. 31, Issue 5, pp. 419-429. DOI: 10.1080/01457630903375475

[12] Hao, D., Qi, L., Tairab, A. M., Ahmed, A., Azam, A., Luo, D., Pan, Y., Zhang, Z., and Yan, J. (2022). Solar Energy Harvesting Technologies for PV Self-Powered Applications: A Comprehensive Review. **Renewable Energy**. Vol. 188, pp. 678-697. DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.066

[13] Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M., and Scandura, P. F. (2010). Submerged Photovoltaic Solar Panel: SP2. **Renewable Energy**. Vol. 35, Issue 8, pp. 1862-1865. DOI: 10.1016/j.renene.2009.10.023

[14] Zanatta, A. R. (2022). The *Shockley-Queisser* Limit and the Conversion Efficiency of Silicon-Based Solar Cells. **Results in Optics**. Vol. 9, p. 100320. DOI: 10.1016/j.rio.2022.100320

ISSN 2672-9369 (Online)

พฤติกรรมของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนเสริมวัสดุ GFRP
Behavior of Nano Block Retaining Walls Reinforced with GFRP Bars

อัตพล บุบพิ[1] ยงยุทธ ศิริศรีเพ็ชร์[1*] ปราชญ์ อมรภิญโญ[1] ธวัชชัย โทอินทร์[1] ภคพร ยอดศิริ[1] และ พงศกร พวงชมภู[2]

Attaphol Bubpi[1] Yongyuth Sirisriphet[1*] Prach Amornpinyo[1] Tawatchai Tho-In[1] Pakaphorn Yodsiri[1] and Pongsagorn Poungchompu[2]

Received: *October 9, 2022;* ***Revised:*** *December 13, 2022;* ***Accepted:*** *December 13, 2022*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเรื่องพฤติกรรมของกำแพงกันดินอิฐบล๊อคนาโนเสริมวัสดุ GFRP มีการทดสอบตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ตัวอย่างแบบไม่เสริมแรง และตัวอย่างแบบเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร ภายใต้แรงดึง 30 ปอนด์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโน ขนาดความสูง 1.62 เมตร กว้าง 2.00 เมตร หนา 0.20 เมตร การทดลองพบว่า กำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนที่ถูกเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ในแนวราบได้ดีกว่ากำแพงกันดินที่ไม่มีการเสริมแรง ในขณะเดียวกันกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนที่ถูกเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ที่มีขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร ได้ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดเท่ากับ 2.43 3.40 และ 4.37 มิลลิเมตร ตามลำดับ

คำสำคัญ : กำแพงกันดิน; วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว; อิฐบล็อคนาโน

[1] *คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น*
[2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น*
[1] *Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus*
[2] *Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, KhonKaen Campus*
[*] *Corresponding Author, Tel. 08 1769 9559, E - mail: yongyuth.si@rmuti.ac.th*

Abstract

This paper presented the results of 4 types nano block retaining walls. They were divided into non-reinforced and reinforced GFRP with diameters of 6, 9 and 12 mm with tensile strength of 30 lb. Nano block retaining walls with dimensions of 1.62 meters high, 2.00 meters wide, 0.20 meters thickness were used to study their horizontal movement behavior. The results of the experiment showed that nano block retaining walls reinforced with GFRP had better resistance to horizontal movement than non-reinforced retaining walls. At the same time, nano block retaining wall reinforced with GFRP with tensile strength of 30 lb with dimensions of 6, 9 and 12 mm had average maximum values of horizontal displacement of 2.43, 3.40 and 4.37 mm, respectively.

Keywords: Retaining Wall; GFRP; Nano Block

บทนำ

ในปัจจุบันมีการถมที่เพื่อใช้ในการก่อสร้างจำนวนมาก เป็นผลทำให้พื้นที่บริเวณข้างเคียงมีระดับความสูงของดินถมที่ต่างระดับกัน และเนื่องจากราคาที่ดินที่สูงขึ้นในแต่ละปี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างคันดินถมหรือกำแพงกันดินที่สูงและชัน โดยปราศจากความลาดชันด้านข้าง ในการก่อสร้างกำแพงกันดินที่สูงและชันโครงสร้างของกำแพงกันดินจำเป็นต้องมีความสามารถในการต้านทานแรงดันดินทางด้านข้าง ซึ่งนอกจากระดับความสูงที่แตกต่างกันที่มีผลต่อแรงดันดินด้านข้างแล้วชนิดของดินที่อยู่บริเวณโดยรอบกำแพงกันดินหรือแม้แต่ความแข็งแรงของโครงสร้างที่อยู่ใต้กำแพงกันดิน ก็ส่งผลแรงดันดินที่เกิดขึ้น [1] - [4] ดังนั้นกำแพงกันดินมักจะได้รับการออกแบบด้วยการเสริมแรงเพื่อความแข็งแรงของโครงสร้าง ซึ่งในปัจจุบันมีการเลือกใช้วัสดุในการเสริมแรงในกำแพงกันดินที่หลากหลาย [5] - [9]

งานวิจัยนี้มีความสนใจในอิฐบล็อคนาโนซึ่งเป็นวัสดุทางเลือก โดยใช้กระบวนการหล่อแบบเปียก (Wet Process) มีส่วนผสมของซีเมนต์ ทรายหยาบ หินเกล็ด และน้ำ เป็นคอนกรีตเบาที่มีน้ำหนักก้อนละ 5 กิโลกรัม ใช้หลักการของระบบการก่อสร้างแบบโมดูลล่าร์ (Modular Building Method) เพื่อให้การก่อสร้างลดการเสียเศษวัสดุ ทำงานได้รวดเร็วขึ้น ทำหน้าที่เป็นผนัง เสา คานคอดิน เอ็น ได้ในตัวเดียวกัน ซึ่งเป็นผนังรับแรง (Wall Bearing) ทำให้มีความแข็งแรงมากเป็นพิเศษกว่าระบบการก่อสร้างเสา-คาน หาได้ในท้องถิ่นและสามารถก่อสร้างได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ [9] - [10] อีกทั้งอิฐบล็อคนาโนเป็นวัสดุที่เป็นนวัตกรรมใหม่

ด้านการเสริมแรงให้โครงสร้างกำแพงกันดิน [11] ได้ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินอิฐบล็อคโนแบบที่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กสตัด 12 มิลลิเมตร และให้แรงที่ 20 ปอนด์ ได้ผลการเคลื่อนที่ในแนวราบอยู่ที่ 5 มิลลิเมตร ผลการทดลองสรุปได้ว่าการเสริมเหล็กและการยึดโครงสร้างช่วยเพิ่มความมั่นคงของกำแพงกันดินนาโนบล็อคในแง่ของกำลังรับแรงอัดด้านข้าง [12] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงพฤติกรรมของกำแพงกันดินอิฐบล็อคโนแบบที่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กสตัด 12 มิลลิเมตร และแบบมีสมอรั้งโดยให้แรงที่ 10 ปอนด์ ได้ผลการเคลื่อนที่ในแนวราบอยู่ที่ 2.9 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการทดสอบกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นเหล็กเสริมแรงมีสมอรั้ง มีเสถียรภาพมากกว่ารูปแบบอื่น โดยพิจารณาจากการเคลื่อนตัวในแนวราบน้อยที่สุด

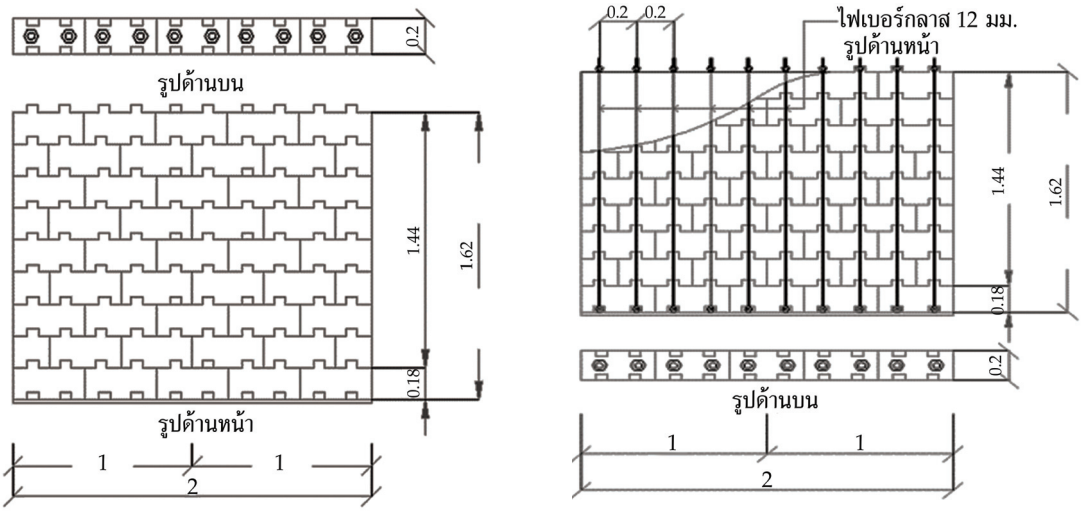
แต่ปัจจุบันมีวัสดุหลากหลายชนิด อาทิเช่น วัสดุ AFRP วัสดุ CFRP และที่ได้รับความนิยมสูง ได้แก่ วัสดุ GFRP เนื่องจากวัสดุ GFRP มีความสามารถในการทนทานต่อแรงกัดกร่อนของคลอไรด์ได้ดี กล่าวคือไม่เป็นสนิม และมีความสามารถในการต้านทางแรงดึงที่สูงกว่าเหล็กเสริม อย่างไรก็ตาม วัสดุ GFRP มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำและพฤติกรรมเปราะกว่าเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีกำลังคราก [13] - [17] ที่ถูกนำมาใช้แทน

ISSN 2672-9369 (Online)

การเสริมเหล็ก เช่น งานคานคอนกรีตเสริมเหล็ก งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก กำแพงรับแรงเฉือน เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วัสดุ GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) มาใช้ในการศึกษาถึงพฤติกรรมเมื่อนำมาเสริมในโครงสร้างกำแพงกันดิน

วิธีดำเนินการวิจัย

การทดสอบนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปทางด้านข้างของกำแพงกันดินก่ออิฐบล็อคนาโนครึ่งแผ่น จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น แบบไม่เสริมแรง ดังรูปที่ 1(ก) และเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ที่มีขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร จำนวน 10 เส้น ซึ่งถูกเสริมด้วยแรงขนาด 30 ปอนด์ (งานวิจัยนี้เลือกใช้แรงขนาด 30 ปอนด์ เนื่องจากการให้แรงที่มีขนาดเกินกว่า 30 ปอนด์ มีผลทำให้โครงสร้างบางส่วนของอิฐบล็อคนาโนเกิดความเสียหาย) เท่ากันและมีการติดตั้งเครื่องวัดแบบละเอียด เพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินทั้งหมด 5 จุด โดยกำแพงกันดินที่ทำการทดสอบมีขนาดความสูง 1.62 เมตร กว้าง 2.00 เมตร หนา 0.20 เมตร ดังรูปที่ 1(ข)



(ก) กำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นไม่เสริมแรง

(ข) กำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นเสริม GFRP

รูปที่ 1 ขนาดของตัวอย่างทดสอบกำแพงกันดินอิฐบล็อกนาโนก่อครึ่งแผ่น

วิธีการทดสอบ

1. ทำการเรียงอิฐแนวตรงชิดกันทุกก้อนจนถึงชั้นสุดท้ายและให้เดือยของอิฐบล็อคนาโนลงช่องพอดีและให้ได้ระดับทุกชั้น (ถ้าเป็นแบบเสริมแรงนั้นจะมีการเตรียมชุดทดสอบและเสริมวัสดุ GFRP จำนวน 10 เส้น) ดังรูปที่ 2

2. ทำการชั่งน้ำหนักทรายและเติมทรายทุกชั้นจะมีหน่วยน้ำหนักเทากับ 1,495 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงชั้นบนสุด

3. ติดตั้ง Hydraulic Jack และ Dial Gauge เพื่อวัดการทรุดตัวของทรายในแนวดิ่ง 2 ตัว ดังรูปที่ 3(ก)

4. ติดตั้ง Dial Gauge วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินจำนวน 5 ตัว ที่ระดับ 0.09 0.45 0.81 1.17 และ 1.53 เมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ตำแหน่งบนสุดของกำแพงเป็น 0.00 เมตร ดังรูปที่ 3(ข)

5. ทำการให้แรงเป็นช่วง ๆ และแต่ละช่วงกำหนดที่การทรุดตัวของทรายถม 1.00 มิลลิเมตร และทำการบันทึกผลการเคลื่อนตัวแนวราบของกำแพงอิฐบล็อคนาโน

6. ทำการทดสอบได้ค่าการทรุดตัวของทรายที่ 25 มิลลิเมตร และทำการบันทึกผลการเคลื่อนตัวแนวราบที่มีค่าสูงสุดของกำแพงอิฐบล็อคนาโน

7. ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง การบันทึกการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดิน เพื่อเป็นข้อมูลแนวโน้มการเคลื่อนตัว เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดิน

รูปที่ 2 วัสดุ GFRP

(ก) กำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโน

(ข) การติดตั้ง Dial Gauge ในแนวราบ

รูปที่ 3 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ มีคุณสมบัติดังนี้

1. **อิฐบล็อคนาโน**

อิฐบล็อคนาโนที่ใช้ศึกษาครั้งนี้มีขนาด กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร และสูง 18 เซนติเมตร มีน้ำหนักต่อก้อน ประมาณ 15 กิโลกรัม เป็นอิฐบล็อคนาโน รุ่นคอนกรีตผนังรับแรง ดังรูปที่ 3

รูปที่ 4 อิฐบล็อคนาโน

2. **วัสดุ GFRP**

วัสดุ GFRP ที่ใช้ในการเสริมแรงในโครงสร้างกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนมีขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 จำนวน 10 เส้น ยาวตลอดแนวความสูงของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโน 1.62 เมตร ดังรูปที่ 2 และที่ปลายทั้งสองข้างถูกขันล็อคด้วยน็อตและเสริมแรงดึงขนาด 30 ปอนด์

3. **ทราย**

ทรายที่ใช้จำลองการถมดิน มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM = 1.78 มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,695 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ISSN 2672-9369 (Online)

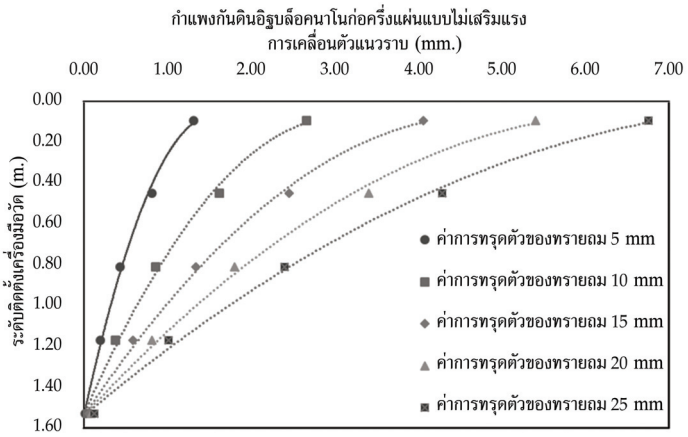
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังดึงของวัสดุ GFRP ที่ใช้ในการทดสอบ

รายการ	ขนาดวัสดุ GFRP		
	6 มิลลิเมตร	9 มิลลิเมตร	12 มิลลิเมตร
พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	0.28	0.63	1.13
แรงเค้นดึงสูงสุด (ksc)	8,409	7,437	6,920
% การยืดตัว	49 %	50 %	52 %

ผลการทดลองและวิจารณ์

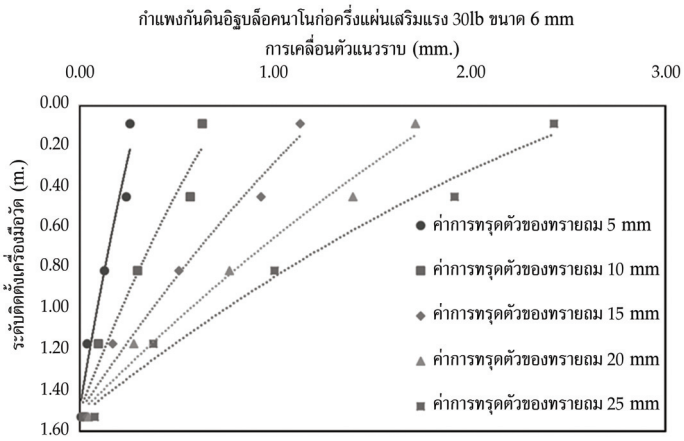
ทำการศึกษาแบบจำลองต้นแบบ (Prototype Model) จนมั่นใจว่าไม่มีข้อผิดพลาดจึงได้นำมาสร้างเป็นชุดทดสอบขนาดใหญ่ (Large Scale) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดันด้านข้างของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบไม่เสริมแรง และแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร ให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟเพื่อหาเส้นแนวโน้มค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดันด้านข้างของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบไม่เสริมแรงและแบบเสริมแรงด้วย GFRP ได้ผลการทดสอบดังนี้

ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบไม่เสริมแรง ซึ่งควบคุมการทรุดตัวของทรายถมที่ 25 มิลลิเมตร วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 6.86 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งบนสุดของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโน จากกราฟพบว่าเส้นแนวโน้มการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนเป็นเส้นโค้ง เส้นแนวโน้มการเคลื่อนตัวในแนวราบมากขึ้นเมื่อค่าการทรุดตัวของทรายสูงขึ้น และลักษณะการเคลื่อนตัวของอิฐบล็อคนาโนแต่ละก้อนเคลื่อนตัวเป็นทั้งแบบอิสระดังรูปที่ 5



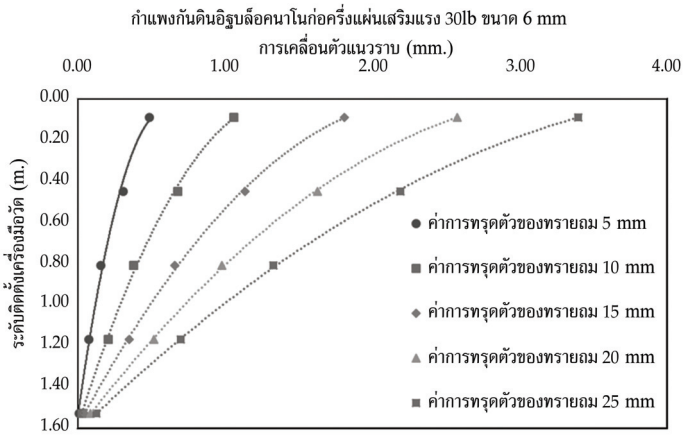
รูปที่ 5 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนแบบไม่เสริมแรง

ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร ให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง ซึ่งควบคุมการทรุดตัวของทรายถมที่ 25 มิลลิเมตร วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าที่สุดเท่ากับ 2.43 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งบนสุดของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเส้นแนวโน้มการเคลื่อนตัวในแนวราบมากขึ้นเมื่อค่าการทรุดตัวของทรายสูงขึ้นและลักษณะการเคลื่อนตัวของอิฐบล็อคนาโนแต่ละก้อนเคลื่อนตัวเป็นทั้งแบบกลุ่มดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร

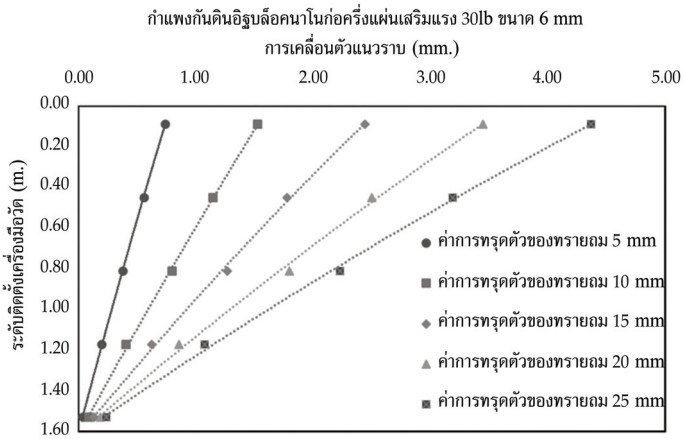
ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร ให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง ซึ่งควบคุมการทรุดตัวของทรายถมที่ 25 มิลลิเมตร วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าที่สุดเท่ากับ 3.40 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งบนสุดของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเส้นแนวโน้มการเคลื่อนตัวในแนวราบมากขึ้นเมื่อค่าการทรุดตัวของทรายสูงขึ้นและลักษณะการเคลื่อนตัวของอิฐบล็อคนาโนแต่ละก้อนเคลื่อนตัวเป็นทั้งแบบกลุ่มดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร

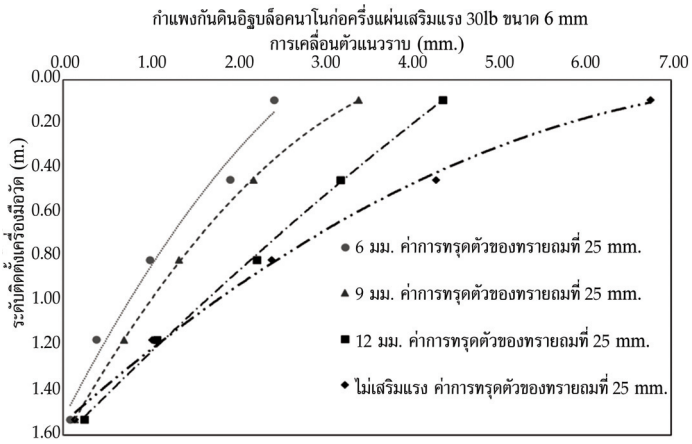
ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร ให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง ซึ่งควบคุมการทรุดตัวของทรายถมที่ 25 มิลลิเมตร วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าที่สุดเท่ากับ 4.37 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งบนสุดของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเส้นแนวโน้มการเคลื่อนตัวในแนวราบมากขึ้นเมื่อค่าการทรุดตัวของทรายสูงขึ้นและลักษณะการเคลื่อนตัวของอิฐบล็อคนาโนแต่ละก้อนเคลื่อนตัวเป็นทั้งแบบกลุ่มดังรูปที่ 8

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 8 กราฟการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร

ผลการเปรียบเทียบทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบไม่เสริมแรงและแบบเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตรให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง ซึ่งควบคุมการทรุดตัวของทรายถมที่ 25 มิลลิเมตร วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.86 2.43 3.40 และ 4.37 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ตำแหน่งบนสุดของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโน ดังรูปที่ 9 จากการทดลองพบว่าเส้นแนวโน้มการเคลื่อนตัวในแนวราบมากขึ้นเมื่อค่าการทรุดตัวของทรายสูงขึ้นและลักษณะการเคลื่อนตัวของอิฐบล็อคนาโนแต่ละก้อนเคลื่อนตัวเป็นทั้งแบบกลุ่ม

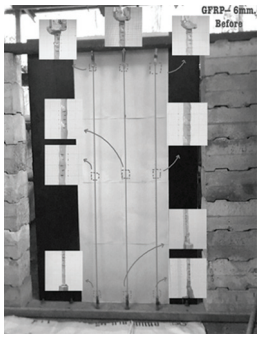


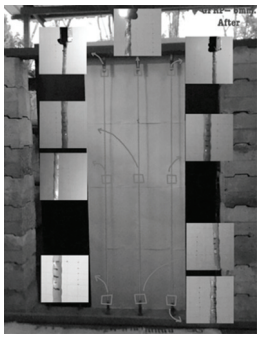
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนแบบก่อครึ่งแผ่นแบบไม่เสริมแรงและแบบเสริมแรงด้วย GFRP ขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่เสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร ให้แรงดึงในวัสดุ GFRP ที่ 30 ปอนด์ พบว่าโครงสร้างกำแพงกันดินแบบอิฐบล็อคนาโนที่เสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะเมื่อพิจารณาจากผลการดึงวัสดุ GFRP ด้วยแรงขนาด 30 ปอนด์ วัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร มีการบิดตัวและมีการตึงตัวเป็นแนวเส้นตรงมากสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าแรงดึงที่ให้เข้าไปในวัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตรนั้นเป็นช่วงแรงที่เหมาะสมต่อพื้นที่หน้าตัด จึงทำให้โครงสร้างที่เสริมแรงวัสดุ GFRP ขนาดดังกล่าวมีความแข็งแกร่งและมีความสามารถต้านทานแรงดันด้านข้างให้กับโครงสร้างกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับขนาด 9 และ 12 มิลลิเมตร ร้อยละของการเคลื่อนตัวที่ต่างจากขนาด 9 และ 12 มิลลิเมตร อยู่ที่ร้อยละ 28.6 และ 44.3

จะเห็นได้ว่าขนาดของวัสดุ GFRP และขนาดของแรงดึงมีผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปทางด้านข้างของกำแพงกันดิน ดังนั้นในการออกแบบ จึงควรคำนึงถึงความเหมาะสมระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ GFRP และขนาดของแรงดึง เพื่อให้เกิดประสิทธภาพสูงสุดในการต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของกำแพงกันดิน

เปรียบเทียบพฤติกรรมก่อนและหลังให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ในวัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร การทดสอบพบว่าก่อนมีการให้แรงในวัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร มีลักษณะตรงและไม่โค้งงอ ดังรูปที่ 10(ก) และเมื่อมีการให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ วัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร เกิดการบิดตัวมากและยืดตัวเป็นเส้นตรงและตึงตัวมากไปพร้อมกัน บริเวณที่เกิดการยืดตัวคือ ส่วนหัวและท้าย ซึ่งเป็นส่วนที่มีการให้แรงโดยตรง วัดระยะการยืดตัวได้ 5 มิลลิเมตร วัสดุ GFRP มีลักษณะยืดตรงตามแนวดิ่งและมีความตึงตัวสูง ดังรูปที่ 10(ข)

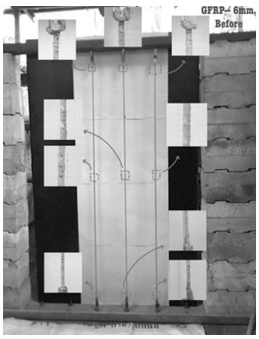


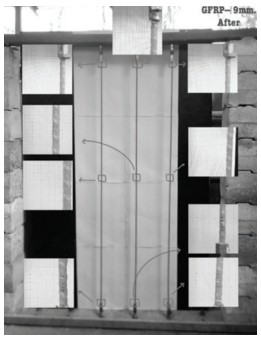


(ก) วัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร ก่อนดึง (ข) วัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร หลังดึง

รูปที่ 10 การเปรียบเทียบพฤติกรรมก่อนและหลังให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ในวัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร

เปรียบเทียบพฤติกรรมก่อนและหลังให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ในวัสดุ GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร การทดสอบพบว่าก่อนมีการให้แรงในวัสดุ GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร มีลักษณะตรงและโค้งงอ ดังรูปที่ 11(ก) และเมื่อมีการให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ วัสดุ GFRP ขนาด 6 มิลลิเมตร เกิดการหมุนบิดและยืดตัวตรงขึ้นจากเดิม บริเวณที่เกิดการยืดตัวคือส่วนกลางของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว วัดระยะการยืดตัวได้ 2 มิลลิเมตร วัสดุ GFRP มีลักษณะยืดตรงตามแนวดิ่งและมีความตึงตัว ดังรูปที่ 11(ข)



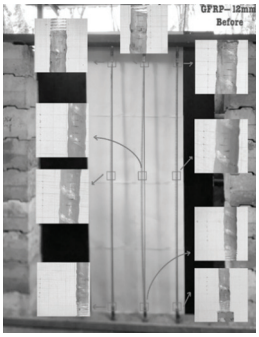


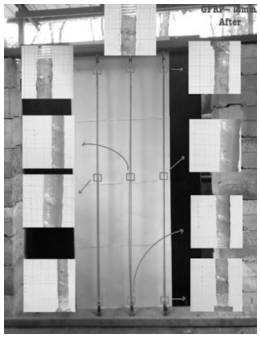
(ก) วัสดุ GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร ก่อนดึง (ข) วัสดุ GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร หลังดึง

รูปที่ 11 การเปรียบเทียบพฤติกรรมก่อนและหลังให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ในวัสดุ GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร

เปรียบเทียบพฤติกรรมก่อนและหลังให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ในวัสดุ GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร การทดสอบพบว่าก่อนมีการให้แรงในวัสดุ GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร มีลักษณะตรงและไม่โค้งงอค่อนข้างมาก ดังรูปที่ 12(ก) และเมื่อมีการให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ วัสดุ GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร เกิดการหมุนบิดและไม่มีการยืดตัวยังคงโค้งงออยู่ ดังรูปที่ 12(ข)

ISSN 2672-9369 (Online)





(ก) วัสดุ GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร ก่อนดึง (ข) วัสดุ GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร หลังดึง

รูปที่ 12 การเปรียบเทียบพฤติกรรมก่อนและหลังให้แรงดึงขนาด 30 ปอนด์ ในวัสดุ GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความแข็งแกร่งของโครงสร้างกำแพงกันดินแบบอิฐบล็อคนาโนที่เสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีความแข็งแกร่งมากกว่าแบบอิฐบล็อกนาโนที่ไม่มีการเสริมแรง เห็นได้จากร้อยละของการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ลดลง เมื่อเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร และให้แรงที่ 30 ปอนด์ มีค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่เสริมแรงอยู่ที่ร้อยละ 64.6 50.5 และ 36.3 ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าผลของการเสริม GFRP 6 มิลลิเมตร มีค่าการเคลื่อนตัวน้อยกว่า แสดงให้เห็นถึงความแข็งแกร่งของวัสดุ

สรุปและอภิปรายผล

ผลการทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนแบบก่อครึ่งแผ่นแบบไม่เสริมแรงได้ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดเท่ากับ 6.86 มิลลิเมตร และผลการทดสอบการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนก่อครึ่งแผ่นแบบเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP ภายใต้แรงดึง 30 ปอนด์ ที่มีขนาด 6 9 และ 12 มิลลิเมตร ได้ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดเท่ากับ 2.43 3.40 และ 4.37 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อนำวัสดุ GFRP มาเสริมแรงในโครงสร้างกำแพงกันดินอิฐบล็อคนาโนทำให้โครงสร้างสามารถต้านทานการเสียรูปในแนวราบได้ดีขึ้น จะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของกำแพงกันดินในแนวราบลดลง อีกทั้งวัสดุ GFRP ยังมีคุณสมบัติในการทนทานต่อการกัดกร่อนของคลอไรด์ ไม่เป็นสนิม และมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าเหล็ก ดังนั้นผู้วิจัยคิดว่าวัสดุ GFRP อาจเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจในงานโครงสร้างกำแพงกันดินในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

References

[1] Bubpi, A., Amornpinyo, P., and Teerawong, J. (2022). Comparison of Retaining Walls from Half-Panel Interlocking Bricks with Dry Joints Reinforced with GFRP Material and Stud Steel. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 15, No. 2, pp. 107-117

[2] Prongmanee, N. and Noulmanee, A. (2020). Properties of Chiang Khruea Lateritic Soil and Their Applications in Civil Engineering. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 13, No. 3, pp. 14-30

[3] Rahmaninezhad, S. M. and Han, J. (2021). Lateral Facing Deflections of Geosynthetic-Reinforced Retaining Walls Under Footing Loading. **Transportation Geotechnics**. Vol. 30, p. 100594. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100594

[4] Gao, J., Liu, L., Zhang, Y., and Xie, X. (2022). Deformation Mechanism and Soil Evolution Analysis Based on Different Types Geogrid Reinforced Foundation. **Construction and Building Materials**. Vol. 331, p. 127322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127322

[5] Li, L. H., Yu, C. D., Xiao, H. L., Feng, W. Q., Ma, Q., and Yin, J. H. (2020). Experimental Study on the Reinforced Fly Ash and Sand Retaining Wall Under Static Load. **Construction and Building Materials**. Vol. 248, p. 118678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118678

[6] Arefnia, A., Dehghanbanadaki, A., and Kassim, K. A. (2021). Sustainable Implementation of Recycled Tire-Derived Aggregate as a Lightweight Backfill for Retaining Walls. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 25, No. 11, pp. 4196-4206. DOI: 10.1007/s12205-021-0218-3

[7] Wang, J. Q., Zhang, L. L., Tang, Y., and Huang, S. B. (2021). Influence of Reinforcement-Arrangements on Dynamic Response of Geogrid-Reinforced Foundation Under Repeated Loading. **Construction and Building Materials**. Vol. 274, p. 122093. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122093

[8] Liu, S., Fan, K., and Xu, Si. (2021). Field Study of a Retaining Wall Constructed with Clay-Filled Soilbags. **Geotextiles and Geomembranes**. Vol. 47, Issue 1, pp. 87-94. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2018.11.001

[9] Villemus, B., Morel, J. C., and Boutin, C. (2007). Experimental Assessment of Dry Stone Retaining Wall Stability on a Rigid Foundation. **Engineering Structures**. Vol. 29, Issue 9, pp. 2124-2132. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.11.007

[10] Colas, A. S., Garnier, D., and Morel, J. C. (2013). Yield Design Modelling of Dry Joint Retaining Structures. **Construction and Building Materials**. Vol. 41, pp. 912-917

[11] Tanakrit, B., Attaphol, B., Sorasak, S., and Pongsagorn, P. (2017). Strength and Behaviors of Dry-Joint Retaining Nano-Block. In **Proceedings of the 22 National Convention on Civil Engineering**. pp. 338-345

[12] Pongsagorn, P., Tanakrit, B., and Attaphol, B. (2019). Study on Behavior of Retaining Wall Nanotube Blocks with Anchor. **International Journal of Geomate**. Vol. 16, No. 54, pp. 42-48

[13] Nanni, A. (2003). North American Design Guidelines for Concrete Reinforcement and Strengthening Using FRP: Principles, Applications and Unresolved Issues. **Construction and Building Materials**. Vol. 17, Issue 6-7, pp. 439-446. DOI: 10.1016/S0950-0618(03)00042-4

[14] Hamzeh, L., Hassanein, A., and Galal, K. (2020). Numerical Study on the Seismic Response of GFRP and Steel Reinforced Masonry Shear Walls with Boundary Elements. **Structures**. Vol. 28, pp. 1946-1964

[15] Ceroni, F., Cuzzilla, R., and Pecce, M. (2016). Assessment of Performance of Steel and GFRP Bars as Injected Anchors in Masonry Walls. **Construction and Building Materials**. Vol. 123, pp. 78-98. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.124

ISSN 2672-9369 (Online)

[16] Ketkan, W. and Khamphala, A. (2010). A Model of Maximum Pullout Force of Bearing Reinforcement Stabilized on Compacted Sandy Soil. **RMUTI JOURNAL**. Vol. 3, No. 1, pp. 1-9

[17] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI JOURNAL**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30

ผลของชนิดสมุนไพรต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของชากระวานผสมสมุนไพร

Effect of Herbal Species on Antioxidant Activities and Sensory Quality of Cardamom (*Amomum krervanh* Pierre) Mixed Herbs Tea

วาสนา รัตนเหมบุตร[1] รุ่งโรจน์ ตับกลาง[1] กรรณิการ์ เจริญสุข[1] และวรัญญา โนนม่วง[1*]

Wassana Rattanahemboot[1] Rungroj Tubglang[1] Kannikar Charoensuk[1] and Warunya Nonmuang[1*]

Received: *June 28, 2022;* ***Revised:*** *September 2, 2022;* ***Accepted:*** *September 3, 2022*

บทคัดย่อ

ผู้บริโภคนิยมบริโภคชาสมุนไพรเพื่อต้องการฤทธิ์ทางยา และต้องการสัมผัสกลิ่นหอมและรสชาติที่ดีจากสมุนไพรชนิดนั้น ๆ ด้วย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดสมุนไพรที่มีต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของชากระวานผสมสมุนไพร ในการทดลองนี้มีการผลิตชา 4 ชนิด ได้แก่ ชากระวาน ชากระวานตะไคร้ ชากระวานใบเตย และชากระวานชะเอมเทศ โดยชากระวานเตรียมได้จากผงใบกระวานผสมกับผงลำต้นกระวาน อัตราส่วน 1:1 และใช้สำหรับเป็นส่วนผสมในการผลิต ชากระวานผสมใบเตย ตะไคร้หรือชะเอมเทศ ในอัตราส่วน 1:1 นำซองชามาแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 ^{o}C 3 นาที แล้วนำน้ำชามาตรวจสอบพบว่าการผสมตะไคร้ ใบเตย หรือชะเอมเทศกับกระวาน ส่งผลให้สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของชากระวานผสมสมุนไพรลดลงที่น่าสนใจพบว่าชากระวานใบเตยได้รับคะแนนกลิ่น และความชอบโดยรวมสูงสุดในระดับชอบมากคือ 8.2 และ 8.2 คะแนน ดังนั้นใบเตยจึงเป็นสมุนไพรที่ควรนำมาใช้ร่วมกับกระวานในการผลิตชากระวาน โดยยังต้องพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมที่มีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

คำสำคัญ : ชากระวานผสมสมุนไพร; ฟลาโวนอยด์; สารประกอบฟีนอล; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

[1] *คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี*

[1] *Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi campus*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 6460 6716, E - mail: warunya_no@rmutto.ac.th*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

Consumers who prefer to consume herbal tea need medicinal effects and also want to experience the aroma and good taste of that herbs. This research was aimed to study the effects of herbs on the antioxidant activities and sensory quality of cardamom mixed herbs tea. In this experiment, four types of tea were produced namely cardamom tea, lemongrass cardamom tea, pandan cardamom tea and licorice cardamom tea. Cardamom tea is prepared from the cardamom leaf powder mixed with cardamom stem powder in a ratio of 1:1, and used as an ingredient in the production of lemongrass cardamom tea, pandan cardamom tea and licorice cardamom tea in the ration of each herb is 1:1. When soaked the tea sachet in hot water at 90 °C for 3 min, then the herbal tea was determined. It was found that, the combination of lemongrass, pandan and licorice with cardamom has resulted in a decrease of total phenolic and total flavonoid compounds, and also the antioxidant effects. Interestingly, pandan cardamom tea was found to have the highest of odor and overall preference rating on the like very much level which was 8.2 and 8.2, respectively. Therefore, pandan is a herb that could be combine with the cardamom in the production of cardamom tea, however the optimum ratio of the combination which related to the antioxidant activities should be concern.

Keywords: Cardamom Mixed Herbs Tea; Flavonoids; Phenolic Compounds; Antioxidant Activities

บทนำ

ปัจจุบันผู้คนจำนวนมากต่างให้ความสำคัญกับการดูแลรักษาสุขภาพโดยมุ่งเน้นไปที่การป้องกันโรค ทั้งนี้การเกิดโรคต่าง ๆ มักมีสาเหตุมาจากสารที่เรียกว่า อนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระคือ โมเลกุลที่มีอิเล็คตรอนเดี่ยวหรืออิเล็คตรอนที่ไม่มีคู่อยู่วงนอกสุดของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลนี้มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อสารอื่นโดยสามารถเข้าไปทำลายเซลล์ เนื้อเยื่อและร่างกายของมนุษย์ มีผลทำให้เกิดความเสื่อมและโรคต่าง ๆ [1] – [2] ขณะที่สารต้านอนุมูลอิสระ คือ สารที่สามารถชะลอ ป้องกันหรือกำจัดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จะเกิดขึ้นกับสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ [3] ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจึงเป็นกลุ่มสารที่สามารถป้องกันหรือทำลายอนุมูลอิสระได้ ซึ่งสามารถพบได้ทั้งในอาหาร เครื่องดื่มบางชนิด และสมุนไพรต่าง ๆ เช่น กระวาน ขิง ข่า ตะไคร้ ใบเตย ดอกอัญชัน สะระแหน่ เป็นต้น [4] – [5]

กระวาน (Cardamom) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Amomum krervanh* Pierre กระวานไทยได้รับการยกย่องว่าเป็นกระวานที่ดีที่สุดในโลก เพราะมีกลิ่นหอมและรสชาติดีกว่ากระวานจากแหล่งอื่น โดยเฉพาะบริเวณเทือกเขาสอยดาว จังหวัดจันทบุรี ทำให้กระวานไทยเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศมาก กลิ่นหอมของกระวานมาจากน้ำมันหอมระเหย ซึ่งประกอบด้วย การบูร (Camphor) ไพนิน (Pinene) ไลโมนีน (Limonene) และเมอร์ซีน (Myrcene) [6] สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในกระวานคือ ฟลาโวนอยด์และวิตามินซีโดยในส่วนเหง้ามีปริมาณ 324.51 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนใบมีปริมาณ 129.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 19.22 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ [5] การใช้ประโยชน์ของกระวาน มีการนำมาใช้ทั้งในการประกอบอาหารและทางยา โดยนำผลกระวานที่แก่จัดไปตากแห้ง เพื่อใช้เป็นเครื่องเทศ ใส่ในน้ำพริกแกงเผ็ด แกงมัสมั่น ใช้แต่งกลิ่นและสีของอาหารหลายชนิด เช่น ใส่ในเหล้า ขนมปัง เค้ก คุกกี้ แฮม ผลอ่อน ลำต้นอ่อนและหน่ออ่อนของกระวานนำมารับประทานแบบผัก ส่วนของหน่ออ่อนมีรสชาติเผ็ดปร่าและมีกลิ่นหอมเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว นิยมนำมาใส่ผัดพริกแกง แกงป่า ต้มยำ ต้มส้ม สำหรับประโยชน์ทางยา รากใช้ ผสมในยาฟอกเลือด แก้ลม รักษาโรครำมะนาด รากและหน่อใช้ขับพยาธิ เปลือกใช้แก้ไข้ และโรคผิวหนังต่าง ๆ ใบแก้คลื่น เหียน วิงเวียน

ดอกใช้รักษาอาการเจ็บฝ่าเท้า และผลใช้ผสมในยาธาตุ ยาขับลม ยาหอมแก้ลม ยาขับเสมหะ และยาช่วยเจริญอาหาร ด้วยคุณสมบัติของกระวานดังกล่าว ต่อมาจึงมีการนำกระวานมาผลิตเป็นชาสมุนไพร โดยผลิตจากส่วนของผลกระวานที่แก่จัด ใบและเหง้า และมีการใช้ชะเอมเทศผสมกับกระวานเพื่อช่วยให้มีรสหวาน ชุ่มคอ ขับเสมหะ แก้ไอ [7] จากการศึกษาของ [8] ได้พัฒนาชาเปลือกกล้วยเสริมสมุนไพร 3 ชนิด คือ ตะไคร้ เก็กฮวย และใบเตยหอม พบว่าผู้บริโภคยอมรับชาเปลือกกล้วยเสริมกลิ่นสมุนไพรตะไคร้สูงที่สุด (ด้านสี 5.80±0.997 คะแนน ด้านกลิ่น 5.97±0.964 คะแนน ด้านรสชาติ 5.93±1.081 คะแนน ด้านเนื้อสัมผัส 5.87±1.074 คะแนน และความชอบโดยรวม 6.13±1.008 คะแนน) งานวิจัยของ [9] ศึกษาผลของตำแหน่งใบมะม่วงหาวมะนาวโห่ (ใบอ่อน ใบเพสลาด และใบแก่) และวิธีการทำชา (ชาเขียว ชาจีน และชาดำ) ต่อสี (CIE L* a* b*) ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของใบชามะม่วงหาวมะนาวโห่ พบว่าชาที่ทำจากใบอ่อนมีค่าความสว่าง (L*) และความเป็นสีเหลือง (b*) ต่ำกว่าแต่มีค่าความเป็นสีแดงสูงกว่าชาอื่น ๆ ชาใบอ่อนที่ถูกคั่วโดยไม่ผ่านการลวกและทำแห้งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระต่ำที่สุด ในขณะที่ชาจากใบแก่ที่ใช้วิธีการทำแบบชาดำมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการรีดิวซ์กรดเฟอริกสูงที่สุด งานวิจัยของ [10] ศึกษาผลของระยะเวลาในการชงชากับคุณภาพทางกายภาพ เคมี กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของชาเจียวกู่หลาน โดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C และระยะเวลาในการชงชาที่ 3 5 7 และ 9 นาที พบว่า ค่าความสว่าง (L*) ค่าสีเขียว (a*) ค่าสีเหลือง (b*) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดของน้ำชามีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการชงชา ปริมาณกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดทาร์ทาริกมีค่าคงที่ กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (IC50) มีค่า 3.01 ppm เมื่อใช้ระยะเวลาในการชงชา 9 นาที ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำชาตามวิธี Hedonic Scale 1 - 5 คะแนน ที่ระยะเวลา 9 นาที มีค่าของสีน้ำชา รสชาติ กลิ่น และค่ายอมรับโดยรวม คือ 4.00 2.18 4.00 และ 4.18 คะแนน ตามลำดับ จากการทบทวนวรรณกรรมทำให้สนใจผลิตชาจากสมุนไพร 4 ชนิด คือ กระวาน ตะไคร้ ใบเตยและชะเอมเทศ ทุกส่วนของต้นกระวานมีสารต้านอนุมูลอิสระเป็นองค์ประกอบอยู่ [5] สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้กระวานจากส่วนของลำต้นอ่อนและใบ ซึ่งส่วนลำต้นอ่อนมีสีขาวและให้กลิ่นรสเฉพาะของกระวานอ่อน ๆ ชวนดื่มกว่าส่วนหน่ออ่อนหรือเหง้าที่จะมีรสเผ็ดปร่า ส่วนของใบกระวานมีสีเขียวที่จะช่วยให้ชามีสีสัน ตะไคร้และใบเตยเป็นสมุนไพรที่มีกลิ่นหอมเฉพาะตัวและชะเอมเทศมีรสหวานช่วยให้ชุ่มคอ โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของชนิดสมุนไพรที่มีต่อปริมาณสารสำคัญที่มักพบในชาสมุนไพร คือ สารประกอบฟีนอลและฟลาโวนอยด์รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชากระวานผสมสมุนไพร ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะทำให้ทราบปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของชากระวานเมื่อมีการทดแทนกระวานด้วยสมุนไพรชนิดต่าง ๆ และสามารถทราบชนิดของสมุนไพรที่เหมาะสมในการนำมาใช้ร่วมกับกระวานเพื่อผลิตชาสมุนไพรที่ผู้บริโภคให้การยอมรับต่อไปได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. **วัตถุดิบ**

กระวาน ตะไคร้ และใบเตย นำมาจากอำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี และผงชะเอมเทศจากร้านขายยากิมหยูโอสถ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี

2. **การผลิตชากระวาน**

ในการทดลองนี้ได้ทำการผลิตชา 4 ชนิด คือ ชากระวาน (ไม่ผสมสมุนไพร) ชากระวานตะไคร้ ชากระวานใบเตยและชากระวานชะเอมเทศ มีขั้นตอนดังนี้

2.1 ผลิตผงกระวานโดยนำส่วนใบและลำต้นของกระวาน มาล้างทำความสะอาด คัดใบและลำต้นที่ไม่มีคุณภาพออก เช่น ใบมีสีเหลือง ต้นที่เป็นโรคหรือมีสิ่งแปลกปลอม จากนั้นหั่นใบ (รูปที่ 1(ก)) ตามขวางให้เป็นเส้นขนาด 2 มิลลิเมตร สำหรับส่วนลำต้นให้ลอกเอาส่วนลำต้นแข็งออกนำส่วนลำต้นอ่อน (รูปที่ 1(ข)) มาหั่นในแนวเฉียงขนาด 2 มิลลิเมตร นำมาคั่วในกระทะที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C นาน 30 นาที จนได้สีเข้มและ

ISSN 2672-9369 (Online)

แห้งกรอบ เพื่อให้ชามีกลิ่นหอม นำไปอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 2 ชั่วโมง [8] จนได้ค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก [11] นำไปปั่นให้เป็นผงด้วยเครื่องปั่นเอนกประสงค์ แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนแบบแยกขนาด จะได้ผงกระวานจากส่วนใบและลำต้น

2.2 ผลิตผงตะไคร้ และผงใบเตย โดยใช้วิธีการเดียวกับการผลิตผงกระวานในข้อ 2.1 สำหรับตะไคร้หั่นแบบเดียวกับลำต้นอ่อนกระวาน และใบเตยหั่นแบบเดียวกับใบกระวาน

2.3 นำผงใบกระวาน ผงลำต้นกระวาน ผงตะไคร้ ผงใบเตยและผงชะเอมเทศ มาบรรจุในซองเยื่อกระดาษ ปริมาณซองละ 2 กรัม โดยใช้อัตราส่วนดังตารางที่ 1

2.4 นำผลิตภัณฑ์ชากระวานผสมสมุนไพรทั้ง 4 สิ่งทดลอง ที่บรรจุในซองเยื่อกระดาษไปอบอีกครั้งเพื่อฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 10 นาที [8] และเก็บรักษาไว้ในถุงพลาสติกซิปล็อค

(ก) ใบกระวาน

(ข) ลำต้นอ่อนกระวาน

รูปที่ 1 ส่วนใบและลำต้นของกระวาน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของผงสมุนไพรที่ใช้ในการผลิตชากระวานผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	ส่วนผสม	อัตราส่วน
ชากระวาน	ผงใบกระวาน : ผงลำต้นกระวาน	1 : 1
ชากระวานตะไคร้	ผงใบกระวาน : ผงลำต้นกระวาน : ผงตะไคร้	0.5 : 0.5 : 1
ชากระวานใบเตย	ผงใบกระวาน : ผงลำต้นกระวาน : ผงใบเตย	0.5 : 0.5 : 1
ชากระวานชะเอมเทศ	ผงใบกระวาน : ผงลำต้นกระวาน : ผงชะเอมเทศ	0.5 : 0.5 : 1

3. การตรวจสอบคุณภาพชากระวานผสมสมุนไพร

เตรียมน้ำชากระวานผสมสมุนไพรโดยต้มน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C จากนั้นเทน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร ลงในถ้วยชาที่มีซองเยื่อกระดาษบรรจุชา 1 ซอง (2 กรัม) จับเวลานาน 3 นาที โดยเขย่าถุงชา 10 ครั้ง ทุก ๆ 1 นาที และนำถุงชาออกจากน้ำชา นำน้ำชามาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพดังนี้

3.1 การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากน้ำชา

ทำโดยการดัดแปลงวิธีการของ [12] เริ่มจากปิเปตตัวอย่างน้ำชา 10 มิลลิลิตร แล้วนำมาปั่นผสมกับเอทธานอล 95 % 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เก็บใส่ขวดที่ปิดด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์เพื่อนำไปทดสอบต่อไป

3.2 วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด

ทำโดยการดัดแปลงวิธีการของ [12] วิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu โดยปิเปตสารสกัดใสที่ได้ 0.25 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองเติมน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร เติมสาร Folin-Ciocalteu's Phenol 0.25 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 7 % อีก 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร โดยใช้เอทธานอล 95 %

เป็นแบลงค์ (Blank) และใช้กรดแกลลิกที่ความเข้มข้น 50 100 200 300 400 และ 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นสารละลายมาตรฐาน ทำการทดลองเช่นเดียวกับสารสกัดตัวอย่างข้างต้น โดยเปลี่ยนจากสารสกัดตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกและนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด โดยรายงานผลในหน่วยของมิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อตัวอย่างน้ำชา 1 มิลลิลิตร

3.3 วิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

ทำโดยการดัดแปลงวิธีการของ [13] ปิเปตสารสกัดใส 0.3 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมเอธานอล 95 % 1.7 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ 10 % 0.1 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมอะซิเตท 1 M 0.1 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 2.8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 415 นาโนเมตร โดยใช้เอธานอล 95 % เป็นแบลงค์ และใช้เควอซิทินความเข้มข้น 20 40 60 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรเป็นสารมาตรฐาน ทำการทดลองเช่นเดียวกับสารสกัดตัวอย่างข้างต้น โดยเปลี่ยนจากสารสกัดตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานเควอซิทินและนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อคำนวณหาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด โดยรายงานผลในหน่วยของมิลลิกรัมของเควอซิทินต่อตัวอย่างน้ำชา 1 มิลลิลิตร

3.4 วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH

ทำโดยการดัดแปลงวิธีการของ [14] ปิเปตสารสกัดใส 1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง เติมสารละลาย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) 0.1 mM ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงทันทีที่ความยาวคลื่น 516 นาโนเมตร สำหรับหลอดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับสารสกัดตัวอย่าง โดยเปลี่ยนจากสารสกัดตัวอย่างเป็นเอธานอล 95 % ส่วนหลอดแบลงค์ใช้เอธานอล 95 % คำนวณหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากสมการดังนี้

$$\text{ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)} = [1 - (\text{A sample} / \text{A control})] \times 100$$

เมื่อ

A sample คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลอดตัวอย่าง
A control คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลอดควบคุม

3.5 การตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส นำน้ำชามาทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสทางด้านสี กลิ่น รส และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้บริโภคที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale โดยให้ 1 เป็นคะแนนความไม่ชอบมากที่สุด และ 9 เป็นคะแนนความชอบมากที่สุด

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และวางแผนแบบสุ่มในบล็อคสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCBD) สำหรับการตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncan' s New Multiple Range Test (DMRT)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. สารประกอบฟีนอลทั้งหมด

สารประกอบฟีนอลเป็นสารกลุ่มสำคัญซึ่งมีสมบัติการต้านออกซิเดชัน พบในพืชหลากหลายชนิด บางชนิดมีสมบัติการต้านออกซิเดชันสูง บางชนิดมีสมบัติการต้านออกซิเดชันต่ำ หรือบางชนิดไม่มีสมบัติ

ISSN 2672-9369 (Online)

การต้านออกซิเดชันแต่ออกฤทธิ์ทางชีววิทยาในด้านอื่น ๆ [15] - [16] จากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์น้ำชากระวานมีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 135.20 ไมโครกรัมของกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตรของตัวอย่าง (ตารางที่ 2) การผสมผงตะไคร้ ผงใบเตยและผงชะเอมเทศโดยการทดแทนผงกระวานร้อยละ 50 ทำให้น้ำชามีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดลดลงเป็น 113.01 118.58 และ 103.65 ไมโครกรัมของกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตรของตัวอย่าง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามน้ำชาทุกสิ่งทดลองมีปริมาณฟีนอลทั้งหมดมากกว่าที่ตรวจพบในชาฝาง (82.64 ไมโครกรัมของกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตรของตัวอย่าง) ที่ชงโดยใช้ชาฝาง 3 กรัมแช่ในน้ำเดือดนาน 10 นาที [17]

ตารางที่ 2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของผลิตภัณฑ์น้ำชากระวานผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	สารประกอบฟีนอลทั้งหมด (ไมโครกรัมของกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตรของตัวอย่าง)
น้ำชากระวาน	135.20±1.17[a]
น้ำชากระวานตะไคร้	113.01±0.45[c]
น้ำชากระวานใบเตย	118.58±2.59[b]
น้ำชากระวานชะเอมเทศ	103.65±1.17[d]

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$)

2. **ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด**

ฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิก ซึ่งมีสมบัติในการต้านออกซิเดชันที่ดี เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอยด์สามารถให้อิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่มีความคงตัวมากขึ้น จึงช่วยยับยั้งหรือชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ [18] จากการหาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดพบว่าให้ผลทำนองเดียวกับการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด คือ น้ำชากระวานมีปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 245.74 ไมโครกรัมของเควอซิทินต่อมิลลิลิตรของตัวอย่าง (ตารางที่ 3) การผสมผงตะไคร้ ผงใบเตยและผงชะเอมเทศโดยการทดแทนผงกระวานร้อยละ 50 ทำให้น้ำชามีปริมาณฟลาโวนอยด์ลดลงเป็น 137.57 161.73 และ 96.44 ไมโครกรัมของเควอซิทินต่อมิลลิลิตรของตัวอย่าง ตามลำดับ ทั้งนี้น้ำชาทุกสิ่งทดลองมีปริมาณฟลาโวนอยด์น้อยกว่าเครื่องดื่มเหง้ากระวานผสมเครื่องเทศที่พบฟลาโวนอยด์สูงถึง 830 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร [19]

ตารางที่ 3 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์น้ำชากระวานผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (ไมโครกรัมของเควอซิทิน/มิลลิลิตรของตัวอย่าง)
น้ำชากระวาน	245.74±4.09[a]
น้ำชากระวานตะไคร้	137.57±7.63[c]
น้ำชากระวานใบเตย	161.73±6.61[b]
น้ำชากระวานชะเอมเทศ	96.44±2.50[d]

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$)

จากผลการทดลองพบว่าการผลิตชากระวานผสมสมุนไพรโดยการลดปริมาณผงกระวานลงไปร้อยละ 50 แล้วผสมผงตะไคร้ ผงใบเตยหรือผงชะเอมเทศลงไปทดแทน ทำให้ได้น้ำชาที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดลดลง อาจเนื่องมาจากสมุนไพรที่นำมาผสมกับกระวานนั้นมีปริมาณสารทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวน้อยกว่ากระวาน เมื่อนำมาทดแทนกระวานจึงส่งผลให้ชากระวานผสมสมุนไพรมีสารทั้งสองชนิดลดลงด้วย โดย [5] พบว่ากระวานมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอยู่ทั้งในส่วนของใบ ลำต้น และเหง้า โดยส่วนใบกระวานมีฟลาโวนอยด์สูงถึง 130 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารสกัด นอกจากนี้ [4] พบว่าตะไคร้มีสารสำคัญน้อยกว่าใบเตย โดยตะไคร้และใบเตยมีฟลาโวนอยด์ 0.14 และ 0.78 มิลลิกรัมของเควอซิทินต่อกรัมของตัวอย่างและมีสารประกอบฟีนอล 0.68 และ 1.80 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมของตัวอย่าง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้ที่พบว่าน้ำชากระวานที่เติมผงตะไคร้ทดแทนผงกระวานมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์และฟีนอลน้อยกว่าน้ำชากระวานที่มีการเติมผงใบเตยทดแทนผงกระวาน

3. **ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ**

การหาค่าร้อยละของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH นั้น ใช้ 2,2-diphenyl-l-picrylhydrazyl (DPPH) เป็นรีเอเจนท์ซึ่งเป็นอนุมูลที่เสถียร ละลายในตัวทำละลายเอทานอล กลไกการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของสารต้านอนุมูลอิสระนั้นเกิดจากการให้อิเล็กตรอนอิสระแก่อนุมูล DPPH ทำให้สารละลาย DPPH เปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลืองและจะไม่เป็นอนุมูลอิสระอีกต่อไป [20] จากตารางที่ 4 พบว่า น้ำชากระวานมีค่าร้อยละของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดเท่ากับ 87.13 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับน้ำชากระวานตะไคร้ น้ำชากระวานใบเตย และน้ำชากระวานชะเอมเทศ ซึ่งมีค่าร้อยละของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 80.46 84.80 และ 74.73 ตามลำดับ จากงานวิจัยของ [21] รายงานไว้ว่าฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระจะแปรผันตามปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่พบในพืช เมื่อสารสกัดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลและฟลาโวนอยด์สูงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระก็จะสูงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้จึงกล่าวได้ว่าน้ำชากระวานมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดสอดคล้องกับปริมาณฟีนอลและฟลาโวนอยด์ที่พบในปริมาณสูง โดยผงสมุนไพรที่นำมาทดแทนผงกระวานแล้วทำให้ได้น้ำชากระวานผสมสมุนไพรที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด คือ ใบเตย นอกจากนี้ผลการทดลองยังเป็นไปในทางเดียวกับ [22] ที่พบว่าสารสกัดจากใบกระถินซึ่งพบสารฟลาโวนอยด์ในปริมาณมากมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์น้ำชากระวานผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)
น้ำชากระวาน	87.13 ± 0.05^{a}
น้ำชากระวานตะไคร้	80.46 ± 0.23^{c}
น้ำชากระวานใบเตย	84.80 ± 0.20^{b}
น้ำชากระวานชะเอมเทศ	74.73 ± 0.25^{d}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$)

4. **การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส**

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของน้ำชากระวานผสมสมุนไพรทั้ง 4 สิ่งทดลองต่อคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รส และความชอบรวมพบว่า ผลคะแนนที่ได้อยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก โดยที่น้ำชากระวานทั้ง 4 สิ่งทดลองมีผลคะแนนทางด้านประสาทสัมผัสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกคุณลักษณะที่ทำการทดสอบ ดังตารางที่ 5

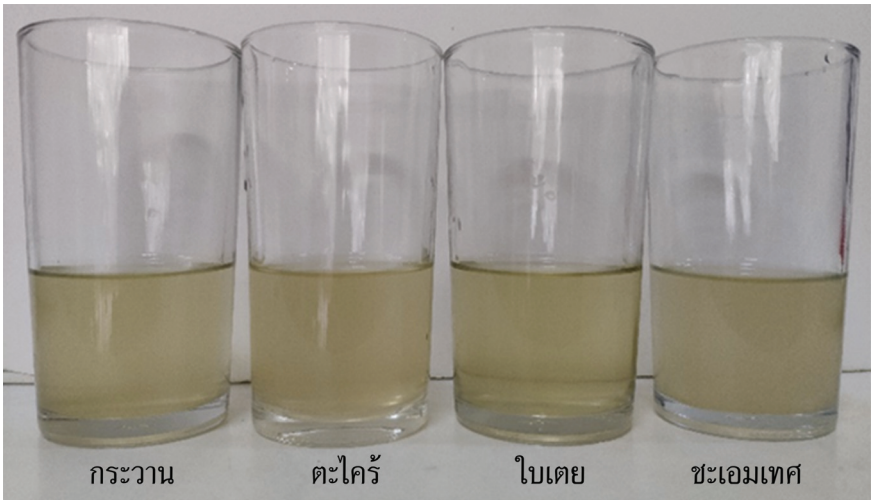
ISSN 2672-9369 (Online)

ด้านสีพบว่า ชากระวานใบเตยมีสีเขียวอ่อนที่ได้จากใบเตยและมีความใสทำให้ชากระวานใบเตยมีสีที่น่าดื่ม แตกต่างจากน้ำชาสิ่งทดลองอื่นที่มีสีน้ำตาลอ่อนและมีความขุ่น (รูปที่ 2) เป็นผลให้ผู้บริโภคให้คะแนนชากระวานใบเตยในระดับชอบมาก โดยมีคะแนนสูงสุด 8.1 คะแนน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับน้ำชากระวานและน้ำชากระวานตะไคร้ ซึ่งผู้บริโภคให้คะแนนความชอบระดับชอบปานกลาง โดยมีคะแนน 7.4 และ 7.2 คะแนน สำหรับน้ำชากระวานชะเอมเทศผู้บริโภคให้คะแนนความชอบในระดับชอบเล็กน้อย มีคะแนนต่ำสุดเท่ากับ 6.8 คะแนน

ตารางที่ 5 คะแนนเฉลี่ยจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำชากระวานผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	คุณภาพทางประสาทสัมผัส			
	สี	กลิ่น	กลิ่นรส	ความชอบรวม
น้ำชากระวาน	7.4±0.8[b]	7.1±0.9[b]	7.1±1.1[b]	7.4±0.9[b]
น้ำชากระวานตะไคร้	7.2±0.8[b]	7.3±1.0[b]	7.1±1.0[b]	7.3±0.8[b]
น้ำชากระวานใบเตย	8.1±1.1[a]	8.2±0.9[a]	7.8±1.0[a]	8.2±0.9[a]
น้ำชากระวานชะเอมเทศ	6.8±1.0[c]	6.7±1.0[c]	6.8±1.2[b]	7.1±1.1[b]

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$)



รูปที่ 2 น้ำชากระวาน น้ำชากระวานตะไคร้ น้ำชากระวานใบเตย และน้ำชากระวานชะเอมเทศ

ด้านกลิ่นพบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนน้ำชากระวานใบเตยในระดับชอบมากโดยมีคะแนนสูงสุด 8.2 คะแนน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับน้ำชากระวานตะไคร้และน้ำชากระวาน ซึ่งผู้บริโภคให้คะแนนความชอบในระดับชอบปานกลางโดยมีคะแนน 7.3 และ 7.1 คะแนน และน้ำชากระวานชะเอมเทศ ผู้บริโภคให้คะแนนในระดับชอบเล็กน้อยซึ่งมีคะแนนต่ำสุด 6.7 คะแนน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผู้บริโภคชอบกลิ่นของน้ำชากระวานใบเตยเนื่องจากมีกลิ่นหอมของใบเตยที่โดดเด่นมากกว่าน้ำชากระวานทุกสิ่งทดลอง ซึ่งน้ำชากระวาน ชากระวานตะไคร้ และน้ำชากระวานชะเอมเทศ จะให้กลิ่นอ่อน ๆ ของสมุนไพรตามชนิดที่ใช้ โดยผู้เชี่ยวชาญการทดสอบทางประสาทสัมผัสระบุว่าสารประกอบที่ให้กลิ่นเฉพาะของใบเตยคือ 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) [23]

ด้านกลิ่นรสพบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนน้ำชากระวานใบเตยในระดับชอบปานกลางโดยมีคะแนนสูงสุด 7.8 คะแนน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับน้ำชากระวาน และน้ำชากระวานตะไคร้ ซึ่งผู้บริโภคให้คะแนน 7.1 และ 7.1 คะแนน และน้ำชากระวานชะเอมเทศได้คะแนนต่ำสุด อยู่ในระดับชอบเล็กน้อย 6.8 คะแนน ทั้งนี้น้ำชากระวานใบเตยได้คะแนนสูงสุดอาจเนื่องมาจากน้ำชากระวานใบเตยมีกลิ่นหอมของใบเตยและมีรสฝาดของน้ำชาน้อยกว่าชากระวานสิ่งทดลองอื่น

ด้านความชอบรวมพบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนน้ำชากระวานใบเตยในระดับชอบมาก โดยมีคะแนนสูงสุด 8.2 คะแนน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับน้ำชากระวาน น้ำชากระวานตะไคร้และน้ำชากระวานชะเอมเทศ ซึ่งผู้บริโภคให้คะแนนในระดับชอบปานกลาง (7.1 - 7.4 คะแนน) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำชากระวานใบเตยยังคงกลิ่นรสอ่อน ๆ ของกระวานผสมกับกลิ่นหอมของใบเตย และมีลักษณะใสเป็นสีเขียวอ่อนที่น่าดื่มแตกต่างจากน้ำชากระวานชนิดอื่น

สรุปผล

จากการทดลองนำสมุนไพร ตะไคร้ ใบเตย และชะเอมเทศมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตชากระวานในสัดส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนักพบว่าการผสมสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด ในสัดส่วนดังกล่าวมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าเมื่อเทียบกับชากระวานที่ไม่มีการผสมสมุนไพร แต่พบว่าชากระวานใบเตยได้รับคะแนนความชอบกลิ่น และความชอบรวมสูงสุดจากการประเมินด้วยกลุ่มผู้บริโภคทั่วไปที่ไม่ได้รับการฝึกฝนจำนวน 30 คน ดังนั้นใบเตยจึงเป็นสมุนไพรที่ควรใช้เป็นส่วนผสมร่วมในการผลิตชากระวานโดยยังคงต้องคำนึงถึงคุณประโยชน์ของกระวานต่อผู้บริโภค เช่น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น

References

[1] Sailaja Rao, P., Kalva, S., Yerramilli, A., and Mamidi, S. (2011). Free Radicals and Tissue Damage: Role of Antioxidants. **Free Radicals and Antioxidants**. Vol. 1, Issue 4, pp. 2-7. DOI: 10.5530/ax.2011.4.2

[2] Choycharoen, P. (2021). **Herb Tea: The Choice of Drinking Tea**. Department of Clinical Chemistry, Faculty of Medical Technology, Huachiew Chalermprakiet University

[3] Halliwell, B. (2007). Biochemistry of Oxidative Stress. **Biochem Soc Trans**. Vol. 35, Issue 5, pp. 1147-1150. DOI: 10.1042/BST0351147

[4] Halee, A. and Rattanapun, B. (2017). Study of Antioxidant Efficacies of 15 Local Herbs. **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 40, No. 2, pp. 283-293 (in Thai)

[5] Winarsi, H., Sasongko, N. D., Purwanto, A., Arinton, I. G., and Nuraeni, I. (2012). *In Vitro* Antioxidant Activity of the Stem and Leaves *Amomum Cardamomum* Extracts. In **International Conference on Medicinal Plants, October 11-12**. Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia

[6] Trinantawan, S. (2010). **Cardamom**. Access (8 April 2021). Avialable (https://www.scimath.org/article -biology/item/495-amomum-krervanh-pierre) (in Thai)

[7] Attajaydee, A. (2007). **Local Plants: Chanthaburi Food**. Chanthaburi: Tonchabub Publishers (in Thai)

[8] Kanenock, S. (2013). **Development of Namwa Banana Peel Tea for Health**. Research Report. Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Ayutthaya (in Thai)

ISSN 2672-9369 (Online)

[9] Inchuen, S., Simla, S., Phianjam, P., and A-sanok, P. (2017). Color and Antioxidant Property of Caranda (*Carissa carandas* L.) Leaves Tea as Affected by Leaf Positions and Tea Processing. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 45, Supplement 1, pp. 1247-1252 (in Thai)

[10] Joomwong, A. and Ketdee, W. (2020). Effects of Brewing Time Period on Physical and Chemical Quality, Antioxidant Activity and Sensory Quality of *Gynostemma pentaphyllum* Tea. **Agriculture and Technology Journal**. Vol. 1, No. 1, pp. 26-36 (in Thai)

[11] Thai Industrial Standards Institute. (2015). **Thai Community Product Standard (TCPS 120/2558; Tea)**. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry (in Thai)

[12] Waterman, P. G. and Mole, S. (1994). **Analysis of Phenolic Plant Metabolites**. Oxford: Blackwell Scientific Publishers

[13] Pourmorad, F., Hosseinimehr, S. J., and Shahabimajd, N. (2006). Antioxidant Activity, Phenol and Flavonoid Contents of Some Selected Iranian Medicinal Plants. **African Journal of Biotechnology**. Vol. 5, No. 11, pp. 1142-1145

[14] Yen, G. C. and Hsieh, G. L. (1997). Antioxidand Effect on Dopamine and Related Compounds. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**. Vol. 61, Issue 10, pp. 1646-1649. DOI: 10.1271/bbb.61.1646

[15] Rice-Evans, C. A., Miller, N. J., and Paganga, G. (1997). Antioxidant Properties of Phenolic Compounds. **Trends in Plant Science**. Vol. 2, Issue 4, pp. 152-159. DOI: 10.1016/S1360-1385(97)01018-2

[16] Huang, W. Y., Cai, Y. Z., and Zhang, Y. (2010). Natural Phenolic Compounds from MedicinalHerbs and Dietary Plants: Potential Use for Cancer Prevention. **Nutrition and Cancer**. Vol. 62, Issue 1, pp. 1-20. DOI: 10.1080/01635580903191585

[17] Taokaenchan, N., Areseesom, P., and Kawaree, R. (2018). Antioxidant Activities and Sensory Acceptability of Herbal Tea of *Caesalpinia sappan* L. Obtained by Different Infusion Processes. **Science and Technology Journal**. Vol. 26, No. 8, pp. 1411-1421 (in Thai)

[18] Vision, J. A., Dabbagh, Y. A., Serry, M. M., and Jang, J. (1995). Plant Flavonoid Especially Tea Flavonoid are Powerful Antioxidants Using an *in Vitro* Oxidation Model for Heart Disease. **Journal of Agricultural and Food Chemistry (USA)**. Vol. 43, Issue 11, pp. 2800-2802. DOI: 10.1021/jf00059a005

[19] Winarsi, H., Susilowati, S. S., and Oentoro, H. (2018). Composition of Functional Drinks Based on Cardamom Rhizomes (*Amomum cardamomum* Willd.) and the Benefits as an Anti-inflammatory with an Improved Lipid Profile. **Pakistan Journal of Nutrition**. Vol. 17, Issue 6, pp. 274-286. DOI: 10.3923/pjn.2018.274.286

[20] Kaewamatawong, R. and Juengmankong, S. (2006). Antioxidant Activities, DPPH and Total Phenol Content of Some Thai Medicinal Plant Extracts. **Ubon Ratchathani University Academic Journal**. Vol. 8, No. 2, pp. 76-88 (in Thai)

[21] Koodkaew, I. and Limpichotikul, P. (2017). Study of Antioxidant Activity and Correlation of Antioxidant Compounds in Eight Species of Garden Herbs. **SDU Research Journal Science and Technology**. Vol. 10, No. 1, pp. 137-152

[22] Singsai, K., Sakdavirote, A., Wechpanishkitkul, K., and Moonsamai, A. (2020). The Comparison of Phenolic Compounds, Flavonoids and Antioxidant Activities of the Ethanolic Extracts of Shoots, Leaves, Fruits and Seeds of *Leucaena leucocephala*. **Naresuan Phayao Journal Health Science, Science and Technology**. Vol. 13, No. 3, pp. 66-73

[23] Laksanalamai, V. and Ilangantileke, S. (1993). Comparison of Aroma Compound (2-acetyl-1-pyrroline) in Leaves from Pandan (*Pandanus amaryllifolius*) and Thai Fragrant rice (Khao Dawk Mali 105). **Cereal Chemistry**. Vol. 70, No. 4, pp. 381- 384

ISSN 2672-9369 (Online)

การใช้ผงบุกในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่
Use of Konjac Powder in Mulberry Jelly Gummy Products

กรรณิการ์ อ่อนสำลี[1*] และศิริลดา ศรีกอก[1]
Gannigar Onsamlee[1*] and Sirilada Srikok[1]

Received: *October 25, 2022;* ***Revised:*** *December 6, 2022;* ***Accepted:*** *December 6, 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพทางเคมีของน้ำมัลเบอร์รี่ ศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ ปริมาณที่เหมาะสมผงบุกในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ ผลการวิจัยพบว่าปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสม คือ 75 กรัม และปริมาณผงบุกที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 3 ของส่วนผสมทั้งหมด ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่จากผงบุกมีส่วนผสม ดังนี้ น้ำมัลเบอร์รี่ น้ำตาลทราย เจลาติน กลูโคสไซรัป ผงบุก กรดซิตริก ร้อยละ 41.61 41.50 9.17 3.49 2.91 และ 1.32 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร เถ้า ร้อยละ 18.75 71.89 6.88 0.30 1.65 และ 0.53 ตามลำดับ และพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 317.78 กิโลแคลอรี่ต่อ 100 กรัม ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) ร้อยละ 0.11 และความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.97 คุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ ความแข็ง (นิวตัน) การยึดติด ความยืดหยุ่น การเกาะรวมตัว ความเหนียว และความยากในการบดเคี้ยวเท่ากับ 277.38 นิวตัน -187.23 0.86 0.81 197.64 และ 277.76 ตามลำดับ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 21.03 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เท่ากับ 0.76 ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 520/2547 ผู้บริโภคให้คะแนนในระดับที่ชอบมาก (8.24 คะแนน)

คำสำคัญ : มัลเบอร์รี่; กัมมี่เยลลี่; ผงบุก

[1] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี*
[1] *Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi*
[*] *Corresponding Author, Tel. 08 1531 3880, E - mail: gannigar.w@lawasri.tru.ac.th*

Abstract

This research aimed to study effect of konjac powder in mulberry jelly gummy products. The chemical quality of mulberry juice, the optimum amounts of mulberry juice and konjac powder in mulberry jelly gummy products, were evaluated. The results showed that the optimum amounts of mulberry juice and konjac powder were 75 g and 3 %, respectively, of the total ingredients. Mulberry jelly gummy products fortified with konjac powder consisted of mulberry juice, sugar, gelatin, glucose syrup, konjac powder, citric acid at 41.61 %, 41.50 %, 9.17 %, 3.49 %, 2.91 % and 1.32 %, respectively. The chemical properties consisted of moisture, carbohydrates, proteins, fats, fibers, ash at 18.75 %, 71.89 %, 6.88 %, 0.30 %, 1.65 % and 0.53 % respectively, and total calories were 317.78 kcal/100 g. The total titratable acidity of citric acid was 0.11 % with the pH of 2.97. The physical properties including hardness (N), adhesiveness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness were 277.38 N, -187.23, 0.86, 0.81, 197.64 and 277.76, respectively. The amount of total soluble solids was 21.03 °brix and water activity (a_w) was 0.76. The final product in terms of microorganism properties was within the Thai community product standard at 520/2547.The consumers accepted the product at the level of like very much (8.24 scores).

Keywords: Mulberry; Gummy Jelly; Konjac Powder

บทนำ

จังหวัดลพบุรี โดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพื่อการผลิต และการแปรรูปแปลงใหญ่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หมู่ 9 บ้านนิคม 3 มีการปลูกผักอินทรีย์และผลมัลเบอร์รี่จำนวนมาก ยังไม่มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษา เป็นผลิตภัณฑ์ของฝาก และของทานเล่น สร้างรายได้ในเชิงพาณิชย์ รวมถึงกลุ่มเกษตรกรมีความประสงค์ในการพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรเพื่อยกระดับเศรษฐกิจของชุมชน สามารถผลิตเป็นของฝากโดยชุมชนผลิตเองได้ โดยพื้นฐานเป็นกลุ่มที่มีศักยภาพในการผลิต มีอุปกรณ์เครื่องมือที่หาง่าย สามารถผลิตขึ้นเองได้ เช่น น้ำมัลเบอร์รี่ แยมมัลเบอร์รี่ เป็นต้น และผลผลิตสร้างรายได้ให้กับกลุ่มมาอย่างต่อเนื่อง แต่ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอายุการเก็บรักษาสั้น สำหรับผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทางกลุ่ม ต้องการพัฒนา เนื่องจากเน้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นอาหารว่างหรือขนม ทานได้ทุกเพศทุกวัยเป็นอาหารที่ทำง่ายทั้งส่วนประกอบ และกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน ซึ่งศักยภาพของกลุ่มวิสาหกิจ สามารถผลิตได้เองซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์

หม่อนหรือมัลเบอร์รี่ (Mulberry) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus alba Linn.* เป็นผลไม้ที่มีสีแดงอมม่วงหรือสีม่วง ซึ่งเป็นแหล่งของสารสำคัญต่าง ๆ ได้แก่ แอนโทรไซยานิน กรดโฟลิก ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ [1] - [2] ผลมัลเบอร์รี่ มีปริมาณไขมัน กรดไขมัน ได้แก่ กรดไลโนเลอิคร้อยละ 26.40 - 74.77 และกรดปาล์มิติกร้อยละ 9.29 - 22.26 [3] วิตามินซี แร่ธาตุ และสารประกอบฟีนอลิกอีกด้วย [4] - [5] สำหรับมัลเบอร์รี่ได้รับการวิจัยและพัฒนาการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลาย เช่น แยมมัลเบอร์รี่ผสมผิวส้ม [6] น้ำมัลเบอร์รี่ [7] น้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรส์ [8] เป็นต้น

หัวบุกจะมีสารแป้งที่อยู่ในหัวบุกที่เรียกว่า แมนแนน (Mannan) เมื่อทำให้แตกตัวจะได้กลูโคสกับแมนโนส หรือที่เรียกว่า กลูโคแมนแนน (Glucomannan) เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักประกอบด้วย หน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสและแมนโนสอัตราส่วน 1:1.6 [9] มีคุณสมบัติช่วยลดการดูดซึมของน้ำตาลกลูโคสในระบบทางเดินอาหาร สารกลูโคแมนแนนเป็นสารโพลีแซคคาไลน์ใน 1 โมเลกุลของเส้นใยบุกจะมีกลุ่มไฮดรอกซี่ ทำหน้าที่เป็นตัวจับไขมันและน้ำตาลออกจากร่างกายได้ดีกว่าเส้นใยอื่นหลายเท่า กลูโคแมนแนน

ISSN 2672-9369 (Online)

ในผงบุก มีคุณสมบัติแตกต่างจากโพลิแซ็คคาไรด์ชนิดอื่นเป็นเจลที่มีความข้นหนืดสูงมากในกลุ่มใยอาหาร เมื่อละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องจะพองตัวและขยายตัวได้ 150 - 200 เท่า มีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำ และมีประโยชน์ต่อร่างกาย [10] สามารถทำให้เกิดเจลที่คงตัวต่อความร้อนได้ (Thermoirreversible Gel) ในผลิตภัณฑ์อาหาร ใช้เป็นอาหารควบคุมน้ำหนัก ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เพื่อลดไขมัน เช่น ผลิตภัณฑ์บุกเส้นเสริมสุขภาพจากผักเชียงดา [11] ลูกชิ้นเนื้อ มีทโลฟ (Meat Loaves) หมูยอ เนื้อปลาบดแปรรูป (Surimi) [12] นอกจากนี้ยังนำไปประยุกต์กับการทำบรรจุภัณฑ์อาหาร [13]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการใช้ผงบุกในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ เพราะผงบุกมีใยอาหาร มีคุณสมบัติเป็นเจล มีความข้นหนืดและที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความยืดหยุ่นที่คงตัว การพัฒนาผลิตภัณฑ์นี้สามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ที่สร้างรายได้ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพื่อการผลิต และการแปรรูปแปลงใหญ่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หมู่ 9 บ้านนิคม 3 เป็นต้นแบบของผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปโดยมัลเบอร์รี่จากผลผลิตทางการเกษตร และเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพทานเล่นหรือเป็นของฝากได้

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาคุณภาพทางเคมีของน้ำมัลเบอร์รี่

การเตรียมน้ำมัลเบอร์รี่ โดยทำการคัดเลือกผลมัลเบอร์รี่ที่มีผลสีแดงอมม่วง นำมาล้างน้ำสะอาด 2 - 3 รอบ เด็ดขั้วออกจากผล จากนั้นนำผลมัลเบอร์รี่ มาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นยี่ห้อ Sharp รุ่น EM-Ice Power ประเทศไทยความเร็วเบอร์ 2 นาน 2 นาที เทลงใส่หม้อตามด้วยน้ำเปล่า 3 ลิตร นำไปต้มให้เดือด กรองด้วยตะแกรง ผสมส่วนผสมทุกอย่างเข้ากัน แล้วนำไปต้มอีกรอบอุณหภูมิ 65 °C นาน 30 นาที จากนั้นบรรจุลงขวดแก้วขนาด 70 มิลลิลิตร ขณะที่บรรจุอุณหภูมิต้องไม่ต่ำกว่า 60 °C ปิดฝาแล้วทำให้เย็นลงทันทีจนได้อุณหภูมิไม่เกิน 5 °C นำไปเก็บที่อุณหภูมิแช่เย็น 4 °C [14] วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้านคุณภาพกายภาพ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids, TSS) โดยใช้มาตรดัชนีหักเหแบบดิจิทัล (Digital Refractometer) คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) ตามวิธี [15] ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total Anthocyanin Content) โดยวิธี pH-Differential [16]

2. การศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่

ส่วนผสมในการผลิตกัมมี่เยลลี่ [17] ดังตารางที่ 1 และทำตามกรรมวิธีการผลิต [18] โดยนำเจลาตินมาละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C จนได้สารละลายเจลาตินที่มีลักษณะใส และน้ำมัลเบอร์รี่ กลูโคสไซรัป น้ำตาลมาผสมกัน ให้ความร้อนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จึงนำไปหยอดลงในพิมพ์ ทิ้งไว้ให้เย็น ดังรูปที่ 1

ละลายเจลาตินด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C จนได้สารละลายใส
↓
นำน้ำมัลเบอร์รี่ที่เตรียมไว้และกลูโคสไซรัปผสมรวมในภาชนะ ต้มอุณหภูมิ 70 °C นาน 5 นาที
↓
เติมน้ำตาลทราย กวนให้ละลาย จากนั้นเติมเจลาตินที่เตรียมไว้
↓
กวนถึงอุณหภูมิ 100 °C นาน 10 นาที ใส่กรดซิตริก และตักฟองออกตลอด
↓
หยอดลงพิมพ์ นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 30 นาที
และแกะผลิตภัณฑ์ออกจากพิมพ์

รูปที่ 1 กรรมวิธีการผลิตกัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้น้ำมัลเบอร์รี่ในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่

Ingredients	Formular 1	Formular 2	Formular 3
Mulberry Juice (g)	50	75	100
Gelatin (%)		16.53	
Sugar (%)		74.80	
Glucose Syrup (%)		6.29	
Citric Acid (%)		2.38	

กำหนดการศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ในสูตรการผลิต 3 ระดับ ได้แก่ สูตรที่มีปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ 50 กรัม (สูตรที่ 1) สูตรที่มีปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ 75 กรัม (สูตรที่ 2) และสูตรที่มีปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ 100 กรัม (สูตรที่ 3) ตามลำดับ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ทุกสูตรมาวิเคราะห์ คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Aqualab รุ่น Series 4TE) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids, TSS) โดยใช้มาตรดัชนีหักเหแบบดิจิทัล (Digital Refractometer) การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis) ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.TX.plus ใช้หัววัด P/50 ได้แก่ ความแข็ง (นิวตัน) การยึดติด ความยืดหยุ่น การเกาะรวมตัว ความเหนียว ความยากในการบดเคี้ยว การวิเคราะห์ค่าสี (L* a* b*) โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ระบบ CIE ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex EZ วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความชื้น ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) [15] การศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสม โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 9-Point Hedonic Scale [19] กับผู้ทดสอบชิมที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน และวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) แล้วนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เลือกสูตรที่ดีที่สุดจากผลิตภัณฑ์ที่มีผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ และมีคะแนนประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูงที่สุดเพื่อนำไปศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของผงบุกในผลิตภัณฑ์ต่อไป

3. **การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของผงบุกในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่**

การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของผงบุก โดยแปรระดับปริมาณผงบุก 5 ระดับของส่วนผสมทั้งหมด ได้แก่ ไม่เติมผงบุก (สูตรที่ 1) การเติมผงบุกร้อยละ 3 (สูตรที่ 2) การเติมผงบุกร้อยละ 4 (สูตรที่ 3) การเติมผงบุกร้อยละ 5 (สูตรที่ 3) และการเติมผงบุกร้อยละ 6 (สูตรที่ 5) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ทุกสูตรมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Aqualab รุ่น Series 4TE) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids, TSS) โดยใช้มาตรดัชนีหักเหแบบดิจิทัล (Digital Refractometer) การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis) ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.TX.plus ใช้หัววัด P/50 ได้แก่ ความแข็ง (นิวตัน) การยึดติด ความยืดหยุ่น การเกาะรวมตัว ความเหนียว ความยากในการบดเคี้ยว การวิเคราะห์ค่าสี (L* a* b*) โดยใช้เครื่องวัดค่าสีระบบ CIE ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex EZ วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) ความชื้น ใยอาหาร ตามวิธี [15] การศึกษาคุณภาพทางกายภาพ เคมี โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) แล้วนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของ

ISSN 2672-9369 (Online)

คะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 9-Point Hedonic Scale [19] กับผู้ทดสอบชิมที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน และวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) แล้วนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. **การศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่**

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสม ปริมาณผงบุกที่เหมาะสมโดยพิจารณาคุณภาพทางเคมี กายภาพ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสร่วมคัดเลือกจนได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด นำผลิตภัณฑ์มาวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Aqualab รุ่น Series 4TE) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids, TSS) โดยใช้มาตรดัชนีหักเหแบบดิจิทัล (Digital Refractometer) การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis) ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.TX.plus ใช้หัววัด P/50 ได้แก่ ความแข็ง (นิวตัน) การยึดติด ความยืดหยุ่น การเกาะรวมตัว ความเหนียว ความยากในการบดเคี้ยว การวิเคราะห์ค่าสี (L* a* b*) โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ระบบ CIE ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex EZ วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความชื้น ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) [15] ความชื้น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร พลังงานทั้งหมดโดยการคำนวณได้ ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) ตามวิธี [12] วิเคราะห์คุณภาพด้านจุลินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ตามวิธี [15] และการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 9-Point Hedonic Scale [19] กับผู้ทดสอบชิมที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน และวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) แล้วนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. **ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมีของน้ำมัลเบอร์รี่**

คุณภาพทางเคมีน้ำมัลเบอร์รี่พบว่า มีปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกับกรดซิตริก) ร้อยละ 0.06 ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.24 มีการศึกษาคุณภาพทางเคมีกายภาพของมัลเบอร์รี่พันธุ์ต่างกันพบว่าปริมาณกรดทั้งหมดของมัลเบอร์รี่ (*Morus nigra Linn.*) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.40 มัลเบอร์รี่ (*Morus alba Linn.*) มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.25 ซึ่งมีค่ามากกว่าผลวิเคราะห์น้ำมัลเบอร์รี่ สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างผลการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับมัลเบอร์รี่ (*Morus nigra Linn.*) เท่ากับ 3.40 แต่มีค่าต่ำกว่ามัลเบอร์รี่ (*Morus alba Linn.*) เท่ากับ 5.60 [20] ในขณะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 3.14 องศาบริกซ์ ในระยะผลมัลเบอร์รี่เริ่มสุกจนระยะแก่ ผลจะมีสีแดงอมม่วงเป็นช่วงการสะสมน้ำตาลทำให้พบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มากที่สุด [21] ปริมาณแอนโทรไซยานินทั้งหมดเท่ากับ 36.54 มิลลิกรัมไซยานิน-3-กลูโคไซด์ต่อกรัม มีการศึกษาปริมาณแอนโทรไซยานินของผลมัลเบอร์รี่ 12 สายพันธุ์ พบว่าปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามระยะความสุกของผล หรือสุกเต็มที่สัมพันธ์กับกรดอินทรีย์เมื่อกรดซิตริกเพิ่มขึ้นจะมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และมีปริมาณแอนโทรไซยานินมากสุดถึง 28.61 - 33.5 มิลลิกรัมไซยานิน-3-กลูโคไซด์ต่อกรัม [22] - [23] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมีของน้ำมัลเบอร์รี่

Chemical Properties	Mulberry Juice
pH	3.24±0.02
Total titrate able acidity (as citric acid) (%)	0.06±0.10
Total anthocyanins (mg Cyanidin-3-O-Glucoside/g)	36.54±0.51
Total soluble solids (°Brix)	3.14±0.05

หมายเหตุ: ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. ผลการศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่

จากการศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสม โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยกำหนดการใช้ปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ 3 ระดับ ได้แก่ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ ค่าสี L* a* b* พบว่า ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ ค่า L* มีค่าอยู่ระหว่าง 21.10 - 26.34 ค่าสีไปทางสีมืด และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) ค่าสี a* มีค่าอยู่ระหว่าง 10.02 - 17.10 มีค่าไปทางสีแดง ค่าสี b* มีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 - 2.99 มีค่าไปทางสีเหลืองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) เนื่องจากในน้ำมัลเบอร์รี่มีสารแอนโทรไซยานินที่ละลายได้ดีในน้ำ ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน และแสง เมื่อโครงสร้างของน้ำเปลี่ยนแปลงไป สีของน้ำมัลเบอร์รี่จะเปลี่ยนไปด้วย [24] เมื่อปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่เพิ่ม ส่งผลให้ค่าปริมาณกรดทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) สภาวะความเป็นกรดด่างที่ต่ำกว่า 3 จะทำให้แอนโทรไซยานินที่เป็นฟลาโวนอยด์จัดอยู่ในสารประกอบฟีนอลที่ให้สีแดงน้ำเงิน และม่วง เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความเป็นกรดสูงจะทำให้แอนโทไซยานินมีสีแดง [24] และผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงระหว่าง 2.8 - 3.5 อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด [25]

ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่าเพิ่มขึ้น ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มีการควบคุมเวลา และอุณหภูมิในการกวนที่เท่ากัน เนื่องจากน้ำมัลเบอร์รี่ในระยะผลสีแดงอมดำมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มากกว่าในระยะผลสีอื่น [24] ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มีค่าความแข็ง ค่าการเกาะรวมตัว ค่าความยากในการบดเคี้ยวลดลง เมื่อความแข็งในโครงสร้างของกัมมี่เยลลี่ลดลง ทำให้ใช้แรงในการบดเคี้ยวน้อยลง ในการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสสัมพันธ์กับค่าความยากในการบดเคี้ยวลดลงด้วย [26] สำหรับค่าความเหนียว การยึดติด ความยืดหยุ่น เพิ่มขึ้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) เจลาตินที่เป็นส่วนผสมหลักในการทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลเนื่องจากสัดส่วนของสารก่อให้เกิดเจลในส่วนผสมมีปริมาณเท่าเดิม เมื่อปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่เพิ่มให้สัดส่วนของสารก่อเจลในส่วนผสมลดลง ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นตามลำดับ [27] - [28]

การทดสอบทางประสาทสัมผัส ดังตารางที่ 3 พบว่า ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความชอบโดยรวมของผู้บริโภคมีคะแนนเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่น้ำมัลเบอร์รี่ที่สูงขึ้นจาก 50 กรัม และ 75 กรัม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) และคะแนนความชอบลดลงที่ปริมาณการใส่น้ำมัลเบอร์รี่ 100 กรัม สำหรับความชอบโดยรวมมีคะแนนความชอบสัมพันธ์กับค่าสี (L* a* b*) โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดงมีค่าที่ (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลง ในสูตรการผลิตมีการใช้น้ำมัลเบอร์รี่ที่เพิ่มขึ้น และในกรรมวิธีการผลิตมีการควบคุมเวลา และอุณหภูมิที่เท่ากัน ส่งผลทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์นิ่มลง ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบในปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ 75 กรัมสูงสุด และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) คะแนนอยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.53 - 7.83 คะแนน) จึงเลือกปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ 75 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ และใช้สูตรการผลิตในการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมผงบุกในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ต่อไป

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสของปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale (N = 50)

Attribute (Score)	Mulberry Juice		
	50 g	**75 g**	**100 g**
Appearance	7.3±0.7[c]	7.7±0.6[a]	7.5±0.5[ab]
Colors	7.6±0.5[ab]	7.7±0.7[a]	7.3±0.7[b]
Odor	7.3±0.5[b]	7.5±0.6[ab]	7.7±0.5[a]
Flavors	7.6±0.6[ab]	7.7±0.5[a]	7.4±0.5[b]
Texture	7.0±0.6[b]	7.7±0.5[a]	7.0±0.6[b]
Overall Liking	7.2±0.5[b]	7.8±0.5[a]	7.3±0.6[b]

หมายเหตุ: a, b, c ตัวอักษรที่ไม่เหมือนกันในแนวนอนมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ ($p \leqslant 0.05$)

3. **ผลการศึกษาปริมาณผงบุกที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่**

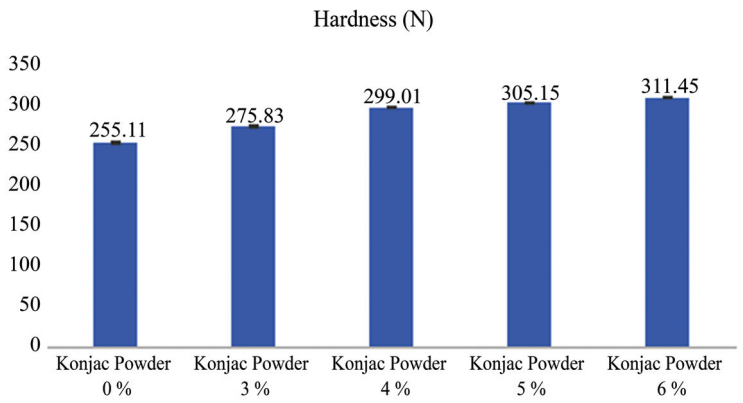
ผลจากการศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ ได้แก่ น้ำมัลเบอร์รี่ 75 กรัม นำมาศึกษาปริมาณผงบุกที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ ดังตารางที่ 4 คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่จากผงบุกที่ใช้ทั้งหมด 5 ระดับ พบว่า ค่าสี L* a* b* มีแนวโน้มการเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงบุกที่เติมลงไป ผลิตภัณฑ์มีส่วนผสมของกลูโคแมนแนนเป็นสารก่อเจลมีส่วนร่วมกับเจลาติน จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น [29] ขณะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงบุกที่สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณผงบุกประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลแมนโนส [30] สำหรับปริมาณน้ำอิสระไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตารางที่ 4 การใช้ผงบุกปริมาณผงบุก 5 ระดับของส่วนผสมทั้งหมดในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่

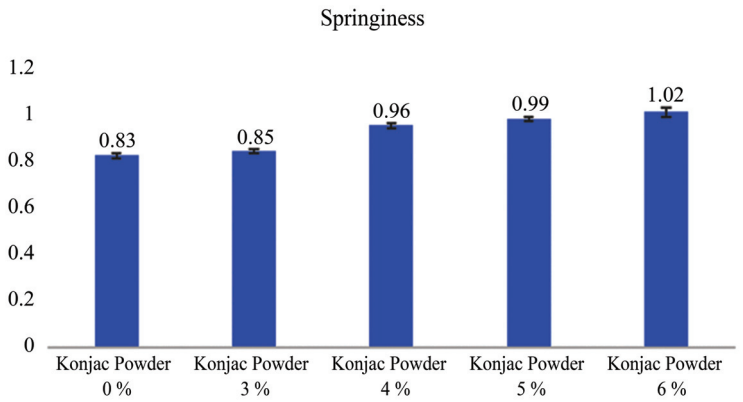
Konjac Powder (% of Total Ingredients)	Ingredient (g)					
	Konjac Powder	**Mulberry Juice**	**Sugar**	**Gelatin**	**Glucose Syrup**	**Citric Acid**
0 (Control)	**-**	**75.00**	**16.53**	**74.80**	**6.29**	**2.38**
3	5.25					
4	7.00					
5	8.75					
6	10.50					

ลักษณะทางเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง การยึดติด ความยืดหยุ่น การเกาะรวมตัว ความเหนียว ความยากในการบดเคี้ยวเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงบุกและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) ดังรูปที่ 2 สอดคล้องกับองค์ประกอบสูตรการผลิตที่เติมผงบุก ประกอบด้วย กลูโคแมนแนนเป็นใยอาหารเป็นสารที่ทำให้เกิดเจลที่แข็งแรงเมื่อได้รับความร้อน มีความหนืดสูง สามารถทำให้เกิดเจลที่ยืดหยุ่นและคงตัวต่อความร้อนได้ [31] ส่งผลต่อลักษณะทางเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง ความยืดหยุ่น ความยากในการบดเคี้ยวสูงขึ้น ดังรูปที่ 2(ก) – (ข), (ง) ในขณะที่การเติมผงบุกที่สูงขึ้น ทำให้การเกาะรวมตัวกัน ความเหนียวของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2(ค), (จ) สอดคล้องงานวิจัยที่มีการศึกษาเตรียมและประเมินผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ที่มีส่วนผสมของกลูโคแมนแนนพบว่า การใช้กลูโคแมนแนนต้องร่วมกับการใช้เจลาติน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคแมนแนน

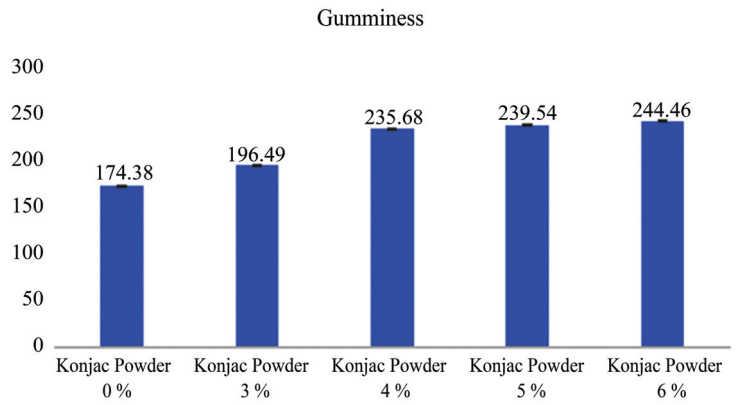
ร่วมกับเจลาตินจากระดับร้อยละ 12 เป็นร้อยละ 18 มีผลให้ความแข็ง ความเหนียว และความทนต่อการเคี้ยวของกัมมี่เยลลี่มีค่าเพิ่มขึ้น [28] เนื่องจากกลูโคแมนเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการพองตัวและเกิดเป็นโครงสร้างที่เสริมความแข็งแรงของร่างแหและความแข็งของเจลจะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับอุณหภูมิ เมื่อเวลาผ่านไปหลังจากกระบวนการผลิตแล้วเสร็จ และอุณหภูมิลดลง ความแข็งแรงของเจลก็จะเพิ่มขึ้น [32] สำหรับกลูโคแมนแนนในบุกได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาว่าเป็นวัตถุเจือปนอาหารที่ได้รับการรับรองว่ามีความปลอดภัย (Generally Recognized as Safe: GRAS) [33]



(ก) ด้านความแข็ง (นิวตัน) (Hardness)



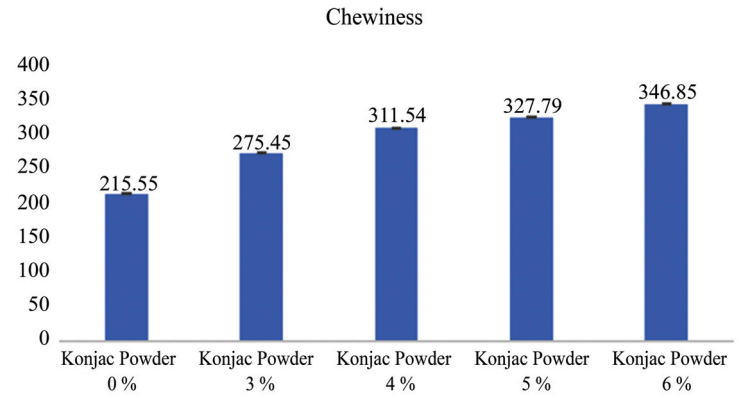
(ข) ด้านความยืดหยุ่น (Springiness)



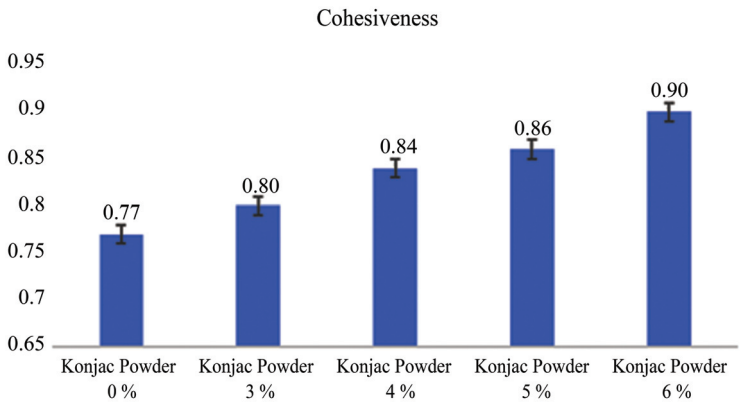
(ค) ด้านความเหนียว (Gumminess)

รูปที่ 2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ที่เติมปริมาณผงบุก 5 ระดับ

ISSN 2672-9369 (Online)



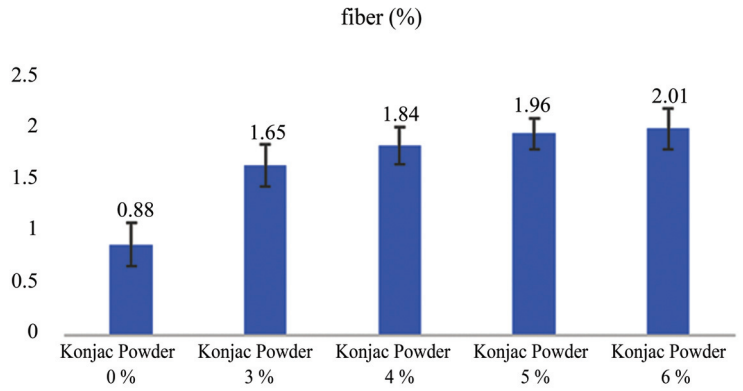
(ง) ด้านความยากในการบดเคี้ยว (Chewiness)



(จ) ด้านความการเกาะรวมตัว (Cohesiveness)

รูปที่ 2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ที่เติมปริมาณผงบุก 5 ระดับ (ต่อ)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีค่าอยู่ระหว่าง 2.97 – 2.98 ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหาร [25] การเพิ่มปริมาณผงบุกไม่ส่งผลต่อความชื้น ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) ทำให้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ขณะที่ใยอาหาร ดังรูปที่ 3 พบว่า ทั้ง 5 สิ่งทดลองมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.88 – 2.01 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leqslant0.05$) สอดคล้องกับการเพิ่มปริมาณผงบุกในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผงบุกมีสารกลูโคแมนแนน ซึ่งเป็นเส้นที่มีใยอาหารสูงชนิดละลายน้ำได้ไม่ให้พลังงาน และไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย พบการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้ผงบุกเพื่อเพิ่มใยอาหารจากกลูโคแมนแนนในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมจากถั่วเหลืองหมักผงผสมบุกสำหรับผู้สูงอายุ [34] นอกจากนี้ผงบุกในผลิตภัณฑ์อาหารยังรักษาภาวะไขมันในเลือดสูงและโรคเบาหวาน [35] คุณสมบัติของบุกที่เป็นใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble Fiber) และเป็นพรีไบโอติก (Prebiotic) ซึ่งเป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในระบบทางเดินอาหาร ช่วยให้ระบบขับถ่ายดีขึ้น ขับของเสียหรือสารพิษที่ตกค้างในระบบทางเดินอาหารออกจากร่างกายได้ดีขึ้น [36]



รูปที่ 3 ปริมาณใยอาหารของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ที่เติมปริมาณผงบุก 5 ระดับ

เมื่อปริมาณผงบุกเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับค่าสี (L* a* b*) โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้น สำหรับการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงบุกในสูตรการผลิต ส่งผลให้คะแนนความชอบของผู้บริโภคสูงขึ้นกว่าสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) โดยเฉพาะคะแนนความชอบของผู้บริโภคต่อสิ่งทดลองที่ 2 (การใช้ผงบุกร้อยละ 3) มีคะแนนความชอบสูงสุด (7.77 - 7.97 คะแนน) ในด้านลักษณะปรากฏ ด้านเนื้อสัมผัสคะแนนความชอบสอดคล้องกับการวัดค่าเนื้อสัมผัสโดยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leqslant 0.05$) พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงบุก ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มีความแข็ง ความยากในการบดเคี้ยวเพิ่มขึ้น มีรายงานการใช้ผงบุกในผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นพบว่าการเติมเจลบุกร้อยละ 2 - 4 มีแนวโน้มของค่าความแข็ง และความยากในการบดเคี้ยวสูงขึ้นจากสูตรควบคุมและมีคะแนนความชอบที่ผู้บริโภคให้การยอมรับสูงสุด [37] จากผลวิเคราะห์การใช้ผงบุกที่เหมาะสมพิจารณาคุณภาพทางกายภาพและการทดสอบทางประสาทสัมผัส จึงเลือกปริมาณผงบุกร้อยละ 3 เป็นปริมาณที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่

4. ผลการศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่จากผงบุก

การศึกษาปริมาณน้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสม และปริมาณผงบุกที่เหมาะสม ได้ผ่านการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมโดยดูผลจากการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และการทดสอบทางประสาทสัมผัสร่วมกันในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่พบว่า ปริมาณมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสม คือ 75 กรัม (ส่วนผสมทั้งหมด 175 กรัม) ปริมาณผงบุกที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 3 (ส่วนผสมทั้งหมด 175 กรัม) คำนวณปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ค่าร้อยละส่วนผสมดังนี้ น้ำมัลเบอร์รี่ น้ำตาลทราย เจลาติน กลูโคสไซรัป ผงบุก กรดซิตริก ร้อยละ 41.61 41.50 9.17 3.49 2.91 และ 1.32 ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ทางกายภาพ จุลินทรีย์และทางประสาทสัมผัสของคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่จากผงบุก พบว่าค่าความสว่าง L* เท่ากับ 25.34 มีค่าไปในทางมืด a* เท่ากับ 14.50 มีค่าไปในทางสีแดง และ b* เท่ากับ 2.10 มีค่าไปในทางสีเหลือง ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เท่ากับ 0.76 ความแข็ง (นิวตัน) ความยึดติด ความยืดหยุ่น การเกาะรวมตัว ความเหนียว ความบดเคี้ยวเท่ากับ 277.38 -187.23 0.86 0.81 197.64 และ 277.76 ตามลำดับ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 21.03 องศาบริกซ์ ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบสมมูลกรดซิตริก) ร้อยละ 0.11 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 2.97 ความชื้น โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร เถ้า คาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 18.75 6.88 0.30 1.65 0.53 และ 71.89 ตามลำดับ และพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 317.78 กิโลแคลอรี่ต่อ 100 กรัม ดังตารางที่ 5 สำหรับปริมาณจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และมีปริมาณจำนวนยีสต์ และราทั้งหมดน้อยกว่า 10 โคโลนี ต่อตัวอย่าง 1 กรัม (ไม่ได้แสดงผล) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเยลลี่แห้ง 520/2547 [25]

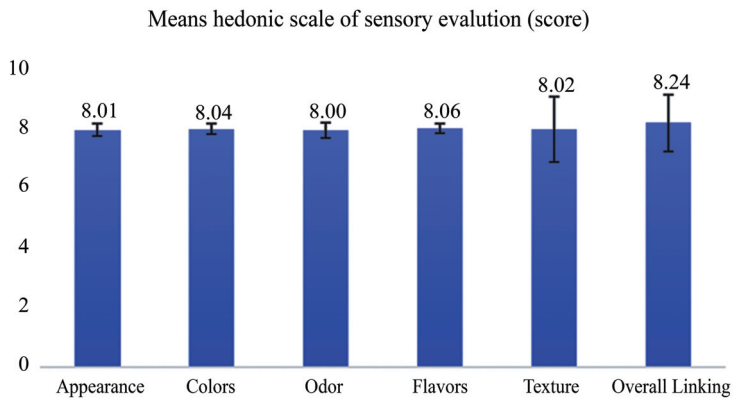
ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่จากผงบุก

Chemical Composition(%)	Mulberry Jelly Gummy Products
Moisture	18.75±0.10
Fiber	1.65±0.01
Ash	0.53±0.01
Fat	0.30±0.01
Protein	6.88±0.04
Carbohydrate	71.89±0.11
Energy (kg calorie/100 g)	317.78±0.38

หมายเหตุ: ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผู้บริโภคจำนวน 50 คน ให้คะแนนความชอบสูตรสุดท้ายผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเท่ากับ 8.01 8.04 8.00 8.06 8.02 และ 8.24 คะแนน ตามลำดับ อยู่ในระดับชอบมาก ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทดสอบทางประสาทสัมผัสสูตรสุดท้ายผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ โดยวิธี 9-Point Hedonic Scale

สรุปและอภิปรายผล

ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่เป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ผลิตขึ้นเพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์ของมัลเบอร์รี่สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพื่อการผลิต และการแปรรูปแปลงใหญ่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ หมู่ 9 บ้านนิคม 3 จากงานวิจัยใช้ปริมาณ น้ำมัลเบอร์รี่ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ คือ 75 กรัมของสูตรการผลิต เป็นสูตรที่มีความเหนียวและความยืดหยุ่นสอดคล้องกับความชอบของผู้บริโภค มีสารแอนโทรไซยานินที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สำหรับการใช้ผงบุกร้อยละ 3 ของส่วนผสมทั้งหมด การใส่ผงบุกทำให้ผลิตภัณฑ์มีการเสริมใยอาหารไปด้วย ซึ่งเป็นจุดเด่นของผลิตภัณฑ์ และผงบุกทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่เป็นเจลมีความคงตัวและแข็งแรง ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์มีความเหนียว การเกาะรวมตัว และทำให้ความยากง่ายในการเคี้ยวที่สอดคล้องกับการให้คะแนนความชอบสูงสุดระดับชอบมาก ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่มัลเบอร์รี่ มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร เถ้า คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 18.75 6.88 0.30 1.65 0.53 และ 71.89 ตามลำดับ และพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 317.78 กิโลแคลอรี่ต่อ 100 กรัม

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการใช้สารให้ความหวานที่ไม่ให้พลังงานทดแทนปริมาณน้ำตาลและการศึกษาการใช้สารก่อเจล ประเภทอื่นร่วมด้วย
2. ควรมีการการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม

References

[1] Jiang, Y. and Nie, W. J. (2015). Chemical Properties in Fruits of Mulberry Species from the Xinjiang Province of China. **Food Chemistry**. Vol. 174, pp. 460-466. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.083

[2] Yuan, Q. and Zhao, L. (2017). The Mulberry (*Morus alba* L.) Fruit-A Review of Characteristic Components and Health Benefits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 65, No. 48, pp. 10383-10394. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b03614

[3] Liang, L., Wu, X., Zhu, M., Zhao, W., Li, F., Zou, Y., and Yang, L. (2012). Chemical Composition, Nutritional Value, and Aantioxidant Activities of Eight Mulberry Cultivars from China. **Pharmacognosy Magazine**. Vol. 8, Issue 31, pp. 215-224

[4] Pawlowska, A. M., Oleszek, W., and Braca, A. (2008). Quali-Quantitive Analyses of Flavonoids of *Morus nigra* L. and *Morus alba* L. (Moraceae) Fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 56, Issue 9, pp. 3377-3380. DOI: 10.1021/jf703709r

[5] Bae, S. H. and Suh, H. J. (2007). Antioxidant Activities of Five Different Mulberry Cultivars in Korea. **Agricultural Sciences**. Vol. 4, No. 6, pp. 995-962

[6] Tomas, M., Toydemir, G., Boyacioglu, D., Hall, R., Beekwilder, J., and Capanoglu, E. (2017). Processing Black Mulberry Into Jam: Effects on Antioxidant Potential and *In Vitro* Bioaccessibility. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Vol. 97, Issue 10, pp. 3106-3113. DOI: 10.1002/jsfa.8152

[7] Tomas, M., Toydemir, G., Boyacioglu, D., Hall, R., Beekwilder, J., and Capanoglu, E. (2015). The Effects of Juice Processing on Black Mulberry Antioxidants. **Food Chemistry**. Vol. 186, pp. 277-284. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.151

[8] Punnongwa, W. (2022). Antioxidant Activities and Phenolic Acids Profile of Pasteurized Mulberry Juice During Storage. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 1, pp. 59-70 (in Thai)

[9] Kato, K. and Matsuda, K. (1969). Studies on the Chemical Structure of Konjac Mannan. **Agricultural and Biological Chemistry**. Vol. 33, Issue 10, pp. 1446-1453. DOI: 10.1080/00021369.1969.10859484

[10] Chiu, Y. T. and Stewart, M. (2012). Comparison of Konjac Glucomannan Digestibility and Fermentability with Other Dietary Fibers *In Vitro*. **Journal of Medicinal Food**. Vol. 15, pp. 120-125. DOI: 10.1089/jmf.2011.0084

[11] Srisamatthakarn, P. and Cham, S. (2020). Healthy Konjac Noodle Product Development from Phak Chiangda (*Gymnema inodorum* (Lour.) Decne). **The 4th National Academic Conference of Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi**. pp. 572-581 (in Thai)

ISSN 2672-9369 (Online)

[12] Jimé nez-Colmenero, F., Cofrades, S., Herrero, A. M., Solas, M. T., and Ruiz-Capillas, C. (2013). Konjac Gel for use as Potential Fat Analogue for Healthier Meat Product Development: Effect of Chilled and Frozen Storage. **Food Hydrocolloids**. Vol. 30, Issue 1, pp. 351-357. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2012.06.015

[13] Wu, C., Li, Y., Du, Y., Wang, L., Tong, C., Hu, Y., and Yan, Z. (2019). Preparation and Characterization of Konjac Glucomannan-Based Bionanocomposite Film for Active Food Packaging. **Food Hydrocolloids**. Vol. 89, pp. 682-690. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.11.001

[14] Attabhanyo, R., Sampanvejsobha, S., and Changchut, A. (2010). Development of Fruit for Standardization and Market Study. **The Thailand Research Fund, Faculty of Agriculture, Department of Product Development**. Chiang Mai, Chiang Mai University

[15] AOAC. (2005). **Offical Methods of Analysis**. (14th ed). Washington, D. C: Association of Official Analytical Analytical Chemist

[16] Giusti, M. M. and Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**. pp. F1.2.1-F1.2.13. DOI: 10.1002/0471142913.faf0102s00

[17] Suwan, T., Narathapanon, P., Iamsuwan, A., Pongpattanapanich, W., and Kullamethee, P. (2018). Development of Babbler's Bill Leaf Carragenan Jellies. **The Journal of KMUTNB**. Vol. 28, No. 2, pp. 403-411 (in Thai)

[18] Rittilert, P. and Warin, k. (2020). Development of Karanda (*Carissa carandas* L.) Gummy Jelly Product. **Thai Journal of Science and Technology**. Vol. 9, No. 2, pp. 342-354 (in Thai)

[19] Chamber, E. and Wolf, M. B. (1996). **Sensory Testing Methods**. 2nd Ed., West Conshohocken, PA: ASTM

[20] Jan, B., Parveen, R., Zahiruddin, S., Khan, M. U., Mohapatra, S., and Ahmad, S. (2021). Nutritional Constituents of Mulberry and Their Potential Applications in Food and Pharmaceuticals: A Review. **Saudi Journal of Biological Sciences**. Vol. 28, Issue 7, pp. 3909-3921. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.03.056

[21] Cheng, J. -R., Liu, X. -M., Chen, Z. -Y., Zhang, Y. -S., and Zhang, Y. -H. (2016). Mulberry Anthocyanin Biotransformation by Intestinal Probiotics. **Food Chemistry**. Vol. 213, pp. 721-727. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.07.032

[22] Kim, I. and Lee, J. (2020). Variations in Anthocyanin Profiles and Antioxidant Activity of 12 Genotypes of Mulberry (*Morus* spp.) Fruits and Their Changes During Processing. **Antioxidants**. Vol. 9, Issue 3, pp. 242. DOI: 10.3390/antiox9030242

[23] Bao, T., Xu, Y., Gowd, V., Zhao, J., Xie, J., Liang, W., and Chen, W. (2016). Systematic Study on Phytochemicals and Antioxidant Activity of Some New and Common Mulberry Cultivars in China. **Journal of Functional Foods**. Vol. 25, pp. 537-547. DOI: 10.1016/j.jff.2016.07.001

[24] Kurt, A., Bursa, K., and Toker, O. S. (2022). Gummy Candies Production with Natural Sugar Source: Effect of Molasses Types and Gelatin Ratios. **Food Science and Technology International**. Vol. 28, Issue 2, pp. 118-127. DOI: 10.1177/1082013221993566

[25] Standard of Dry jelly. **Thai Industrial Standard Institute**. TISI. 520/2004. (in Thai)

[26] Evageliou, V., Mazioti, M., Mandala, I., and Komaitis, M. (2010). Compression of Gellan Gels, Part II: Effect of Sugars. **Food Hydrocolloids**. Vol. 24, Issue 4, pp. 392-397. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2009.11.005

[27] Tau, T. and Gunasekaran, S. (2016). Thermorheological Evaluation of Gelatin of Gelatin with Sugar Substitutes. **LWT - Food Science and Technology**. Vol. 69, pp. 570-578. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.02.015

[28] Jiamjariyatam, R. (2018). Influence of Gelatin and Isomaltulose on GummyJelly Properties. **International Food Research Journal**. Vol. 25, pp. 776-783

[29] Worrasarn, N., Jaipakdee, N., and Limpongsa, E. (2017). Preparation and Evaluation of GummyJelly Products Containing Glucomannan. **The National and International Graduate Research Conference**. pp. 932-939 (in Thai)

[30] Yang, J., Choi, Y. J., and Hahn, J. (2022). Development of Flaxseed Gum/Konjac Glucomannan with Agar as Gelling Agents with Enhanced Elastic Properties. **Food Science and Biotechnology**. pp. 1-12

[31] Herranz, B., Tovar, C. A., Solo-de-Zaldívar, B., and Borderias, A. J. (2012). Effect of Alkalis on Konjac Glucomannan Gels for use as Potential Gelling Agents in Restructured Seafood Products. **Food Hydrocolloids**. Vol. 27, Issue 1, pp. 145-153. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2011.08.003

[32] Salcedo-Sandoval, L., Ruiz-Capillas, C., Cofrades, S., Triki, M., and Jiménez-Colmenero, F. (2015). Shelf-life of n-3PUFA Enriched Frankfurters Formulated with a Konjac-Based Oil Bulking Agent. **LWT - Food Science and Technology**. Vol. 62, Issue 1, Part 2, pp. 711-717. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.01.043

[33] Zhang, C. and Yang, F. Q. (2014). Konjac Glucomannan, a Promising Polysaccharide for OCDDS. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 104, pp. 175-181

[34] Gasaluck, P. (2015). **Functional Food from Fermented Soybean Powder Supplement with Konjac for Aging People**. Institute of Agricultural Technology. Suranaree University of Technology

[35] Jayachandran, M., Christudas, S., Zheng, X., and Xu, B. (2022). Dietary Fiber Konjac Glucomannan Exerts an Antidiabetic Effect Via Inhibiting Lipid Absorption and Regulation of PPAR-γ and Gut Microbiome. **Food Chemistry**. Vol. 403, pp. 134336. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134336

[36] Chua, M., Baldwin, T. C., Hocking, T. J., and Chan, K. (2010). Traditional Uses and Potential Health Benefits of *Amorphophallus konjac* K. Koch ex N.E.Br. **Journal of Ethnopharmacology**. Vol. 128, Issue 2, pp. 268-278. DOI: 10.1016/j.jep.2010.01.021

[37] Phisutthigoson, S., Jirapeatsayasuk, P., and Sompongse, W. (2018). Production of Fish Ball with Konjac Glucomannan Gel and Herbs. **Thai Journal of Science and Technology**. Vol. 26, No. 2, pp. 224-235 (in Thai)

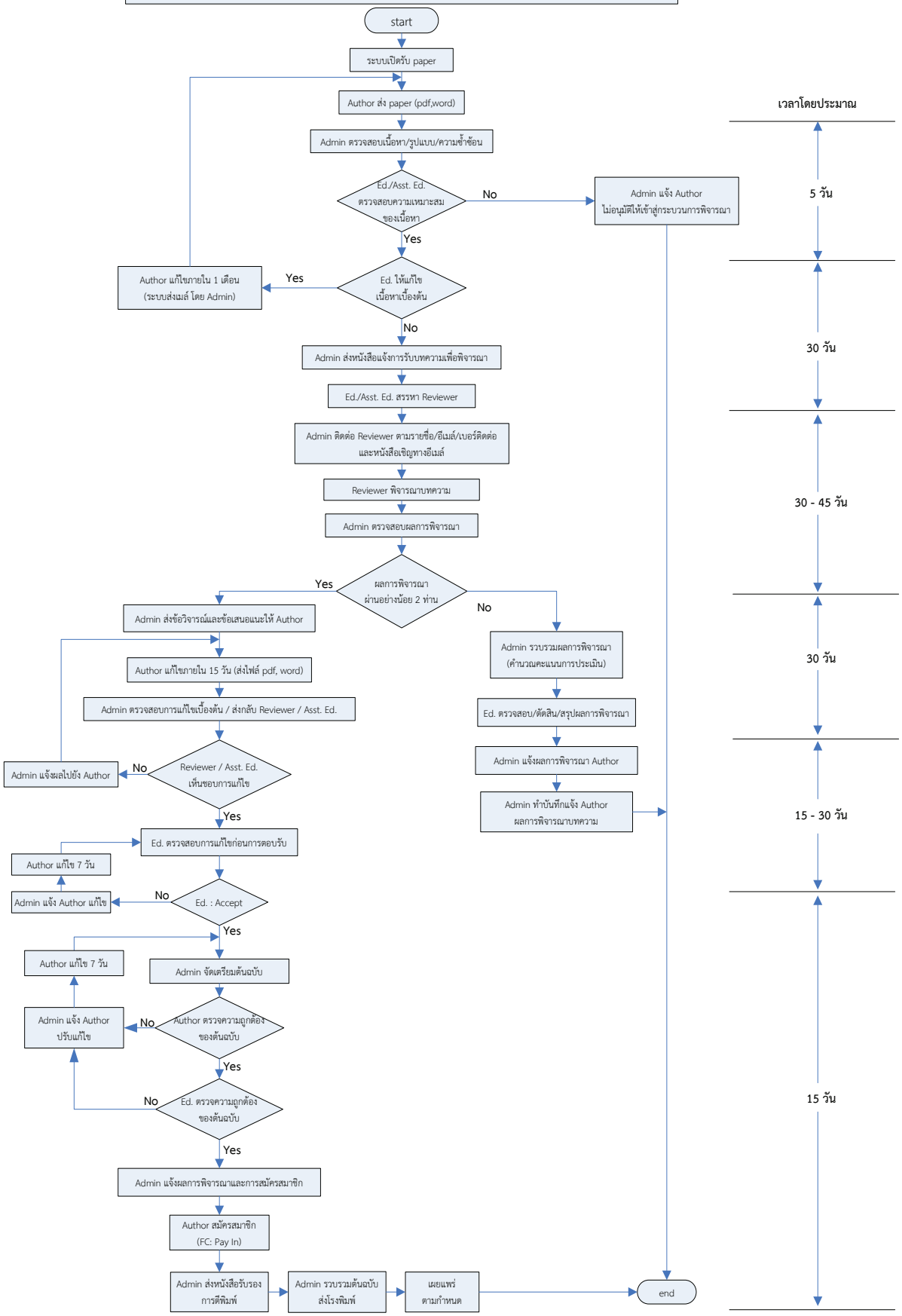
ISSN 2672-9369 (Online)

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI

ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (**Research article**) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (**Academic article**) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ
3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- **ระยะขอบ**

  ขอบบน (Top Margin) 2.5 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.5 ซม.

  ขอบขวา (Right Margin) 2.5 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.5 ซม.
- **ระยะห่างบรรทัด** 1 เท่า
- **รูปแบบตัวอักษร** บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK

  บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman
- **การย่อหน้า** 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- **จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า**
- **ชื่อบทความ** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 24 ตัวหนา

  ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
- **ชื่อผู้เขียน** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 และจัดชิดซ้าย

  ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย
- **ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล)** ขนาดตัวอักษร 18
- **ที่อยู่** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

  ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 10
- **ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น "บทคัดย่อ" "คำสำคัญ" "วิธีดำเนินการ" "ผลการวิจัย" "สรุปผลการวิจัย" "กิตติกรรมประกาศ" "เอกสารอ้างอิง"** จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
- **ชื่อหัวเรื่องรอง** จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา
- **เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ**

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12
- **ชื่อตาราง**

  กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "**ตารางที่ x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบนชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "**Table x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบนชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

- **ชื่อรูปภาพ**

กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "**รูปที่ x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "**Figure x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 **บทความวิจัย** จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระทัดรัด ไม่ยาวเกินไป บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม – นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุเบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันทร์ตัวยกกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุลและตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. **บทคัดย่อ (Abstract)** ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วยเนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมายเดียวกัน <u>ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ</u>

4. **คำสำคัญ (Key Words)** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีคำสำคัญได้อย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

****หมายเหตุ : <u>เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น</u>**

ข. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (Introduction)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (Materials and Methods) / วิธีดำเนินการวิจัย (Research Methodology)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน

3. **ผลการวิจัย (Results)** เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/หรือตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทยให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. **การอภิปรายผล (Discussion)** เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. **บทสรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

7. **เอกสารอ้างอิง (References)** เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหาโดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 **บทความวิชาการ** จะประกอบไปด้วย

ก. **ส่วนปก**

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. **ส่วนเนื้อหา**

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. **วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (Method)** (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ

3. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. **สรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้รูปแบบ IEEE **ระบบตัวเลข (Numerical System)** เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมายเล็บกรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก เช่น [1] - [3] หรือ [1] - [2], [5] เป็นต้น

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference List)

1) **หนังสือ**

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อหนังสือ**. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[1] Herren, Ray V. (1994). **The Science of Animal Agriculture**. Albany, N.Y.: Delmar Publishers

2) **หนังสือแปล**

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อเรื่องของหนังสือแปล** แปลจาก(ชื่อเรื่องในภาษาเดิม). โดย ชื่อผู้แปล. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[2] Grmek, Mirko D. (1990). **History of AIDS : Emerging and Origin of a Modern Pandemic**. Translated by Russell C. Maulitz, and Jacalyn Duffin. Princeton, N.J.: University Press

3) **บทความหรือบทในหนังสือ**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. **ชื่อเรื่อง**. ชื่อบรรณาธิการหรือผู้รวบรวม(ถ้ามี). หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[3] McTaggart, J. M. E. (1993). The Unreality of Time. **Philosophy of Time**. Robin Le Poidevin, and Murray MacBeath, eds. pp. 23-34. Oxford: Oxford University Press

4) **บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อบรรณาธิการ(ถ้ามี). **ชื่อเรื่องรายงานการประชุม**. หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[4] Beales, P. F. (1980). The Status of Malaria in Southeast Asia. **Proceedings of the Third Asian Congress of Pediatrics**. Aree Valyasevi, and Vidhaya Mekanandha, eds. pp. 52-58. Bangkok: Bangkok Medical Publisher

5) **วารสาร**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. **ชื่อวารสาร**. ปีที่. , ฉบับที่. , หน้า เลขหน้า. (in Thai)/DOI:

ตัวอย่างเช่น

[5] Vitsanusat, A. and Phachirarat, S. (2015). Measurement of Radon in Drinking Water at Amphur Meaung, Khonkhaen Province with Ionization chamber. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 12-20

6) **บทความในหนังสือพิมพ์**

[X] ชื่อผู้เขียน. (ปี. วัน. เดือน). ชื่อบทความ. ใน **ชื่อหนังสือพิมพ์**. หน้า เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

[6] Vitit Muntarbhorn. (1994. 21. March). **The Sale of Children as a Global Dilemma**. Bangkok Post. p. 4

7) **บทความในสารานุกรม**

[X] ชื่อผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ใน. **ชื่อสารานุกรม**. เล่มที่ : หน้า เลขหน้า-เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

[7] Morrow, Blaine Victor. (1993). Standards for CD-Rom Retrieval. **Encyclopedia of Library and Information Science**. Vol. 51, pp. 380-389

8) **วิทยานิพนธ์**

[X] ผู้เขียนวิทยานิพนธ์. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อวิทยานิพนธ์**. ระดับวิทยานิพนธ์ ชื่อสาขา คณะ มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างเช่น

[8] Phillips, O. C., Jr. (1962). **The Indfluence of Ovidd on Lucan's Bellum Civil**. Ph.D. Dissertation University of Chicago

9) **สื่ออิเล็กโทรนิกส์ (สื่ออิเล็กโทรนิกส์) : www**

[X] ผู้เขียน. ปี. **ชื่อบทความ**. ชื่อวารสารหรือนิตยสาร. ปีที่(เดือนหรือฉบับที่): เลขหน้า(ถ้ามี). เข้าถึงเมื่อ (วัน เดือน ปีที่ค้นข้อมูล). เข้าถึงได้จาก (ที่อยู่ของบทความหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์ URL)

ตัวอย่างเช่น

[9] Department of the Environment and Heritage. (1999). **Guide to Department and Agency Libraries**. Access (17 November 2000). Available (http://www.erin.gov.au/library/guide.html)

10) **ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน**

[X] ชื่อหน่วยงาน. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อหนังสือ** เล่มที่(ถ้ามี). ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[10] Prince of Songkla University. (2009). **Annual Report 2008**. Songkhla: Prince of Songkla University

11) **มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม**

[X] ชื่อบรรณาธิการ หรือผู้รวบรวม หรือผู้เรียบเรียง. (ปีที่พิมพ์.) **ชื่อหนังสือ**. เล่มที่ (ถ้ามี) ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี) เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[11] Rueangwit Limpanat. (2000). **Local - India**. Chonburi: Department of History Faculty of Humanities And social science Burapa university

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

1) ชื่อรูปภาพ**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภาพนั้น ๆ

3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi

5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปกราฟ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน

6) กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น

(ก) รูปย่อยที่ 1 (ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),… แทนการกำหนดรูปภาพย่อย

7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด

8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ

9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

1) ชื่อตาราง**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ

3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “**ตารางที่** x ……” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “**ตารางที่** x …… (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป

4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด

6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

Table Head	**Table Column Head**	
	Subhead (unit)	**Subhead (unit)**
xxx	123	456
xxx	321	654

7. **รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ**

1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman ขนาด 11
3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

$$y = ax + b \tag{1}$$

4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้ระบุเลขและเขียนไว้ในวงเล็บ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ
5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด

8. **การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ**

1) ทุกบทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index โดยดำเนินการสมัครสมาชิก และชำระค่าสมาชิกจำนวน 1,000 บาท ซึ่งจะมีอายุสมาชิก 1 ปี

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป **บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา**โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนงสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี

หมายเลขสมาชิก
……..
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่ ……

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) ……..

ระดับการศึกษาสูงสุด …… ตำแหน่งทางวิชาการ ……..

หน่วยงาน ……..

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก……

โทรศัพท์……โทรสาร……โมบาย……

e-mail……

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขาของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ Chemistry ☐ Engineering ☐ Materials Science

☐ Environmental Science ☐ Mathematics

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) ……..

……

……

(ภาษาอังกฤษ) ……..

……

……

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ)

1. ……
2. ……
3. ……
4. ……
5. ……

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุล……..…….ตำแหน่งทางวิชาการ……

คุณวุฒิ……สาขาที่เชี่ยวชาญ……..

หน่วยงานที่สังกัด……

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร……..……..

……..

หมายเลขโทรศัพท์…….Email……..…….

2. ชื่อ-สกุล……..…….ตำแหน่งทางวิชาการ……

คุณวุฒิ……สาขาที่เชี่ยวชาญ……..

หน่วยงานที่สังกัด……..……..……..

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร……..……..

……..

หมายเลขโทรศัพท์…….Email……..…….

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน "คำแนะนำผู้เขียน" ที่ทางกองบรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาต้นฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า "ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน"

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ **ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง**

ลงชื่อ…….

(…….)

หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง .....
.....
โดย .....
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสาร มทร.อีสาน
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)

(.....)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

……..

(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร……

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)……

ที่อยู่ ……

……โทรศัพท์……

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ……

ที่อยู่……

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

☐ วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี มี 3 ฉบับ 1,000 บาท)

โดย ☐ สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน …….. ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ …… ฉบับที่ ……..

☐ ต่ออายุสมาชิก จำนวน …….. ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ …… ฉบับที่ ……..

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน…….บาท

(ตัวอักษร)…….

ซึ่งได้ชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการจ่ายเงินและใบสมัครสมาชิก มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน การสมัครสมาชิกจะมีผลสมบูรณ์เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ…….ผู้สมัคร

(……)

หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน .....

มีความประสงค์ขอถอนการพิจารณาบทความเรื่อง.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่ ..... และยินยอมรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน ..... บาท (.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัยธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี "กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน" บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการถอนบทความ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลการชำระเงินจะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)

RMUTI

ราชมงคลอีสาน

RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol.15 No.3 September - December 2022

Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Isan
744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064
E-mail : rmuti.journal@gmail.com http://ird.rmuti.ac.th/2015