

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

Thai-Nichi Institute of Technology

Vol.12 No.1

January - June 2024



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567

ISSN 2774-0617 (Online)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567 Vol. 12 No. 1 January - June 2024

ISSN (Online) 2774-0617

ความเป็นมา

ด้วยสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น มีนโยบายสนับสนุนการเผยแพร่บทความจากผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาความรู้แก่สังคม โดยเฉพาะภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม จึงได้จัดทำวารสารวิชาการ คือ วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (เดิมชื่อ วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์รังสรรค์ เลิศในสัตย์

ขอบเขตเนื้อหา

บทความวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีวิศวกรรม เทคโนโลยีอุตสาหกรรม เทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิทยาศาสตร์เคมี และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 6 เดือน (ปีละ 2 ฉบับ)

- ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน
- ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม

เจ้าของ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น (Thai-Nichi Institute of Technology : TNI)

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

- | | |
|--|--|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ธนารักษ์ อีระมั่นคง | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 4. ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย งามหุ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 5. ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 6. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 7. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรณัฐ เสี่ยงศักดิ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.กัณฑ์พงษ์ วรรัตน์ปัญญา | สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.พญม มีสัจ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

คณะกรรมการดำเนินงาน

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ | 8. นายอศิรา พรหมสุทธิ์ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รชตะ รุ่งตระกูลชัย | 9. นางสาวพิมพ์รต พิพัฒกุล |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพชร สระทองอุ่น | 10. นางสาวอารีสา จิระเวชการ |
| 4. ดร.ประมุข บุญเสียง | 11. นางสาวอนันดา ปันเด |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญมัย เจียรกุล | |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมรชาติ ทัพพน | |
| 7. นางสาวสุพิศ บายคายคม | |

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

Tel. 0-2763-2600 (Ext. 2704, 2752, 2782)

Website : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal>

E-mail : JEDT@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน

กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

บทบรรณาธิการ

ขอแสดงความยินดีกับนักวิจัยทุกท่านที่บทความได้ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT) ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 นี้ ทุกบทความได้รับการประเมินและการชี้แนะให้ปรับปรุงจากผู้ทรงคุณวุฒิ จึงมีเนื้อหาที่มีคุณภาพและมีประโยชน์อย่างยิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านวิจัย สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาต่อยอดไปสู่นวัตกรรม

นโยบายของวารสารยังคงเดิมที่รับบทความที่เป็นทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ภายใต้การรับรองของ TCI (Thai-Journal Citation Index Centre) จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั้งในประเทศและจากนานาชาติมากขึ้น

JEDT ได้รับการรับรองให้อยู่กลุ่ม TCI 1 ต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งทางกองบรรณาธิการจะรักษามาตรฐานนี้ให้คงอยู่ตลอดไป

ทางกองบรรณาธิการหวังว่า บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่านในการอ้างอิงเพื่อการวิจัยและพัฒนาต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์
บรรณาธิการ

Editorial Message

Congratulations to all researchers whose articles have passed the peer review and were published in the Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT), Vol.12 No.1. All articles published in this issue have been reviewed and advised for modification by academic experts so that to have best quality contents and are extremely useful. They can be used for development of innovation.

The journal's policy remains the same, accepting articles in both Thai and English under the accreditation of TCI (Thai-Journal Citation Index Centre). Therefore, JEDT received more attention from both national and international researchers.

JEDT has been certified to be in the TCI 1 continuously until the present. The editorial team will maintain this standard forever.

The editorial team hope that all articles that were published in this journal will be beneficial to all readers for citation to their research and development.

Assoc.Prof. Dr.Ruttikorn Varakulsiripunth
Editor-in-Chief

สารบัญ

- 1 **An Application of Text Mining and Association Rule Mining to Job and Skill Recommendations for IT Jobs**
Napat Cheepmuangman, Puttimait Viwathara, Pakkapond Pipattanasookmongkol, Rangsipan Marukatat
- 12 **Improvement of Inbound Logistics Process in Coconut Manufacturing using FlexSim Simulation: A Case Study**
Pasuree Lumsakul, Prasan Saengkhiao, Parinya Kaweegitbundit
- 23 **Increasing of Stretch Formability on Hole-flanging Parts of Aluminum Alloys by Smooth Sheared Surface**
Phisith Muangnoy, Pongsakorn Leetrakul, Komgrit Lawanwong
- 33 **Low Cost and Simple Soil Moisture Measurement Using Multi-Level Capacitive Technique**
Phakpoom Punthukhan, René Pitayataratornb, Chonlatee Photong
- 44 **Method Enhancement of Quality Control in Brake Pads Manufacturing**
Werawit Phiewruangnont, Meechai Sriwiboon, Toemsak Srikhirin, Somkid Amornsamankul, Kanyaratt Supaibulwatana, Banpot Horbanluekit
- 56 **Monitoring Blood Coagulation Behavior Using Quartz Crystal Microbalance with a Mason Equivalent Circuit Model**
Sawit Na Songkhla, Wanida Laiwattanapaisa, Watcharee Boonlue
- 67 **Optimized PIDA controller design with Bat-Inspired Algorithm for Temperature Control of Electric Furnace System**
Chulaphorn Muangdit, Kittisak Lurang

75 Performance Analysis of a Low-cost Automatic Single-Dispenser Drinking Water Filling Machine Controlled by a Programmable Logic Controller

*Terapong Boonraksa, Thanatat Ketkaew, Yotsanon Nukong, Kanthi Kongcharoen,
Sommart Thongkom, Maneerat Chanasakunniyom, Worakrit Phuangsub, Ittipong Yongyee,
Wipada Wongsuriya, Promphak Boonraksa*

85 Single Order Inventory Replenishment Policy for The System Having Multiple Substitutable Inventory Items

Punyathat Porpan, Wisut Supithak

99 The Automatic System for Perpetual Futures Contracts on Cryptocurrency trading Using an Algorithm of Multiple Indicators to Predict the Trading Positions

Idhisak Sridam

An Application of Text Mining and Association Rule Mining to Job and Skill Recommendations for IT Jobs

Napat Cheepmuangman¹ Puttimait Viwathara²
Pakkapond Pipattanasookmongkol³ Rangsipan Marukatat^{4*}

^{1,2,3,4*} *Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: rangsipan.mar@mahidol.ac.th

Received: 17 July 2023; Revised: 22 October 2023; Accepted: 6 November 2023

Published online: 28 June 2024

Abstract

This research implemented a web application that employed text mining to extract skill requirements from online IT job announcements, and association rule mining to discover the co-occurrence of hard skills (technical abilities) and soft skills (personal competencies) specified by the jobs. The matching score of each job was calculated by comparing hard skills extracted from the job announcement with a user's current hard skills. Jobs were recommended to the user based on their matching scores. In addition, the discovered association rules were used to recommend new skills as follows: (1) based on the user's current hard skills as antecedents, new hard skills as consequences would be recommended; and (2) based on the user's current hard skills or soft skills as antecedents, new soft skills as consequences would be recommended. Online training courses to obtain such new skills were also recommended. The application was evaluated by 40 users, and received high satisfaction scores on both job recommendation and skill recommendation.

Keywords: Association rules, Hard skills, Jobs, Soft skills, Text mining



I. INTRODUCTION

It has been common for job seekers these days to search for job announcements on the Internet. But it is not easy to go through all search results to find jobs whose skill requirements match their skills. Moreover, if unable to identify sets of skills essential for the jobs, they may not know which skills they lack and should further acquire. For information technology (IT) jobs, sets of required technical skills often include specific technologies or tools, which can be different across different companies. For example, Data Analyst jobs in some companies require {Machine Learning, Python, TensorFlow}, whereas similar jobs in other companies require {Machine Learning, Cloud Computing, Microsoft Azure}. These requirements also change constantly in response to new technology development. In addition to technical or hard skills, different sets of soft skills are desirable for different IT jobs. For example, Critical Thinking and Presentation skills are advantageous for Data Analysts, whereas Conflict Management and Leadership skills are primarily desirable for Software Project Managers. Therefore, if we can extract all skills specified in numerous IT job announcements, we are likely to see frequent co-occurrence of certain hard and soft skills. By comparing skills that they already have with sets of skills frequently required together, the job seekers can pursue suitable skill training in order to prepare themselves for the job market.

The above can be formulated as an association rule mining problem. Itemsets in our context are skill sets. Our transactions or market baskets contain skills specified in the job announcements. This transactional dataset can be obtained from text mining. To realize the ideas, our research developed a web application *WorkWork* that retrieved online job announcements, performed text mining and association rule mining, and recommended jobs as well as skill training to users.

The rest of this paper is organized in the following sections. Section II reviews related research. Section III presents an overview of *WorkWork*, and elaborates on our job and skill recommendations. Section IV reports the results of association rule mining that were utilized by *WorkWork*, followed by the user evaluation of *WorkWork*. Finally, Section V concludes the paper.

II. LITERATURE REVIEW

This section reviews research on skill requirement analysis, followed by job and skill recommendations. First, we categorize skills into 2 main groups:

- 1) Hard skills: They are technical knowledge and abilities that are essential to perform specific jobs.
- 2) Soft skills: They are personal competencies that enable us to handle human and social aspects of the jobs, in order to accomplish the jobs [1], [2].

Wowczko [3] employed K-nearest neighbors (KNN) to classify IT job advertisements into 7 classes, which are: Administrator, Analyst, Developer, Engineer, Lead, Support, and Tester. Then, skills extracted from the advertisements in each class were simply displayed as word clouds.

From job advertisements in the Job section of StackOverflow.com, Papoutsoglou *et al.* [4] constructed 3 datasets of explicit hard skills (skills to use specific technologies such as Python), implicit hard skills (areas of expertise such as Machine Learning), and soft skills. After that, they applied exploratory factor analysis (EFA) to each dataset to find latent factors in the data. Each of these factors consisted of correlating skills or skills simultaneously needed in the job advertisements. But when all types of skills were analyzed together, they found significant correlation only between the explicit and implicit hard skills. Detecting soft skills in the advertisements was difficult because words describing them were general and vague. Hence, the soft skills were too sparse to yield any significant correlation.

Hiranrat and Harncharnchai [5] followed the skill categorization in [4] to analyze skill requirements for Software Development jobs posted on 2 popular job portals: Indeed.com and Jobsdb.com. Only English posts were collected and divided into 8 groups, which are: Business Analyst, System Analyst, Data Analyst, Software Architect, Designer, Developer, Tester, and Project Manager. They reported the top 5 of explicit hard skills, implicit hard skills, and soft skills needed for each group. They also used KH Coder [6] to build co-occurrence networks of skills found in the job posts.

Instead of detecting skills by comparing extracted words with lists of predefined skills (as in [4], [5]), Fareri *et al.* [2] adapted supervised named entity recognition (NER) to determine whether extracted entities referred to soft skills. Although their paper emphasized on soft skills, their published tool SkillNER was able to identify both soft and hard skills from text.

Regarding recommendation methods, there are 2 main approaches to recommending items to users. The content-based approach compares item attributes with the users' own profiles, while the collaborative filtering approach relies on ratings from other users who rate previous items similarly. In the context of job recommendation, individual users tend to have very few ratings on previous jobs and individual jobs are usually taken by single persons. So, the content-based approach would be better suited to our purpose. For example, Almalis *et al.* [7] built job profiles containing a number of skills for IT jobs. Each skill for each job was assigned a required numerical competency level. They also built job candidate profiles containing the candidates' skills and skill competency levels. Then, matching scores between the jobs and the candidates were calculated based on Manhattan and Euclidean distances. These scores could be used to recommend best matching candidates to jobs, or vice versa. Their method had one limitation that it needed numerical skill competency

values, and the values determined by different job recruiters and candidates were rather subjective.

Upadhyay *et al.* [8] constructed a knowledge graph where users and jobs were graph nodes. Each node was associated with a document that was either user profile or job description. Edges between nodes were based on document similarity. From this graph, they recommended jobs to a user by retrieving jobs that were both connected to that user (via user-job edges) and to similar users (via user-user-job paths).

As for skill recommendation research, an example is Gughani *et al.* [9]. After extracting hard skills from a user profile, they calculated the user's proficiency of each skill by considering the number of job roles in which the skill was used, along with the duration and the recency of each role. They retrieved related skills from IT skill ontology and created a skill graph for that user. From the skill graph, the user was recommended paths to acquire more advanced skills. Their method, however, required very detailed user profiles and a comprehensive skill ontology.

Some other works [10]–[12] employed collaborative filtering methods to recommend training courses to users, but their recommendations differed from ours. Our research aims to recommend new skills based on the job requirements in the job market, rather than on ratings of other users.

III. RESEARCH METHODOLOGY

Our web application *WorkWork* consisted of a front-end client, a back-end server, and a database. The front-end web client, interacting with users, was developed by using AngularJS framework (opensource) for JavaScript, HTML, and CSS. The back-end server, executing data collection, text mining, and association rule mining was developed by using Django framework (opensource) for Python. PostgreSQL (opensource) was used as the relational database engine.

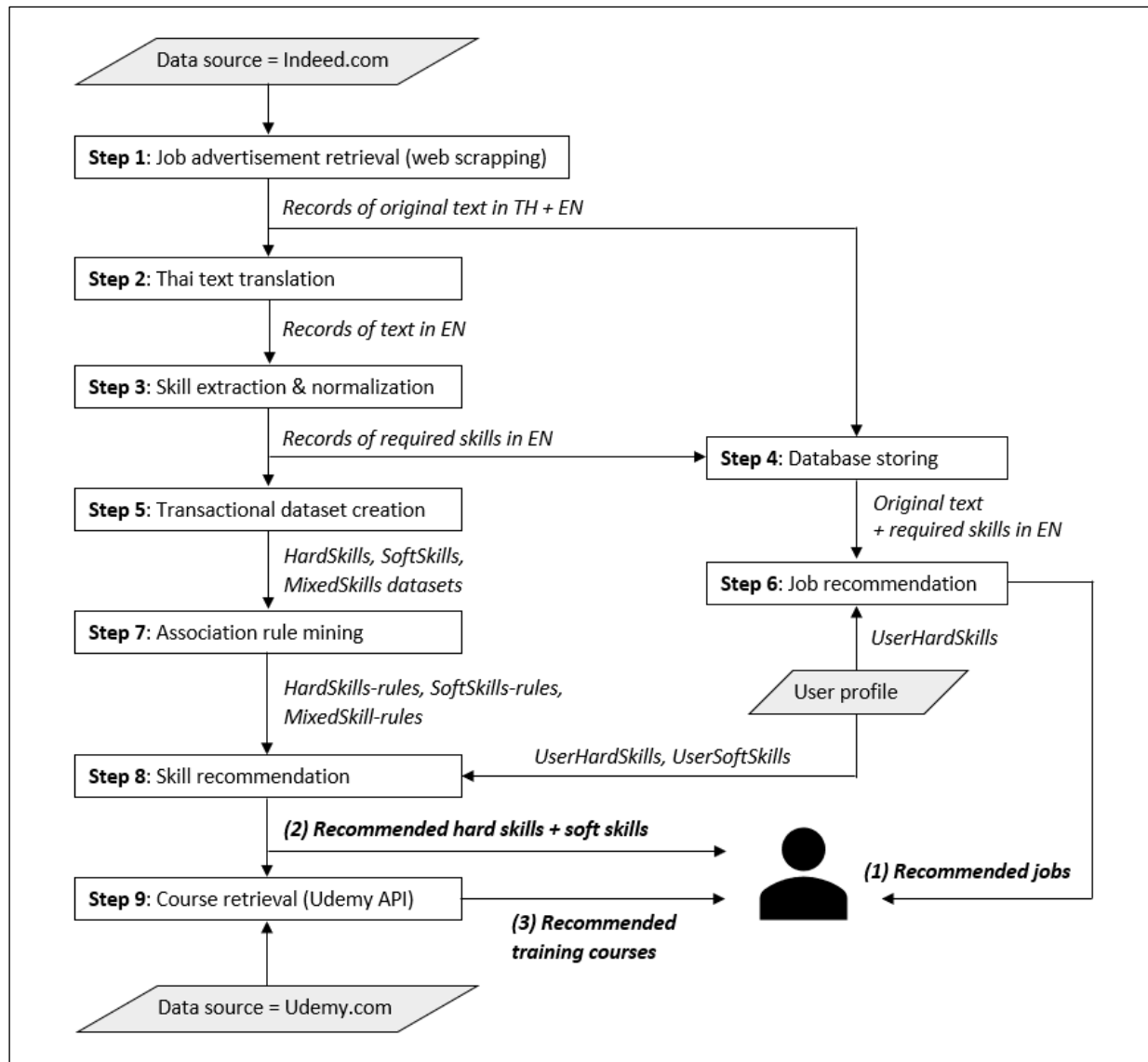


Figure 1: System diagram of WorkWork

Figure 1 illustrates the system diagram of *WorkWork*. After signing up, users could update their hard skills and soft skills in the User Profile Page. *WorkWork* offered 2 types of recommendations to the users.

1) Job recommendation. Job announcements, in both Thai and English, containing required hard skills that matched the users' hard skills were recommended together with their matching scores. This will be explained in Subsection B.

2) Skill recommendation. New skills and online courses on Udemy.com were recommended based on the

users' skills and association rules discovered from skill datasets. This will be explained in Subsection C.

A. Data Preparation by Text Mining Process

Our research emphasized on recent IT jobs being offered in Bangkok, Thailand. First, we established lists of in-demand skills and constructed skill datasets from which association rules could be discovered. This was done by steps 1-5 in the system diagram:

1) IT jobs advertised on Indeed website during July 2019 and March 2023 were collected. We used 31 common IT job names from Skills Framework for the

Information Age (SFIA) [13] as keywords to search for the jobs. Scrapy and BeautifulSoup packages were used to scrape and clean the data, respectively. This step yielded a set of 1980 job announcements. Note that the web scrapping was employed because Indeed API we initially planned to use was unavailable during our project implementation.

2) Job announcements in Thai were translated into English by using Googletrans package, in order to consolidate the same skills written in different languages.

3) Hard skills and soft skills were extracted by using SkillNER package. SkillNER did stemming and lemmatization internally, in order to map the extracted skills to normalized skill words in all uppercase letters. For example, skills related to statistics that were written differently were all mapped to STATISTICAL skill. The outputs of this step were a list of 151 hard skills and a list of 80 soft skills. They would be displayed in the User Profile Page for the users to select skills they had.

4) For each job announcement, its original text (as retrieved in step 1), job title, company name, and the extracted hard skills and soft skills (in normalized skill words) were stored in the database.

5) As summarized in Table 1, three transactional skill datasets were created. Each transaction represented a job announcement, and items were skills found in that announcement. Note that SoftSkills and MixedSkills had only 1669 transactions as some job announcements did not specify any soft skill.

Table 1: Transactional skill datasets

Dataset	Types of Items in the Transaction	Number of Transactions
HardSkills	Only hard skills	1980
SoftSkills	Only soft skills	1669
MixedSkills	Both hard and soft skills	1669

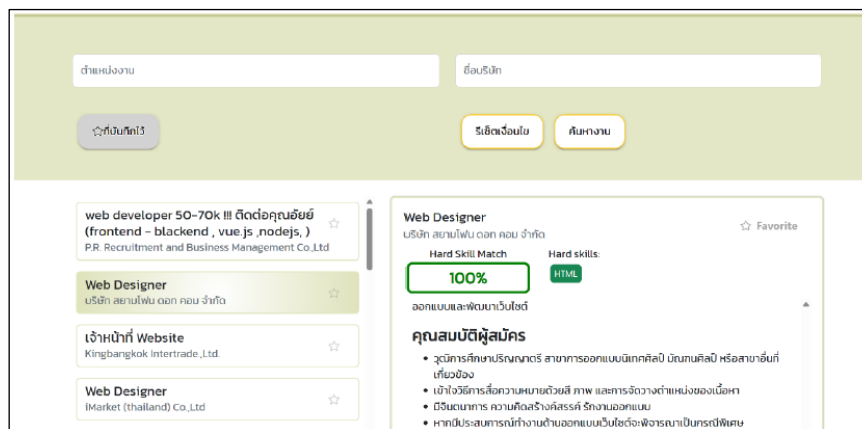


Figure 2: Jobs recommended to a user in Job Seeking Page



Figure 3: Matching score between a user and a job

B. Job Recommendation

Job recommendation was done by step 6 in the system diagram. An example of recommended jobs is shown in Figure 2. The left pane of the user's Job Seeking Page listed brief job announcements (with job titles and companies) whose hard skill requirements matched the user's. They were sorted decreasingly by matching scores. The user could also click a brief announcement to read its details which would be shown on the right pane. The top of the right pane listed all skills found in the announcement, with highlighted ones being the skills that the user had.

Figure 3 shows another job that required {AJAX, CSS, HTML, JAVA, XML} for hard skills and {COOPERATE, CREATIVITY, PATIENCE} for soft skills. Among them, {CSS, HTML, CREATIVITY} were highlighted as they matched the user's skills. We calculated the matching score as follows.

$$\text{Matching score} = \frac{\text{Number of matched hard skills}}{\text{Number of required hard skills}} \times 100 \quad (1)$$

Only hard skills were considered because they were crucial for the job. Hence, the matching score for the job in Figure 3 was $(2/5 \times 100) = 40\%$.

Besides recommended jobs, the users could search others by using job title or company name, or both, as keywords. Skill matching and matching scores would also be reported for retrieved job announcements.

C. Skill Recommendation by Association Rule Mining

Skill recommendation was done by steps 7-9 in the system diagram. An example of recommended skills is shown in Figure 4. We used Apyori package for Apriori association rule mining. Let the rules obtained from their respective datasets be called HardSkills-rules, SoftSkills-rules, and MixedSkills-rules. In the case of MixedSkills-rules, we selected only the ones with hard skills as antecedents and soft skills as consequences.

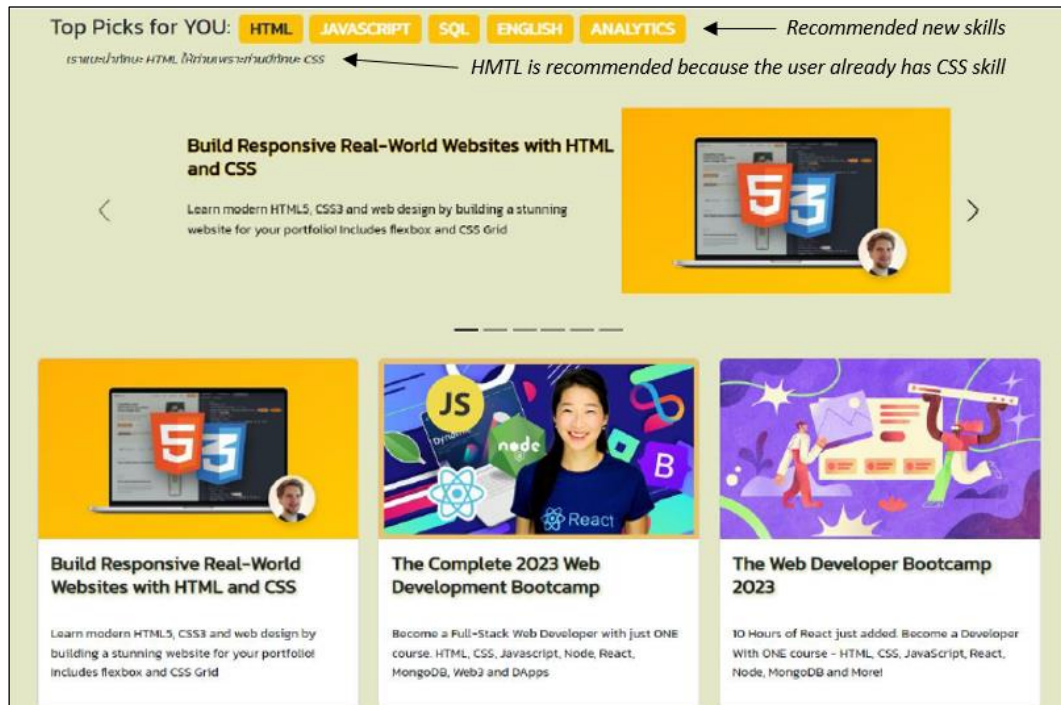


Figure 4: Skills and training courses recommended to a user in Training Courses Page

```
### Number of HardSkills-rules ###
df_hardskill_asso_pass.shape
```

(39, 5)

```
### HardSkills-rules listing ###
df_hardskill_asso_pass
```

	Antecedent	Consequence	Support	Confidence	Lift
0	[CSS]	[HTML]	0.091414	0.766949	6.545514
1	[HTML]	[CSS]	0.091414	0.780172	6.545514
2	[CSS]	[JAVASCRIPT]	0.086364	0.724576	4.207217
3	[JAVASCRIPT]	[CSS]	0.086364	0.501466	4.207217
4	[HTML]	[JAVASCRIPT]	0.081818	0.698276	4.054505
5	[PYTHON]	[SQL]	0.079293	0.526846	2.173238
6	[CSS]	[JAVASCRIPT, HTML]	0.069697	0.584746	7.146893
7	[HTML]	[JAVASCRIPT, CSS]	0.069697	0.594828	6.887477
8	[CSS, HTML]	[JAVASCRIPT]	0.069697	0.762431	4.427018
9	[JAVASCRIPT, CSS]	[HTML]	0.069697	0.807018	6.887477
10	[JAVASCRIPT, HTML]	[CSS]	0.069697	0.851852	7.146893
11	[SCRUM]	[AGILE]	0.057071	0.849624	4.659988
12	[PHP]	[JAVASCRIPT]	0.056566	0.562814	3.267953
13	[JQUERY]	[JAVASCRIPT]	0.045455	0.750000	4.354839
14	[ANGULAR]	[JAVASCRIPT]	0.042424	0.636364	3.695015
15	[JQUERY]	[CSS]	0.039899	0.658333	5.523305

Figure 5: Top 15 HardSkills-rules by Support

Figure 5 shows some HardSkills-rules. They can be interpreted as follows.

The first rule (Rule 0) tells us that if a job required CSS skill (Antecedent), it would also require HTML skill (Consequence), with 0.766949 or 76.69% Confidence. The Support value indicates the rule coverage, which is about 9.14% of job announcements in the dataset. The Lift value greater than 1 confirms that both sides of the rule are positively correlated.

IT Skills	CSS PYTHON
Language Skills	THAI
Other Skills	COMMUNICATION SKILLS PROBLEM SOLVE

Figure 6: User's skills in User Profile Page

Skill recommendation can be illustrated as follows. Suppose that a user profile is as Figure 6.

1. Sets of the user's skills were identified as:

UserHardSkills = {CSS, PYTHON}

UserSoftSkills = {THAI, COMMUNICATION SKILLS, PROBLEM SOLVE}

2. HardSkills-rules with antecedents being subsets of UserHardSkills were selected. For example, Rules {0, 2, 5, 6} in Figure 5 would be selected for this user. According to each rule, consequence skills not yet earned by the user would be recommended, with the antecedent being the reason for such recommendation. As shown in Figure 4, {HTML, JAVASCRIPT, SQL} were recommended hard skills. The reason for recommending HTML (displayed upon clicking it) was because the user already had CSS skill according to Rules 0 and 6.

3. Soft skill recommendation was done in the same manner as the above. SoftSkills-rules with antecedents being subsets of UserSoftSkills and MixedSkills-rules with antecedents being subsets of UserHardSkills were selected. Soft skills appearing in the consequences of these rules, that were not yet earned by the user, would be recommended.

Furthermore, the recommended skills were used as keywords to search relevant courses on Udemy, a popular online skill training platform. Alternatively, the users could search other training courses by using skills or course names as keywords. Course searching and retrieval were done via Udemy API.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Results of Association Rule Mining

This Subsection reports the results of association rule mining. Rules that satisfied minimum Support, minimum Confidence, and minimum Lift thresholds were derived by Apriori. There were 3 conditions for setting Support and Confidence thresholds for each dataset, as summarized in Table 2, in order to obtain sufficient rules for skill recommendation. Rules with lower Support, representing rarer cases, were expected to have higher Confidence to ensure their usefulness. Lift threshold was set to 1 in all cases to ensure that only positively correlating rules were discovered.

Table 2: Apriori parameters

	Minimum Support (i.e., Transaction Coverage)	Minimum Confidence
HardSkills		
- Condition (1)	6.06% (120 transactions)	50%
- Condition (2)	4.04% (80 transactions)	60%
- Condition (3)	3.03% (60 transactions)	70%
SoftSkills		
- Condition (1)	6.00% (100 transactions)	50%
- Condition (2)	4.50% (75 transactions)	60%
- Condition (3)	3.00% (50 transactions)	70%
MixedSkills		
- Condition (1)	6.00% (100 transactions)	50%
- Condition (2)	4.50% (75 transactions)	60%
- Condition (3)	3.00% (50 transactions)	70%

There were 39 HardSkills-rules, 18 SoftSkills-rules, and 9 MixedSkills-rules being discovered in total. In this Subsection, we discuss top rules in each category.

Among the top 15 HardSkills-rules in Figure 5, we found that most of them contained skills related to web applications such as {CSS, HTML, JAVASCRIPT, PHP, JQUERY, ANGULAR}. They were explicit hard skills to use specific languages or frameworks. This enabled us to recommend precise skill training to the users. There was also a rule indicating the requirement for SCRUM and AGILE project management skills.

The obtained HardSkills-rules were dominated by only a few obvious skills. To see some other rules, we lowered Support threshold to 1.05% (20 transactions) and Confidence threshold to 50%. Rules containing {CSS, HTML, JAVASCRIPT, PHP, WEB} were filtered out. Figure 7 shows additional rules being discovered. We found rules about software deployment that required skills to use DOCKER and KUBERNETES. Although both of them could run on any operating system, a few jobs

preferred LINUX. We also found a rule that required JENKINS for continuous software integration along with GIT for version control. Unfortunately, these rules had too low Support and Confidence, and thus were not used for skill recommendation. In the future, if more data are collected, these rules may be frequent enough to pass the thresholds and be utilized.

```
### HardSkills-rules with too low supports (not passing thresholds) ###
pd.set_option('display.max_colwidth', None)
df_hardskill_asso_lowsupport.head(15)
```

	Antecedent	Consequence	Support	Confidence	Lift
76	[MACHINE LEARNING]	[STATISTICAL]	0.027273	0.556701	8.478985
99	[R]	[STATISTICAL]	0.025253	0.561798	8.556612
119	[JENKINS]	[GIT]	0.024242	0.631579	8.173375
163	[PYTHON, MACHINE LEARNING]	[STATISTICAL]	0.022727	0.671642	10.229621
167	[R, PYTHON]	[STATISTICAL]	0.022727	0.633803	9.653304
168	[STATISTICAL, PYTHON]	[R]	0.022727	0.642857	14.301766
174	[KUBERNETES]	[LINUX]	0.022222	0.511628	6.708763
214	[ARTIFICIAL INTELLIGENCE]	[PROFESSIONAL SERVICE]	0.021212	0.636364	9.473684
225	[ASP NET]	[C #]	0.020707	0.719298	8.092105
226	[BOOTSTRAP]	[JQUERY]	0.020707	0.577465	9.528169
239	[JENKINS]	[DEVOPS]	0.020202	0.526316	7.776905
242	[AGILE, DOCKER]	[KUBERNETES]	0.020202	0.625000	14.389535
318	[KUBERNETES, DOCKER]	[LINUX]	0.018687	0.544118	7.134788
319	[LINUX, DOCKER]	[KUBERNETES]	0.018687	0.637931	14.687249
358	[PYTHON, MACHINE LEARNING]	[R]	0.018182	0.537313	11.953715

Figure 7: HardSkills-rules with too low Support

```
### Number of SoftSkills-rules ###
df_softskill_asso_pass.shape
```

(18, 5)

```
### SoftSkills-rules listing ###
df_softskill_asso_pass
```

	Antecedent	Consequence	Support	Confidence	Lift
0	[THAI]	[ENGLISH]	0.112626	0.638968	1.833562
1	[PROBLEM SOLVE]	[ANALYTICS]	0.097475	0.634868	2.479368
2	[COMMUNICATION SKILLS]	[ENGLISH]	0.090909	0.584416	1.677019
3	[ANALYTICAL SKILL]	[ANALYTICS]	0.050000	1.000000	3.905325
4	[PROBLEM SOLVE, ENGLISH]	[ANALYTICS]	0.046970	0.624161	2.437552
5	[THAI, ANALYTICS]	[ENGLISH]	0.042929	0.833333	2.391304
6	[COMMUNICATION SKILLS, ANALYTICS]	[ENGLISH]	0.039899	0.642276	1.843054
7	[CONSULTING, THAI]	[ENGLISH]	0.038384	0.873563	2.506747
8	[PROBLEM SOLVE, CONSULTING]	[ANALYTICS]	0.033838	0.705263	2.754282
9	[PROBLEM SOLVE, INTEGRITY]	[ANALYTICS]	0.031818	0.724138	2.827994

Figure 8: Top 10 SoftSkills-rules by Support

```
### Number of MixedSkills-rules ###
df_mixedskill_asso_pass.shape

(9, 5)

### MixedSkills-rules Listing ###
df_mixedskill_asso_pass
```

	Antecedent	Consequence	Support	Confidence	Lift
0	[PROJECT MANAGEMENT]	[ENGLISH]	0.070202	0.538760	1.546006
1	[SUSTAINABLE]	[INNOVATIVE]	0.061616	0.659459	3.248084
2	[PROFESSIONAL SERVICE]	[CONSULTING]	0.061111	0.909774	4.393545
3	[PYTHON, SQL]	[ANALYTICS]	0.047475	0.598726	2.338220
4	[STATISTICAL]	[ANALYTICS]	0.046970	0.715385	2.793810
5	[MACHINE LEARNING]	[ANALYTICS]	0.036869	0.752577	2.939059
6	[R]	[ANALYTICS]	0.034343	0.764045	2.983844
7	[PYTHON, STATISTICAL]	[ANALYTICS]	0.031313	0.885714	3.459003
8	[PYTHON, R]	[ANALYTICS]	0.030303	0.845070	3.300275

Figure 9: MixedSkills-rules by Support

Among the top 10 SoftSkills-rules in Figure 8, we found that many jobs required ANALYTICS and ENGLISH skills together. There was some redundancy such as on both sides of Rule 3, as SkillNER did not consolidate ANALYTICAL SKILL and ANALYTICS into the same skill. Finally, among MixedSkills-rules in Figure 9, we found that hard skills related to data analysis (antecedents) were often required along with ANALYTICS soft skill.

We reckon that while the users could easily claim and prove that they had certain hard skills, they may struggle to do so for soft skills. Recommending new soft skills based on both the current soft skills (according to SoftSkills-rules) and current hard skills (according to MixedSkills-rules) helped alleviate a problem of lack of soft skills in the user profiles.

B. User Evaluation of WorkWork

We deployed *WorkWork* on Heroku.com cloud platform during April and May 2023. Third-year and fourth-year students in IT-related fields including: Computer Engineering, Computer Science, Information Technology, Industrial Design, and Robotics Engineering were invited to test and evaluate the application. Forty of them submitted their evaluations via Google Form.

Two aspects of the application were evaluated: the user interface design and the usability of various modules. This Subsection reports the user evaluations on Job Recommendation (Job Seeking Page) and Skill Recommendation (Training Courses Page). Evaluation criteria and rating scores in five-point Likert scale are displayed in Table 3. Let the rating score 5 be strong satisfaction and 1 be weak satisfaction, the average score for each criterion was calculated as follows.

$$\text{Average rating score} = \frac{\sum_{\text{rating}=1}^5 (\text{rating} \times \text{number of raters})}{\text{Total raters}} \quad (2)$$

Table 3: User evaluation results

Evaluation Criterion	Average Score
Job Seeking Page	
1. Jobs are recommended according to your skills.	4.50
2. Jobs retrieved by keyword searching match your expectation.	4.65
3. Job announcements shown in the page have sufficient details and are organized appropriately.	4.40
4. Checking the skill requirements of each job is easy.	4.65
5. The overall satisfaction of this page	4.60
Training Courses Page	
6. Recommended new skills are appropriate and related to your current skills.	4.525
7. You agree with recommended courses.	4.15
8. You are interested in recommended courses.	3.75
9. Courses retrieved by keyword searching match your expectation.	4.525
10. Courses shown in the page have sufficient details.	4.10
11. The overall satisfaction of this page	4.425

In summary, the users were very satisfied with the Job Seeking Page, and slightly less satisfied with the Training Courses Page. Job recommendation (Criterion 1) and skill requirement analysis (Criterion 4) functions received high rating scores. Although the users agreed with recommended new skills (Criterion 6), they were



not much interested in recommended training courses (Criterion 8). Their criticism was that the courses were only in English. In fact, there were a lot of Udemy courses in Thai. But when using skills in English words as keywords, the API returned only courses in English.

It should be noted that the above survey results were from nearly-graduated students who had not yet entered the job market. Hence, their expectation and satisfaction on job and skill recommendations may differ from those of mid-career workers.

C. Comparison with Other Works

This Subsection compares our work with the others that were reviewed in Section 2. First, the others [3]–[9] processed only English text, but we processed both English and Thai text. By translating Thai text into English, we could extract skills in normalized English words and create consolidated datasets for further analysis. But as reported previously, skills in English words could retrieve only Udemy courses in English.

Our job recommendation was based on the matching between users' skills and skills required by jobs, as in Almalis *et al.* [7] and Upadhyay *et al.* [8]. But unlike [7], we did not take skill competency into account because most job announcements did not explicitly specify them, and the users' self-evaluated skill competency would be subjective. Our similarity calculation was applied to skills already extracted from the user profiles and job announcements, not on full text documents as in [8]. Hence, we believe that our matching would be more precise and incur less computation overhead in real time. Nevertheless, our method still had a limitation that it was based on the exact matching of skill words. If the user had {PYTHON, WEB PROGRAMMING} skills and a job required DJANGO or FLASK, the application could not infer that PYTHON and WEB PROGRAMMING would also be required for this job. To enable this ability, we need to know the

hierarchy and relationship between skills. Skill ontology proposed by Gugnani *et al.* [9] can be helpful for this task.

Our skill recommendation was based on the association rules discovered from skill datasets. The other works also discovered skills frequently required together, but in other forms such as word clouds [3], factors [4], clusters [2], [5], and co-occurrence networks [2], [5], [6]. Our association rules were well-organized and easily interpretable. We could use antecedent items (i.e., the users' current skills) to predict or recommend consequence items (i.e., new skills). But without the skill ontology, we could recommend only individual skills, not skill acquisition paths as in [9].

V. CONCLUSION

This research employed text mining to extract skill requirements from online IT job announcements, and association rule mining to discover the co-occurrence of hard and soft skills. Results from these methods were used to recommend jobs, new skills, and training courses to the users. This allows the users to not only find their best-matched jobs easily, but also to pursue suitable skill training to increase the chance of being employed.

One improvement to our application is to collect online job announcements via APIs instead of web scrapping. But to avoid high overhead of real-time text processing, we propose that this should be done by the back-end server periodically. The processed text and extracted skills can be stored in our database and transactional skill datasets as before. With continuously updated datasets, association rules with more diverse skills or even emerging skills may be discovered.

Other potential extensions are as follows. First, we can use user profiles on social networks or technical platforms to determine skill competency of the users. For example, skills of LinkedIn users can be endorsed

by their colleagues and experts. StackOverflow user profiles contain metrics such as Badges, Upvotes, and Downvotes for their questions and answers about programming. GitHub user profiles contain software contribution metrics such as Followers, Contributions, Repositories, and Stars. From these technical platforms, we can also analyze trends about hard skills that are commonly used in IT tasks, and recommend them to the users.

REFERENCES

- [1] A. T. V. Pham and H. T. T. Dao, "The importance of soft skills for university students in the 21st century," in *Proc. 4th Int. Conf. Adv. Artif. Intell. (ICCAI)*, London, U.K., Oct. 2020, pp. 97–102.
- [2] S. Fareri, N. Melluso, F. Chiarello, and G. Fantoni, "SkillNER: Mining and mapping soft skills from any text," *Expert Syst. Appl.*, vol. 184, Dec. 2021, Art. no. 115544.
- [3] I. A. Wowczko, "Skills and vacancy analysis with data mining techniques," *Informatics*, vol. 2, no. 4, pp. 31–49. 2015.
- [4] M. Papoutsoglou, N. Mittas, and L. Angelis, "Mining people analytics from StackOverflow job advertisements," in *Proc. Euromicro Conf. Softw. Eng. and Adv. Appl. (SEAA)*, Vienna, Australia, Aug. 2017, pp. 108–115.
- [5] C. Hiranrat and A. Harncharnchai, "Using text mining to discover skills demanded in software development jobs in Thailand," in *Proc. 2nd Int. Conf. Educ. and Multimedia. Technol. (ICEMT)*, Okinawa, Japan, Jul. 2018, pp. 112–116.
- [6] Y. Kino, H. Kuroki, T. Machida, N. Furuya, and K. Takano, "Text analysis for job matching quality improvement," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 112, pp. 1523–1530, 2017.
- [7] N. D. Almalis, G. A. Tsihrantzis, N. Karagiannis, and A. D. Strati, "FoDRA — A new content-based job recommendation algorithm for job seeking and recruiting," in *Proc. 6th Int. Conf. Inf. Intell. Syst. and Appl. (IISA)*, Corfu, Greece, Jul. 2015, pp. 1–7.
- [8] C. Upadhyay, H. Abu-Rasheed, C. Weber, and M. Fathi, "Explainable job-posting recommendations using knowledge graphs and named entity recognition," in *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man, and Cybern. (SMC)*, Melbourne, Australia, Oct. 2021, pp. 3291–3296.
- [9] A. Gughani, V. K. R. Kasireddy, and K. Ponnalagu, "Generating unified candidate skill graph for career path recommendation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Data Mining Workshops (ICDMW)*, Singapore, Singapore, Nov. 2018, pp. 328–333.
- [10] C. Wang, H. Zhu, C. Zhu, X. Zhang, E. Chen, and H. Xiong, "Personalized employee training course recommendation with career development awareness," in *Proc. Int. World Wide Web Conf. (WWW)*, Taipei, Taiwan, Apr. 2020, pp. 1648–1659.
- [11] Z. Pan, L. Zhao, X. Zhong, and Z. Xia, "Application of collaborative filtering recommendation algorithm in internet online courses," in *Proc. 6th Int. Conf. Big Data and Comput. (ICBDC)*, Shenzhen, China, May 2021, pp. 142–147.
- [12] Y. Liu, "Research on MOOC course design for college students based on collaborative filtering algorithm," in *Proc. 5th Int. Conf. E-Bus. Inf. Manage. and Comput. Sci. (EBIMCS)*, Hong Kong, Hong Kong, Dec. 2022, pp. 80–84.
- [13] I. Seward, "SFIA 8: The global skills and competency framework for the digital world," SFIA Foundation, London, U.K., 2021. Accessed: Jun. 5, 2024. [Online]. Available: <https://sfia-online.org/en/sfia-8>

Improvement of Inbound Logistics Process in Coconut Manufacturing Using FlexSim Simulation: A Case Study

Pasuree Lumsakul¹ Prasan Saengkhiao² Parinya Kaweegitbundit^{3*}

^{1,2,3*}*Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Wang Klai Kangwon Campus, Prachuap Khiri Khan, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: parinya.kaw@rmutr.ac.th

Received: 31 August 2023; Revised: 17 December 2023; Accepted: 20 December 2023

Published online: 28 June 2024

Abstract

This research focuses on improving the inbound logistics process in coconut manufacturing by employing simulation techniques using the FlexSim software tool. Data of the processes were collected and validated to generate the simulation model. Multiple scenarios were proposed, analyzed, and assessed against the key performance metrics, including throughput, work in process (WIP), stay time, and resource utilization. All scenarios were generated depending on the number of work centers for each process. The findings indicated that Scenario 3, Scenario 4, and Scenario 7 offered higher average throughput with 384.73, 384.60, and 384.73 units, respectively, and Scenario 7 provided the most efficient average WIP with 53.01 units and average stay time with 1263.7 seconds. Resource utilization was moderate across all scenarios. It is recommended to adopt strategies similar to Scenario 7 for optimizing inbound logistic case study. Nevertheless, real-world validation is necessary to ensure the implementation. The study contributes valuable insights to decision-makers in the coconut manufacturers. It serves as a basis for future research in logistics optimization, utilizing simulation techniques to enhance manufacturing performance and competitiveness.

Keywords: Coconut manufacturing, FlexSim, Inbound logistics process, Simulation

I. INTRODUCTION

Inbound logistics is an essential part of the production process and plays an important role in the efficient flow of information and resources into the production process. Optimizing inbound logistics for the coconut industry in Thailand, the world's third exporter in 2021 [1], is important to improve cost-effectiveness and competitiveness as well as to meet market demands. Traditional methods for logistics development are limited in capturing complex processes and interactions. However, advances in simulation technology provide powerful tools for comprehensive modeling and analysis of logistics processes.

This study aims to improve inbound logistics management in coconut production using simulation techniques. A case study of a coconut manufacturer located in Southern Thailand. In particular, the FlexSim simulation software tool, which is well-known for its efficiency and ability to model the production process, was applied in this research. Simulating various scenarios supports the overall performance improvement of the production process by providing insight into the performance of the system, identifying potential bottlenecks, and evaluating different strategies.

The study highlighted the potential improvement scenarios for the inbound logistics process of coconut production via simulation-based analysis. The analysis was employed by assessing against key performance indicators such as access, Work-In-Process (WIP), waiting time, and resource utilization, our goal is to optimize the number of work centers for the system. Insights from this study can guide decision-makers in the coconut manufacturer to use insights from data to improve the overall profitability and competitiveness of their manufacturing processes.

This paper is organized as follows: The next section presents a literature review, discussing prior research applying the FlexSim simulation software tool in the

manufacturing industry. Subsequently, the methodology section details the simulation model setup, data collection, and the scenarios tested. The results and discussion section reports the simulation outcome analysis and the study findings in the context of coconut manufacturing. Finally, the conclusion summarizes the key insights and outlines future directions for research and implementation.

II. LITERATURE REVIEW

This section presents an overview of various research studies that have utilized the FlexSim simulation software tool which is widely applied to optimize and enhance manufacturing processes across different industries. By utilizing simulation and mathematical techniques, the studies address various challenges, such as bottleneck identification, layout improvement, and efficiency enhancement. Chawla and Singari [2] simulated two-wheeler crankcase cover manufacturing, identifying Scenario 2 as the most effective, optimizing Die-Casting Machines and Vertical Milling Centers. Kumar *et al.* [3] analyzed a complex Flexible Manufacturing System (FMS) using FlexSim, demonstrating its cost-effective and resource-efficient approach. According to Jidong *et al.* [4], the improvement scenario of a furniture production line was suggested and assessed with FlexSim, achieving a 34.7% increase in production balance rate.

Other studies focused on logistics and layout optimization. Liu *et al.* [5] applied 3D modeling technology to logistics engineering, enhancing transportation efficiency. Wang *et al.* [6] optimized logistics distribution centers, showcasing the suitability of the FlexSim for system analysis. Kumar and Narayan [7] optimized the Upvc windows manufacturing layout, resulting in improved product quality and productivity. Similarly, Liu and Lin [8] transformed China's coastal manufacturing industry, achieving production line balance in Company Z. The



experimental results indicated the effectiveness of FlexSim simulation.

Simulation proved effective in goods and services provision organizations [9], printing machine product quality improvement [10], and tapioca powder packaging enhancement [11]. The simulation also provided several benefits in both the production and inventory stages. For instance, Lucinski and Iwanov [12] evaluated manufacturing system flexibility, while Medan [13] reduced production costs and implementation time. Zhang [14] balanced an automobile coating production line, while Krynke [15] assessed the production flow scenarios' impact. Poloczek and Oleksiak [16] optimized the steel industry's production process, and Asante *et al.* [17] used FlexSim to model and simulate a fruit pack house, identifying idle resources and bottlenecks, leading to adjustments that improved overall fruit cold chain performance.

Additionally, studies focused on traditional practices, such as shea nut processing [18] and production logistics in enterprises [19]. According to Yuan and Zhang [20] applied optimization methods to JKL's cooler manufacturing system, leading to significant improvements.

These literature reviews offer valuable insights into the extensive applicability and effectiveness of the FlexSim simulation software tool for optimizing manufacturing processes. The findings emphasize the potential of simulation-based approaches in cost-effective process optimization and informed decision-making for manufacturing enterprises, leading to enhanced productivity, product quality, and resource utilization. The knowledge gained from these studies forms the basis for our current research, which aims to enhance the inbound logistics process in the coconut manufacturing industry. By leveraging FlexSim's

capabilities, this research aims to improve overall efficiency and competitiveness in the coconut manufacturing sector.

III. RESEARCH METHODOLOGY

This section provides an overview of the inbound logistics process in coconut manufacturing using the FlexSim simulation software tool and a case study of coconut manufacturing. The analysis included the following detailed steps:

Step 1: Data Collection. The first phase involved collecting detailed data related to the inbound logistics process of coconut manufacturing. The information includes incoming coconut, shipping times, loading and inspection times, stock levels, and other errors. Accurate and detailed data collection is essential for effective simulation analysis.

Step 2: Model Development. In this step, the simulation model is created using the FlexSim software tool. The software tool provides a user-friendly interface that allows the creation and customization of the models.

Step 3: Model Verification. This includes comparing the model output with real-world data and running tests to make sure that the model can represent the system.

Step 4: Creating Scenarios. Different improvement scenarios are proposed to simulate various operation options in the inbound logistics process.

Step 5: Performance Evaluation. Analyze the efficiency of the inbound logistics process using simulation models and designed scenarios. Measure and compare the key performance indicators as mentioned in topic 1. In addition, the details related to the coconut manufacturer case study and the simulation modeling are explained as follows:



Figure 1: Inbound logistics process of coconut manufacturing case study

A. Inbound Logistics Process of Coconut Manufacturing: A Case Study

The case study coconut manufacturer is located in Prachuap Khiri Khan province. Based on the current operational data, one of the critical problems is inbound logistics. Therefore, this research aims to address this issue by studying the entire inbound logistic process, starting from coconut receiving to coconut preparation (before production) process as shown in Figure 1.

The operational process of the study is as follows:

1. Coconut Arrival and Reception: Coconuts are transported from suppliers and farms to the factory. Coconuts will be collected from reception on arrival.
2. Inspection: The coconut quality inspection includes inspecting the condition of the coconuts, checking for damage or rot, and making sure they meet the appropriate standards for processing.
3. Weighing: Coconut is weighed and incoming products are recorded. This information is essential for inventory control and tracking of incoming coconuts.
4. Sorting: After inspection, coconuts are sorted and graded according to size, maturity, and quality. The

separated coconuts were used for different purposes for different final products.

5. Storage in the holding area: The extracted coconuts are temporarily stored in the storage area near the factory. This provides better organizing and makes it easier for the next process.

The inbound process of the factory consists of 11 employees (an employee per workstation) to operate each process. The present operation process has 3 workstations for reception, 3 workstations for inspection, 2 workstations for weighing, and 3 workstations for sorting. For the current issue, a high average WIP occurred (65.26 units per runtime). There were bottlenecks in the production process, leading to production inefficiencies and slowdowns. Hence, the production process lacked smoothness and effectiveness as it should have been. The potential root causes of the problems might be the factory constraints and/or the limitation of production lines balancing, i.e., the number of employees or workstations cannot be increased or decreased. Consequently, optimizing the number of employees in each workstation based on production line balancing principles becomes a challenge in finding the most optimal approach.

B. The Simulation Modeling Using FlexSim Simulation Software tool

The simulation model was carried out via the FlexSim running simulator version 2019. The inbound logistics process of the coconut manufacture was analyzed regarding the collected data related to the process movement and employees' operations. The unit of operation time for the model was set in seconds. The statistical validation for the parameter setting of the simulation model was applied by the ExpertFit Function as depicted in Figure 2 [21].

Figure 2 shows the example of validation for operation time of sorting process that use in this research.

The three best distribution models that were carried out for the automated dataset. The best one of the analyses has been selected to set in the model.

All parameters used in this model were carried out in Table 1.

Table 1: Operation time setting (seconds)

Process	Values
Reception	Weibull (0.642, 3.653, 2.000)
Inspection	Weibull (5.368, 4.428, 2.000)
Weighting	Beta (6.735, 13.320, 0.834, 0.872)
Sorting	Johnson SB (14.690, 25.369, -0.033, 0.688)

Relative Evaluation of Candidate Models			
Model	Relative Score	Parameters	
1-Johnson SB	94.35	Lower endpoint	14.69083
		Upper endpoint	25.36942
		Shape#1	-0.03392
		Shape#2	0.68842
2-Beta	92.74	Lower endpoint	14.84969
		Upper endpoint	25.16281
		Shape#1	1.18306
		Shape#2	1.13087
3-Rayleigh(E)	87.90	Location	14.22095
		Scale	6.55783

32 models are defined with scores between 0.00 and 94.35

Absolute Evaluation informative of Model 1 -Johnson SB

Evaluation: Good

Suggestion: Additional evaluations using Comparisons Tab might be informative.

See Help for more information.

Additional Information about Model 1 -Johnson SB

“Error” in the model means

relative to the sample mean 0.00881= 0.04%

Figure 2: The data validation of the sorting operation using ExpertFit function

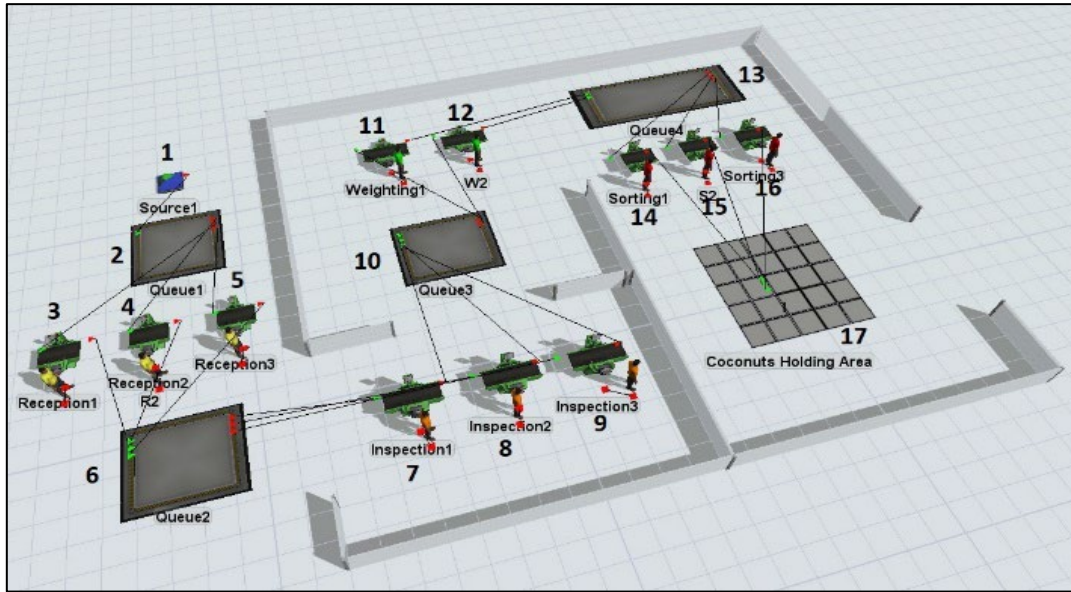


Figure 3: The simulation model of the inbound logistics process of the coconut manufacturer

Table 2: Details of the model

Object	Description
1	Coconut arrival at the manufacturing
2,6,10,13	Waiting queue to be processed for the next operations
3-5	Workstation of coconut reception
7-9	Workstation of coconut inspection
11-12	Workstation of coconut weighting
14-16	Workstation of coconut sorting
17	Coconut holding area to be processed in the next process

The simulation model of inbound logistics coconut manufacturing is illustrated in Figure 3. The details of the model in Figure 3 are described in Table 2.

C. The Model Verification

To validate to simulation model, 30 results of average throughput from the model and the current situation are compared by using a paired t-test hypothesis analysis with an alpha is 0.05. If the p-value is greater than 0.05, it indicates that there is no difference between the current process and the model.

The hypothesis testing is carried out by Minitab 2019 which hypotheses are equations (1) and (2) as follows.

$$H_0: \mu_{actual} = \mu_{model} \quad (1)$$

$$H_1: \mu_{actual} \neq \mu_{model} \quad (2)$$

when μ_{actual} is the average throughput of the current situation and μ_{model} is the average throughput of a model.

As a result, the p-value of this case is 0.077 greater than 0.05. Therefore, this simulation model can represent the actual system of the study [22].

D. Scenarios of the experiment

To optimize the number of workstations (employees), multiple scenarios were generated in the experimenter function in FlexSim based on four objectives: a) average throughput, b) average work in process, c) average stay times, and d) average utilization of the workstation. The assumption for the experiment is that each employee has similar abilities to work in each process. This research proposes 7 scenarios using the trial-error method that represents the number of workstations for each process based on the constraints and limitations of the manufacturer mentioned in the previous section. The details are demonstrated in Table 3.

Table 3: Number of workstations for all scenarios in the FlexSim simulation experimenter

Process	Scenario						
	1	2	3	4	5	6	7
Reception	3	2	2	2	1	1	1
Inspection	3	3	3	4	4	4	4
Weighting	2	3	4	3	3	2	4
Sorting	3	3	2	2	3	4	2

Table 3 illustrates the number of workstations for each process for each scenario. Scenario 1 is the current process. The others represented the alternative approaches to assigning employees (or workstations) to each process. For example, scenario 1 represented the production line consisting of 3 workstations for reception, 3 workstations for inspection, 2 workstations for weighting, and 3 workstations for sorting.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the performance of the model was investigated. Thirty replications were conducted and evaluated with four key performance indicators. Computational time was four hours (08.00 AM to 12.00 AM as a real-case study). The experimental results were designated as the 90% confidence interval for the studied phenomenon [23]. The experimental results are reported as follows.

A. Results Analysis

1) *Throughput*: The throughput analysis provides valuable insights into the system's process capacity and efficiency. The experimental results are illustrated in Figure 4 and Table 4.

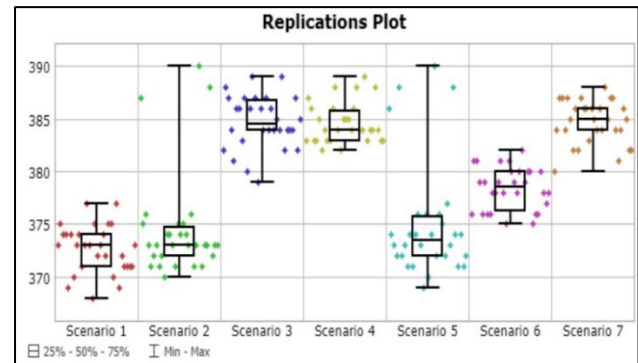


Figure 4: Replication plot of average throughput

Table 4: The experimental summarize of average throughput (units)

Scenario	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
1	372.63	2.25	368	377
2	374.53	4.93	370	390
3	384.73	2.49	379	389
4	384.60	1.89	382	389
5	375.03	5.52	369	390
6	378.40	1.99	375	382
7	384.73	2.07	380	388

Among the tested seven scenarios, Scenario 3 and Scenario 7 exhibited the highest mean throughput values of 384.73 units, followed by Scenario 4 with 384.60 units. Therefore, these three scenarios have the potential to achieve higher production rates compared to the other scenarios. On the other hand, Scenario 1 demonstrated the lowest mean throughput of 372.63 units, indicating a comparatively lower processing rate.

2) *Work in process*: WIP analysis (in Figure 5 and Table 5) provides insights into the level of congestion and inventory of the system.

Scenario 1 had the highest mean WIP of 65.26 units, indicating a higher accumulation of materials in the process.

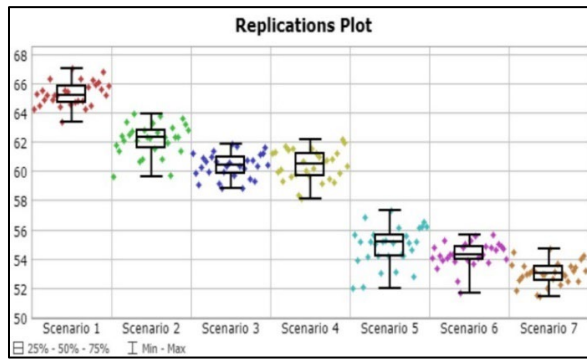


Figure 5: Replication plot of average WIP

Table 5: The experimental summarize of average WIP (units)

Scenario	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
1	65.26	0.82	63	67
2	62.16	1.09	60	64
3	60.37	0.84	59	62
4	60.40	1.04	58	62
5	54.86	1.33	52	57
6	54.30	0.84	52	56
7	53.01	0.79	51	55

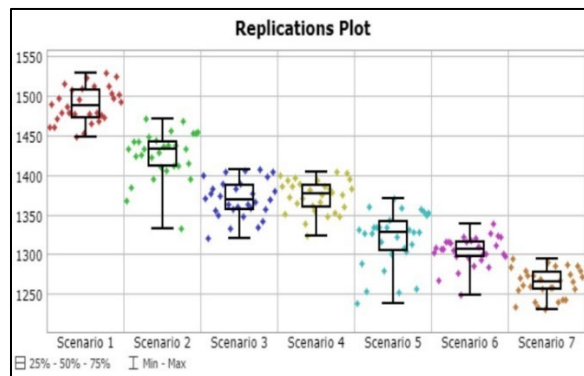


Figure 6: Replication plot of average stay time

Table 6: The experimental summarize of average stay time (seconds)

Scenario	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
1	1489.00	22.20	1449	1529
2	1425.90	30.00	1332	1471
3	1370.50	23.30	1321	1407
4	1373.90	20.40	1323	1405
5	1319.40	34.90	1238	1371
6	1304.10	18.70	1248	1339
7	1263.70	18.30	1231	1295

In contrast, Scenario 7 demonstrated the lowest mean WIP of 53.01 units, suggesting a less congested system. The WIP values of all scenarios fell within relatively narrow confidence intervals, indicating robustness in the results.

3) *Stay Time*: In Figure 6 and Table 6, stay time analysis represents the average time a unit spends in the system (in seconds) and indicates the overall efficiency and flow of units.

Scenario 1 exhibited the highest mean stay time of 1489.0 seconds, indicating that units spent more time in the system. Conversely, Scenario 7 had the lowest mean stay time of 1263.7 seconds, implying a more efficient flow of units through the system.

4) *Utilization*: Utilization analysis reflects the effective utilization of resources and facilities within each scenario. All scenarios resulted in Figure 7 and Table 7.

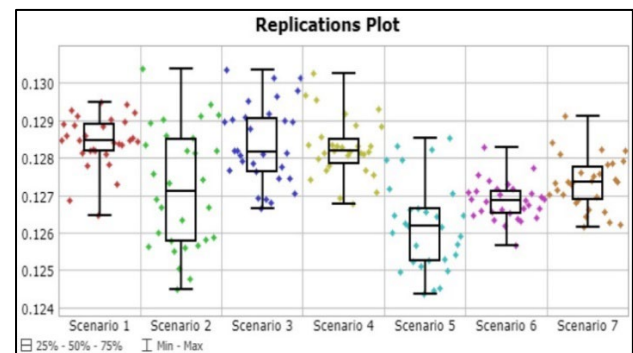


Figure 7: Replication plot of average utilization

Table 7: The experimental summarize of average utilization

Scenario	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
1	0.1284	0.0007	0.1265	0.1295
2	0.1272	0.0016	0.1245	0.1304
3	0.1284	0.0011	0.1266	0.1304
4	0.1283	0.0008	0.1268	0.1302
5	0.1262	0.0012	0.1244	0.1285
6	0.1268	0.0005	0.1257	0.1283
7	0.1273	0.0007	0.1262	0.1291



All scenarios demonstrated moderate utilization levels, with mean values ranging from 0.126 to 0.128. Scenario 1 had the highest mean utilization of 0.1284, while Scenario 5 had the lowest mean utilization of 0.1262.

B. Discussion

The results obtained from the simulation study offer valuable insights into the performance of different scenarios in the inbound logistics process for coconut manufacturing. Scenarios 3, 4, and 7 demonstrated the highest throughput, indicating their potential as efficient approaches with higher production rates. However, Scenario 1 had the lowest throughput, suggesting a need for further investigation to identify and address possible bottlenecks.

The analysis of WIP revealed that Scenario 1 had the highest mean WIP, indicating a higher level of congestion and potentially excessive inventory. In contrast, Scenario 7 exhibited the lowest mean WIP, implying a more streamlined and efficient flow of materials through the system. This finding highlights the importance of managing WIP to optimize the manufacturing process.

For stay time analysis, scenario 1 had the highest mean stay time. This indicated that units spent more time in the system in this scenario. On the other hand, scenario 7 had the lowest mean stay time, suggesting a more efficient flow of units through the system. Efficient stay times are crucial in improving overall production efficiency and reducing lead times.

The analysis of resource utilization indicated that all scenarios showed moderate utilization levels, with no significant deviations. This finding suggests that resource allocation across different scenarios is relatively balanced, but further optimization opportunities may exist to improve overall resource efficiency.

In conclusion, the simulation results provide valuable insights into the performance of different scenarios for the inbound logistics process in coconut manufacturing. Scenario 7 was a potentially efficient approach, with lower WIP, minimum stay time, and moderate utilization. However, further optimization and real-world validation are necessary to confirm the findings' implementation. The research outcomes support decision-making in enhancing the inbound logistics process and optimizing manufacturing operations for improving performance and competitiveness in the coconut industry.

Overall, this research provides a foundation for future studies in inbound logistics and/or coconut manufacturing optimization by demonstrating the implementation of the simulation model and evidencing its benefit in the area. This can serve as a basis for implementing efficient inbound logistics strategies in other industries as well. However, it is essential to consider other factors such as cost analysis and sustainability implications when making decisions based on the simulation results.

V. CONCLUSION

This research focuses on improving inbound logistics in coconut manufacturing through the FlexSim simulation software tool. The analysis of various improvement scenarios revealed that Scenario 3, Scenario 4, and Scenario 7 offered higher throughput. Scenario 7 demonstrated the lowest work in process and stay time, indicating its efficiency. Resource utilization was found to be moderate across all scenarios. The study recommends adopting strategies similar to those in Scenario 7 to enhance the inbound logistics process. However, real-world validation is essential to confirm the implementation of the findings. Overall, the research provides valuable insights for coconut manufacturers and serves as a stepping stone for future studies in

logistics optimization. By leveraging simulation techniques, manufacturers can make data-driven decisions to improve overall manufacturing performance and competitiveness in the market.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded and supported by the Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Project No. A1/2562

REFERENCES

- [1] A. J. G. Simoes and C. A. Hidalgo, "Fresh/Dried Coconuts," The Observatory of Economic Complexity (OEC), Rep. HS: 080110, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://oec.world/en/profile/hs/freshdried-coconuts>
- [2] S. Chawla and R. M. Singari, "Modelling and simulation of crankcase cover manufacturing in the automobile industry," *J. Sci. Ind. Res.*, vol. 82, pp. 597–602, Jun. 2023.
- [3] B. Santhosh Kumar, V. Mahesh, and B. Satish Kumar, "Modeling and analysis of flexible manufacturing system with FlexSim," *Int. J. Comput. Eng. Res.*, vol. 5, no. 10, pp. 1–6, Oct. 2015.
- [4] G. Jidong *et al.*, "Improvement of a furniture production line based on Flexsim" in *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. and Operations Manage.*, Harbin, China, Jul. 2021, pp. 133–143.
- [5] D. Liu, Y. Pan, and L. Li, "Logistics engineering simulation using computer 3D modeling technology," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2143, 2021, Art. no. 012018. doi: 10.1088/1742-6596/2143/1/012018.
- [6] S. Wang, S. Wang, and N. Zhang, "FlexSim-based simulation and optimization of green logistics distribution center," in *Proc. 14th Int. Conf. Comput. Model. and Simul.*, Chongqing, China, Jun. 2022, pp. 76–82.
- [7] U. S. Kumar and Y. S. Narayan, "Productivity improvement in a windows manufacturing layout using Flexsim simulation software," *Int. J. Res. Advent Technol.*, vol. 3, no. 9, pp. 86–90, Sep. 2015.
- [8] W. Liu and J. Lin, "Research on simulation and optimization of production line based on FlexSim," *Forest Chemical Rev.*, no. July-August 2022, pp. 1969–1985, May 2022.
- [9] N. Ononiwu, M. Macharia, and M. Al-Ali, "Application of discrete event simulation in industrial sectors: A case study," *Int. J. Adv. Eng. Manage. Sci.*, vol. 2, no. 10, pp. 1751–1757, Oct. 2016.
- [10] D. A. Pathak, "Improvement of manufacturing process by simulation technique: A case study," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 54–60, Jan. 2012.
- [11] N. Samattapapong, "Productivity improvement of tapioca packing process through simulation modeling analysis," in *Proc. 5th Int. Conf. Ind. Eng. and Appl.*, Singapore, Singapore, Apr. 2018, pp. 453–457.
- [12] S. Luscinski and V. Iwanov, "A simulation study of industry 4.0 factories based on the ontology on flexibility with using FlexSim software," *Manage. Prod. Eng. Rev.*, vol. 11, no. 3, pp. 74–83, Sep. 2020.
- [13] N. Medan, "Modelling and simulating a technological flow using the FlexSim application," *Scientific Bull. Ser. C: Fascicle Mechanics, Tribology, Mach. Manuf. Technol.*, vol. 35, pp. 62–66, 2021.
- [14] K. Zhang, "Logistics simulation and optimization design of car coating production line based on FlexSim," *Sci. J. Intell. Syst. Res.*, vol. 3, no. 7, pp. 1–7, 2021.
- [15] M. Krynke, "Manufacturing capacity management by using modern simulation tools," *Syst. Saf.: Human – Tech. Facility – Environ.*, vol. 3, no. 1, pp. 129–138, May 2021.
- [16] R. Poloczek and B. Oleksiak, "Modeling and simulating production process with the use of the FlexSim method," *Metalurgija*, vol. 62, no. 3-4, pp. 484–487, 2023.
- [17] A. A. Asante, M. Yin, C. K. Abbew, and D. Nyumuteye, "Optimizing the operational process of a cold chain fruit pack house," *Afr. J. Eng. Res.*, vol. 7 no. 3, pp. 64–73, 2019.
- [18] N. A. Hassan, A. I. Arogundade, U. B. Iyenagbe, and D. I. Musa, "Simulation and analyses of shea nuts (*Vitallaria paradoxa*) processing plant using FlexSim®," *J. Future Sustainability*, vol. 3, no. 2, pp. 67–74, 2023.
- [19] H. Min and Q. Yang, "Study on modeling and simulation of production logistics system based on FlexSim," *Academic J. Manuf. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 149–156, 2018.
- [20] J. Yuan and R. Zhang, "Analysis and optimization of bottlenecks via simulation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Eng. and Eng. Manage.*, Bangkok, Thailand, Dec. 2018, pp. 1879–1883.



- [21] N. Samattapong, "An efficiency Improvement in warehouse operation using simulation analysis," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.*, vol. 273, 2017, Art. no. 012013, doi: 10.1088/1757-899X/245/1/012013.
- [22] N. Samattapong, V. D. Cadenet, and P. Thongman, "Production sequence using simulation techniques: Case study of mineral production plants for dairy cow," in *Proc. 11th Annu. Int. Conf. Ind. Eng. and Oper. Manage.*, Singapore, Singapore, Mar. 2021, pp. 650–659.
- [23] M. Krynke, "Personnel management on the production line using the FlexSim simulation environment," *Manuf. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 657–667, 2021.

Increasing of Stretch Formability on Hole-flanging Parts of Aluminum Alloys by Smooth Sheared Surface

Phisith Muangnoy¹ Pongsakorn Leetrakul² Komgrit Lawanwong^{3*}

^{1,2}*Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus, Prachuap Khiri Khan, Thailand*

^{3*}*Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: komgrit.l@mail.rmuk.ac.th; komgrit.law@rmutr.ac.th

Received: 2 August 2023; Revised: 24 October 2023; Accepted: 13 November 2023

Published online: 27 June 2024

Abstract

Aluminum alloy is a lightweight material that fractures often occur during stretch forming, especially in the hole-flanging parts. However, the stretch formability of aluminum alloy increased by improving a smooth-sheared surface. The resistance of materials to edge fracture in complex shape forming is typically measured using the hole expansion ratio (HER). This paper presents the concave piercing punch design to increase smooth sheared surface which induces the increasing stretch formability of aluminum alloy. The effect of a smooth-sheared surface on stretch formability was examined via a hole expansion test (HET). The aluminum alloy grade AA1100, and AA5052 of 1.2 mm of thickness with three levels of clearance 5%t, 10%t, and 15%t were used in the experiments. The HER of aluminum alloy is influenced by a smooth sheared surface from conventional and concave piercing punch with varied clearances. In the experimental aspect, the clearance level and shape of the piercing punch, which are factors for the stretch formability of aluminum alloy, were observed by hole HER. The concave piercing punch design improves the hole expansion ratio more than a conventional piercing because a smooth sheared surface around the hole edge increases the hole expansion ratio.

Keywords: Aluminum alloy, Clearance, Hole expansion ratio, Piercing punch, Sheared surface

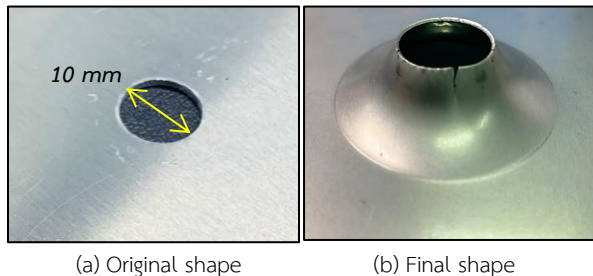
I. INTRODUCTION

Aluminum alloys offer a combination of low density and high strength, making them an excellent choice for vehicle body construction. Compared to traditional steel, aluminum alloys have approximately one-third the density, which translates into a considerable reduction in weight. Aluminum has several advantages that make it suitable for EV battery enclosures. Firstly, it has a low density, which means it is lighter than many other metals. This helps to reduce the weight of the vehicle, which in turn improves energy efficiency and extends the driving range. However, edge failure is one of the significant problems associated with forming operations, as shown in Fig.1. Thus, a new technique to increase stretch formability is essential. Some of the relevant research studies are summarized below.

Based on the findings of Gang *et al.* [1], it can be concluded that using ample clearance in the blanking process has a detrimental effect on forming quality. To ensure better quality outcomes, selecting an optimal clearance value that balances the desired level of material deformation, dimensional accuracy, and surface finish is advisable. Mori *et al.* [2] focused on understanding the relationship between the quality of the sheared edge and the stretch flange ability of high-strength steel sheets. By enhancing the sheared edge quality, they aimed to increase the material's formability and reduce the likelihood of failure during forming processes. Zhou [3] proposed expanding holes on the pulsed electromagnetic force using an electromagnetic cold-expansion process. Choi *et al.* [4] demonstrated that increasing the clearance and utilizing a negative inclined angle can benefit both the trimming load and the sheared edge quality when working with DP980 material. These findings provide valuable insights for optimizing the trimming process in manufacturing DP980 components. Tekiner *et al.* [5] studied the effect of different clearances on the quality of sheared edges on aluminum sheets.

They observed the clearance decreasing with the smooth-sheared and punch force increases. While the clearance increases, the die roll increases; on the contrary, sheared surface decreases. The study conducted by Sasada and Togashi [6] focused on investigating the influence of clearance on the rollover behavior of aluminum A1100P-O using image processing techniques. The rollover phenomenon refers to the folding or buckling of material during a metal-forming process. Adnan *et al.* [7] investigated the effect of clearance on the burr on the mild steel, brass, and aluminum in the blanking process. However, the effect of the clearance and burr height achieved by their report is beneficial solely for single-sheet blanking. Komgrit and Pongsakorn [8] revealed that the inclined trimmed punch could improve the quality of the sheared surface. Won *et al.* [9] introduced a new design for two-stage blanking to enhance the edge stretch ability of third-generation advanced high-strength steels (AHSS). The proposed design has undergone experimental validation using sheared edge tensioning, sheared edge quality, and microhardness tests. Park *et al.* [10] studied analyzing the effect of the hole-edge condition on the hole-expansion ratio (HER) of ferrite-bainite (FB) dual-phase steel. They confirmed that the damage caused by punching is critical to the formability of dual-phase steel. Prasad *et al.* [11] focused on investigating the influence of temper conditions on the edge formability of AA7075 alloy sheets using hole expansion tests. The researchers examined different tempers, including W-temper conditions, and employed punching and drilling techniques for hole preparation. Hance *et al.* [12] focused on investigating the impact of pre-hole shearing methods, such as punching, milling, wire-EDM cutting, laser cutting, and others, on the resulting damage at the edge of the hole. They aimed to assess the different levels of damage caused by these methods. In essence, several researchers have found that the specific technique

employed to prepare a hole affects the quality or characteristics of the central hole's edge. Since the HER parameter is sensitive to the condition of this edge, selecting the hole preparation method becomes crucial in determining the value or behaviour of HER [13]–[15]. From the literature review, stretch formability is an interesting topic for research papers. However, the increase in stretch formability on hole-flanging parts based on a smooth sheared surface from simple and quick die setups has yet to be reported. This research paper presents an alternative pre-hole shearing process designed to address the challenges faced by the industry in terms of setup complexity. A piercing punch with a concave shape is proposed for pre-hole shearing before the hole expansion test to increase the smooth sheared surface. The mechanism of the increase in hole expansion ratio is discussed with experiments on AA1100 and AA5052 sheets.



(c) Hole flanging application

Figure 1: Hole flanging application

II. EXPERIMENTAL SETUP

The overview of hole flanging operation

The following hole flanging experiment (as schematically illustrated in Fig. 2) was conducted: (a) pre-hole shearing, (b) hole flanging test, (c) measurement and analysis, and finally, (d) obtained hole flanging workpiece. To improve the quality of the hole surface that induces the increasing hole flanging ability, we provided two types of punch, a conventional punch and the concave punch design, as shown in Fig. 3. For the pre-hole piercing process, tool steel with high carbon and high chromium grade JIS SKD11 was used to make a punch and die.

The pre-hole shearing apparatus is also shown in Fig. 3. Three levels of piercing clearance (5%, 10%, and 15% of thickness) were applied to this experiment. In this work, the pre-hole shearing was performed dry conditions. For guidelines of the hole expansion test, we followed according to ISO/T16630-2009 [16]. The diameter of the hole was 10 mm. The increasing hole expansion ratio can be calculated by equation 1. An aluminum AA1100, and AA5052 sheets (thickness 1.2 mm) with dimensions of 100×100 mm were employed as workpiece material in the pre-hole shearing experiments.

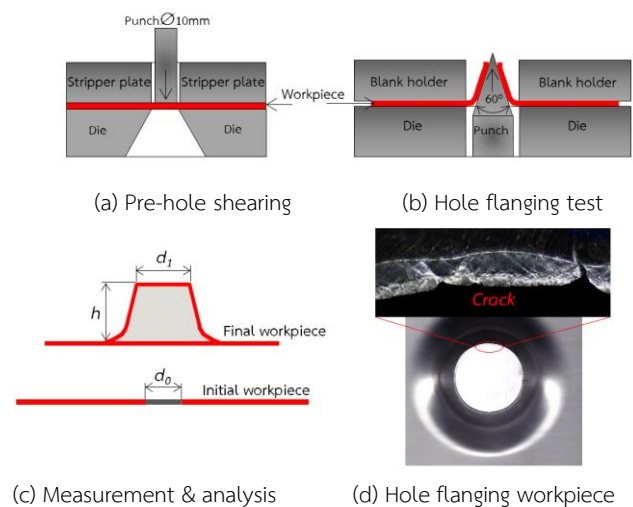


Figure 2: Schematic illustrations of hole flanging operation

$$\% \text{ HER} = \left[\frac{(d_1 - d_0)}{d_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

where d_0 = Diameter of the initial hole (10 mm)

d_1 = Diameter after rupture: mm (Average value)

The mechanical properties of the workpiece materials are listed in Table 1. To robust experimental data, every experiment was repeated five times for each material workpiece.

Table 1: Mechanical properties

Mechanical properties	Materials workpiece	
	AA1100	AA5052
Yield strength (MPa)	105	165
Tensile strength (MPa)	122	220
Elongation (%)	17.58	20.22

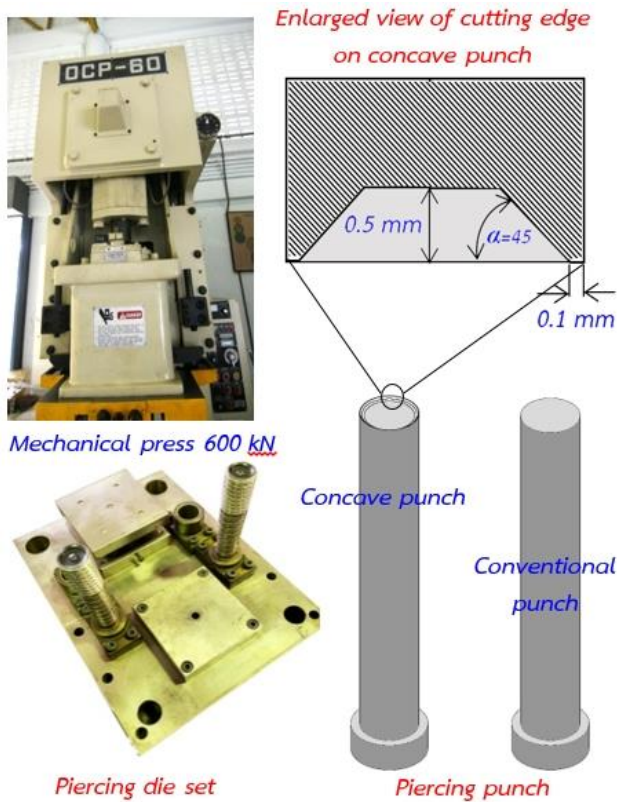


Figure 3: Pre-hole shearing apparatus

Hole flanging apparatus

Hole expansion tests were conducted according to ISO 16630-2009 on the universal testing machine (ERICHSEN Model 134), as shown in Fig. 4. A punch diameter of 50 mm with a conical head and an angle of 60° was used. The driving speed of the conical punch was 10 mm/min. The testing would be stopped when a crack propagation across the edge of the deformed sample workpiece occurred.

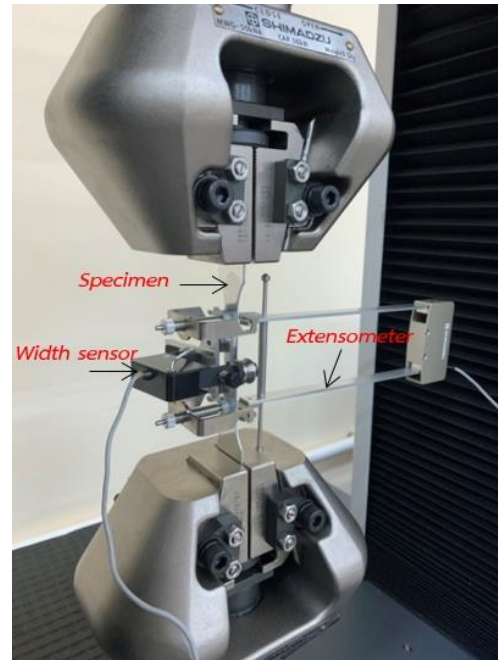


Figure 4: Hole flanging apparatus

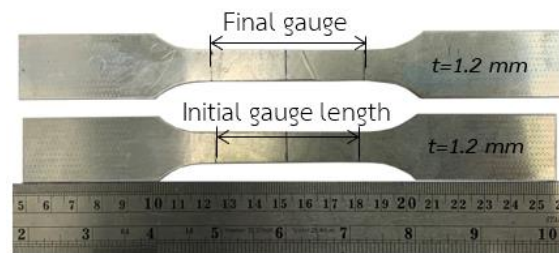
III. Finite Element Preparation

There are still many problems in sheet metal forming to be addressed in the real stamping industry. The finite element method will lead the way in advanced solutions that give you an understanding of the die design concept. To obtain the true stress-strain for the finite element analysis, the uniaxial tensile test according to JIS 13B standards with Shimadzu extensometer and width sensor was placed on the specimen as shown in Fig. 5.

To investigate the mechanism of cutting edge during piercing, an FE simulation (code DEFORM 2D) was conducted. The detail of the finite element setup is given in Table 2. The finite element model with a two-dimensional model (axis symmetry) was used to observe and investigate the deformation of a workpiece during piercing as shown in Fig.6. The solution algorithm employed in these Finite Element Model (FEM) simulations relies on the iterative Newton-Raphson method. Large plastic deformation would have occurred in the cutting edge of the workpiece therefore elastic calculation behavior will be discarded in this material model. The rectangular type with four-node elements (3,000 elements) was used for the finite element model. A fine element region is created in the cutting zone, followed by the application of adaptive remeshing. The automatic remeshing function was determined every three steps to control the excessive deformation on the workpiece during simulation. It prevents issues of element distortion, mesh tangling, or element size mismatch, which can affect the accuracy and stability of the simulation results. The plastic properties of workpiece materials are assumed isotropic and described by the Von Mises yield function. The number of simulation steps 120 with a punch displacement of 0.05 mm per step was applied to finite element simulation control. Tooling and workpiece material contact is ensured with a kinematic contact condition established through master-slave surface pairs in the initial step. In accordance with preceding research findings [8], an appropriate friction coefficient for the contact surface model falls within the range of 0.10 to 0.12, as defined by the classical Coulomb friction law.



(a) Universal testing machine for tensile test



(b) Sample workpiece

Figure 5: Uniaxial tensile test

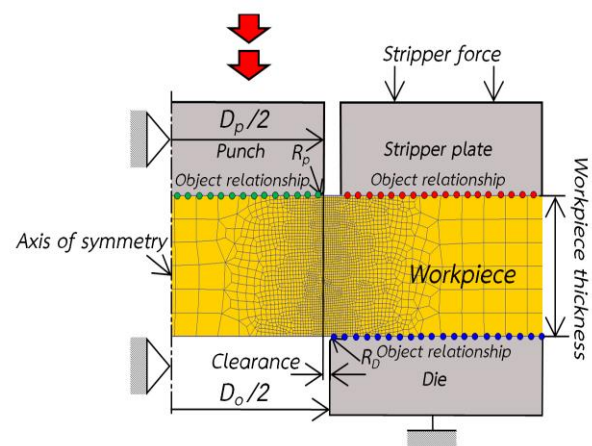


Figure 6: Finite element model for conventional piercing

Table 2: Finite element set up

Detail of finite element	
Tooling	Rigid body
workpiece	Elasto-Plastic
Flow curve	AA1100 $\bar{\sigma} = 168\epsilon^{0.21}$ AA5052 $\bar{\sigma} = 388\epsilon^{0.28}$
Mesh	3,000
Friction coefficient	0.12
Tip radius	0.02 mm

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Performance of a concave punch on quality of the cutting-edge workpiece.

As well known, the piercing die can produce a large number of workpieces in a short time. Before the piercing process, the cutting edge of the workpiece should be present. Figure 7 shows the details of cutting zones on a sheared edge of a workpiece. The characteristics zone on a sheared edge consisted of four points: die roll, sheared surface, fracture surface, and (θ) tearing angle.

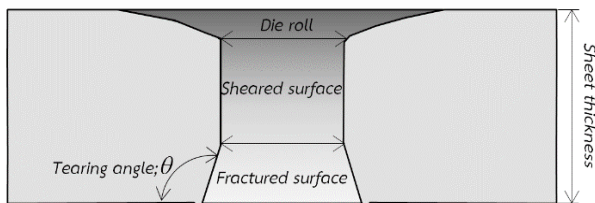
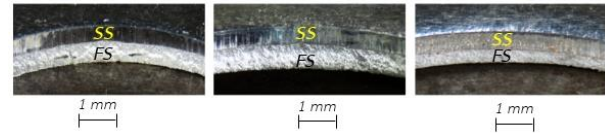


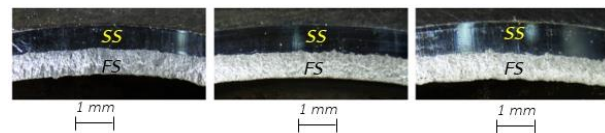
Figure 7: Characteristic zones on a workpiece obtained from piercing die

Figure 8 displays photos of cutting edges workpiece aluminum grade AA1100 and AA5052 corresponding with the experimental results of conventional punch and concave punch. For the case of conventional punch, the quality of the hole surface was poor (small sheared surface). Meanwhile, we obtained a large sheared surface from the new design, as shown in the concave punch condition.

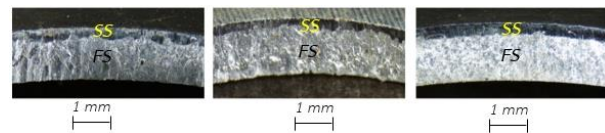
From these results, we ensure that the concave punch can generate a large sheared surface by responding with all piercing clearance.



(a) Cutting edge of AA1100 from conventional punch



(b) Cutting edge of AA1100 from concave punch



(c) Cutting edge of AA5052 from conventional punch



(d) Cutting edge of AA5052 from concave punch

Remark: SS: Sheared surface, FS: Fracture surface

Figure 8: Cutting edge of workpiece obtained from various piercing clearances

Generally, it is known that the quality of cutting-edge obtained from the piercing process depends on clearance levels [1-3]. Although, a narrow clearance can generate a large sheared surface. However, a problem with a high wear rate on a punch will occur. In addition, the die setup is complicated and needs labour-high skills. Therefore, a piercing process with large clearance is better than a narrow clearance.

Figure 9 shows the sheared surface results of the AA1100, and AA5052 workpieces obtained from conventional and concave punches with various piercing clearances. On the cutting edge of AA1100 material with conventional punch, a sheared surface rapidly decreases

with the clearance increasing at 15%. Meanwhile, a sheared surface obtained from the concave punch slightly decreased (see Fig.9 (a)). Figure 9(b) shows the tendency sheared surface of AA5052 obtained from conventional and concave punches. The results showed that a sheared surface pieced from a concave punch was more significant than a conventional punch. When the clearance increases, the sheared surface would be slightly decreased.

From the experimental results, we confirmed that the concave punch can generate a large of the sheared surfaces of all workpieces. Moreover, the concave punch can produce cutting-edge high-quality from a large clearance. This is a good advantage of the concave punch design over the conventional punch.

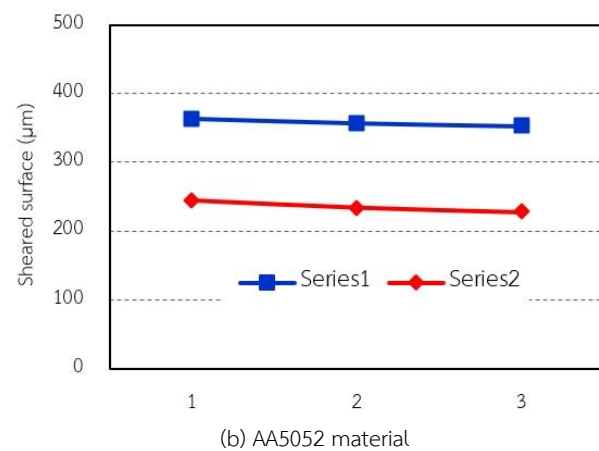
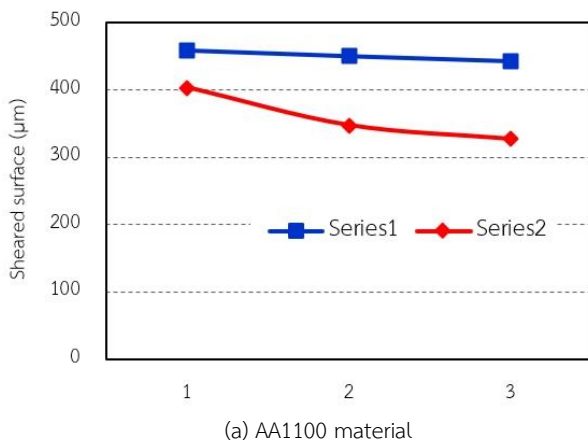


Figure 9: Summarized of sheared surface obtained from conventional punch and concave punch

B. Cutting edge analysis by FEM

Figure 10 shows the experimental results on the AA1100 sheets of clearance cross-section 10%t with similar depth penetration of conventional punch and concave punch designs.

The crack propagation occurred on the cross-section of the workpiece from the conventional punch, as shown in Fig. 9 (a)). In contrast, the concave punch designs can proceed with a deep stroke without cracking (see Fig. 9 (b)). We can keep a large sheared surface from these results since the concave punch designs did not generate quick crack propagation, so sheared surface would be increased.

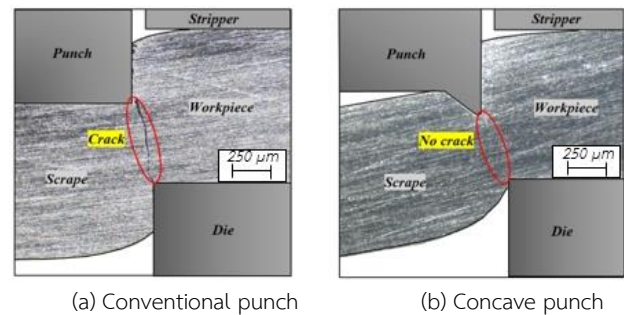


Fig. 10: Cracking during deformation of AA1100 with a constant piercing clearance of 15%t

The stress distribution during piercing of the AA1100 workpiece pieced by conventional punch and the concave punch designs with a constant piercing clearance of 10%t is given in Fig. 11. In the case of pieced by conventional punch, both materials, the tensile stress appeared under the stripper plate thus the large die roll becomes large. In addition, we found that the intensity of tensile stress expanded from the punch to the die at the shallow stroke (see Fig.11 (a)). For this reason, the crack propagation on cutting the workpiece from the conventional punch would occur faster than the new designs. For the concave punch designs, the expansion of intensity tensile stress occurred at the deep stroke (see Fig.11 (b)). When the

crack propagation is delayed, the sheared surface will be increased. From the above mention, we can generate a small die roll, a large sheared surface, and a fine surface texture with no narrow piercing clearance. That is a good advantage of this technology over the other processes.

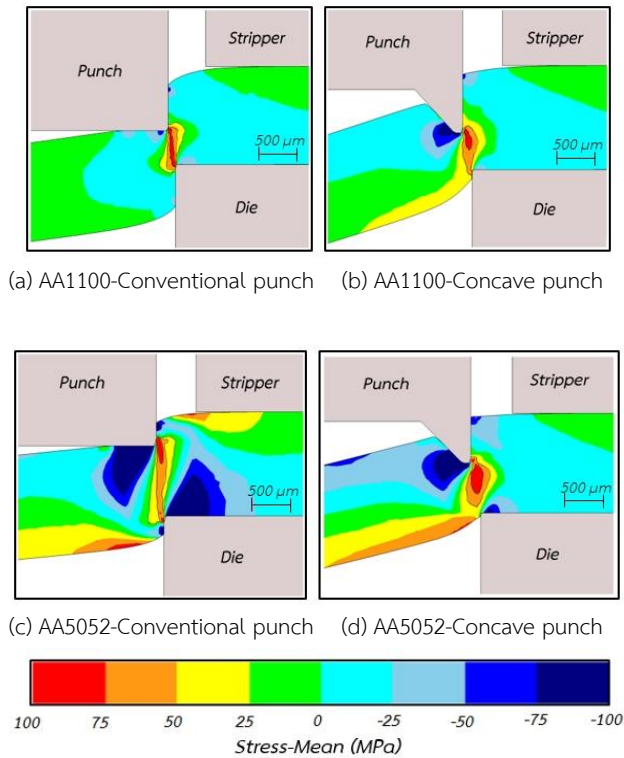


Fig. 11: Mean stress distribution during piercing of the AA1100 workpiece pierced by a conventional punch and the concave punch design with a constant piercing clearance of 15%t

C. Effect of concave punch on stretch flanging ability

Stretch flanging ability is commonly quantified by hole expansion ratio (HER). It is a simple method to understand edge fracture on materials. Fig.12 shows the HER obtained from the conventional and concave punches with AA1100 and AA5052 workpiece materials. The %HER can be calculated by equation 1, as shown in the previous discussion.

Considering the results from conventional punch (see Fig.12 (a)), it was found that AA1100 has a high %HER. When increasing a piercing clearance, the percentage of the hole expansion ratio was slightly decreased.

Table 3: Increasing of %HER obtained from the concave punch with various materials

Clearances	AA1100	AA5052
5%t	10.34%	54.54%
10%t	26.47%	45.65%
15%t	27.72%	27.72%

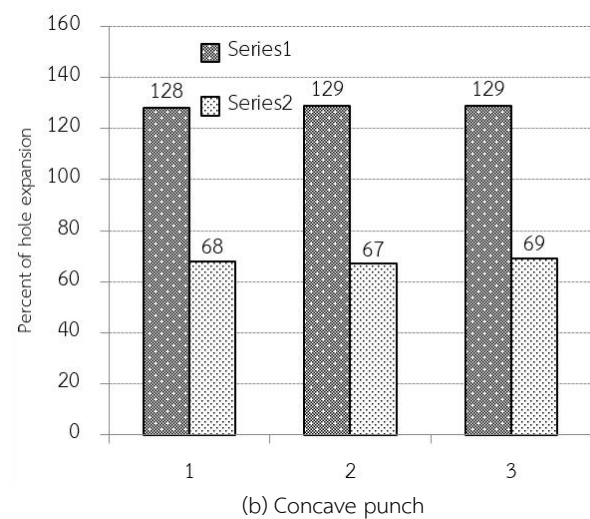
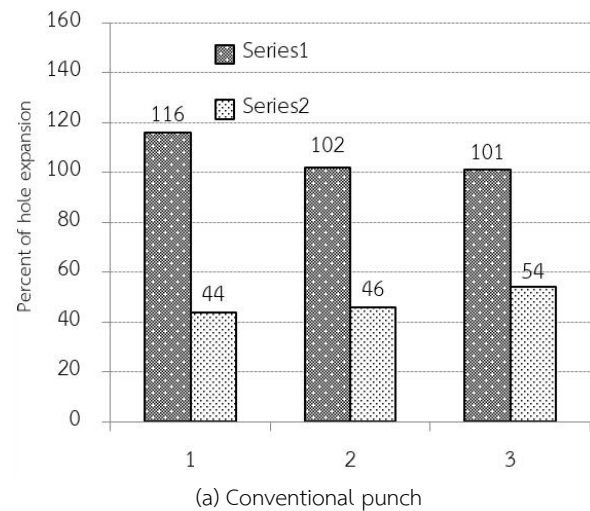
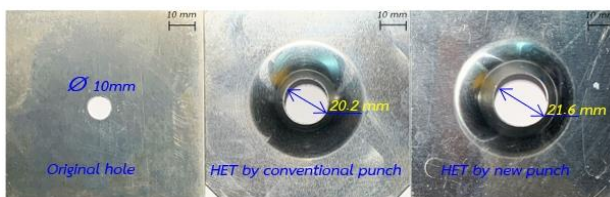


Figure 12: Summary of HER obtained from conventional punch and concave punch

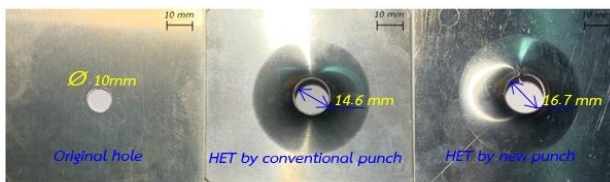
In the case of AA5052, we found the HER increased with increasing clearance. It corresponds to the cutting edge of the workpiece in Fig.8 (c). A large sheared surface can furnish a high percentage of the HER more than a small sheared surface workpiece. The results of Fig.12(b) show that the %HER obtained from the

concave punch has an almost similar trend to the results from the conventional punch. However, the %HER obtained from the concave punch has higher than a conventional punch. The increasing of %HER with AA1100, and AA5052 obtained from clearance 5%, 10%, and 15% are summarized as the table 3:

It should be noted that the concave punch can keep the HER of AA1100 and AA5052 with all clearance levels. Figure 13 shows a sample workpiece from the hole expansion test when pre-hole piercing by conventional punch and concave punch designs with a clearance of 10%. The hole size obtained from the concave punch was more significant than that pierced by a conventional punch. It is seen that a concave punch can increase hole-flanging ability.



(a) Sample of hole expansion of AA1100



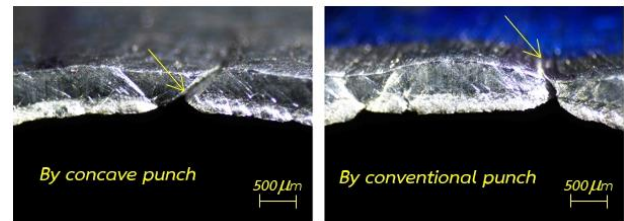
(b) Sample of hole expansion of AA5052

Figure 13: Hole flanging parts obtained from HET

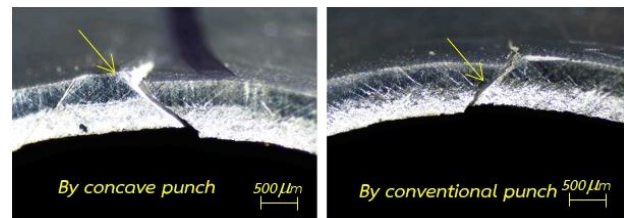
D. The cracking on hole a flanging part

Figure 14 (a) – (b) shows a crack observation on the hole edge of AA1100 and AA5052 after the hole expansion test when using the conventional and concave punches, respectively. In the case of pre-hole by conventional punch, it was observed that a severe crack appeared on the hole edge of the workpiece. On the other hand, the concave punch has a high potential for crack protection on the hole edge of three types of

aluminum sheet. The hole edge without crack leads to an increase in the hole flanging ability. Although an advantage of using the concave punch over the conventional punch has a slight increase in this work, it is necessary to develop this subject in the future.



(a) Cracking on AA1100 workpiece



(b) Cracking on AA5052 workpiece

Figure 14: Comparison of crack on hole edge after hole expansion when using concave punch and conventional punch

V. CONCLUSION

An alternative piercing punch shape has been proposed to increase the hole expansion ability of high-strength steel sheets. The research paper findings are concluded as follows:

- (1) The concave shape of the punch creates a gradual and controlled deformation on the material being punched, which helps to delay the propagation of cracks on the cutting edge.
- (2) Increasing the smooth sheared surface could increase the hole expansion ratio. The hole expansion ratio measures the ductility of a material, indicating its ability to undergo plastic deformation without fracture.
- (3) To enhance hole expansion ability in the aluminum alloy sheet stamping industry, we suggest utilizing a concave punch profile.

ACKNOWLEDGEMENT

Funding was also received from the Thailand Science Research and Innovation (TSRI) and Fundamental Fund of Rajamangala University of Technology Rattanakosin with funding under contract No. FRB6634/2023 /project code 181499/ Research project 2023. The authors would like to give our gratitude to the Department of Tools and Material King Mongkut's University of Technology Thonburi for supporting the finite element software and Institute of Research and Development Rajamangala University of Technology Rattanakosin.

REFERENCES

- [1] G. Fang, P. Zeng, and L. Lou, "Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quality in the blanking process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 122, no. 2–3, pp. 249–254, Mar. 2002.
- [2] K. Mori, Y. Abe, and Y. Suzui, "Improvement of stretch flangeability of ultra high strength steel sheet by smoothing of sheared edge," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 4, pp. 653–659, Mar. 2010.
- [3] Z. Zhou *et al.*, "Electromagnetic cold-expansion process for circular holes in aluminum alloy sheets," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 248, pp. 49–55, Oct. 2017.
- [4] H.-S. Choi, B.-M. Kim, and D.-C. Ko "Effect of clearance and inclined angle on sheared edge and tool failure in trimming of DP980 sheet," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 6, pp. 2319–2328, 2014.
- [5] Z. Tekiner, M. Nalbant, and H. Gürün, "An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal," *Mater. Des.*, vol. 27, no. 10, pp. 1134–1138, 2006.
- [6] M. Sasada and T. Togashi, "Measurement of rollover in double-sided shearing using image processing and influence of clearance," *Procedia Eng.*, vol. 81, pp. 1139–1144, 2014.
- [7] A. A. Kamarul Adnan, S. N. Azine, N. Norsilawati, and K. A. M. Izzul, "Analysis of the influence of the blanking clearance size to the burr development on the sheet of mild steel, brass and aluminium in blanking process," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 111, no. 1, pp. 26–32, Mar. 2022.
- [8] K. Lawanwong and P. Leetrakul, "FE simulations and experimental analysis of the blade angle effect on sheared surface in trimming process of advanced high-strength steel sheet," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, pp. 7909–7918, 2019.
- [9] C. Won, W. Lee, H. Lee, Y. Kang, and J. Yoon, "Effect of two-stage press blanking on edge stretchability with third-generation advanced high-strength steels," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 110, pp. 13–27, Aug. 2020.
- [10] S. Park *et al.*, "A dual-scale FE simulation of hole expansion test considering pre-damage from punching process," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 236–237, Feb. 2022, Art. no. 111312.
- [11] K. Prasad, A. S. Ebrahim, H. Krishnaswamy, U. Chakkingal, and D. K. Banerjee, "Evaluation of hole expansion formability of high strength AA7075 alloy under varying temper conditions," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2022, Art. no. 012038, doi: 10.1088/1757-899X/1238/1/012038.
- [12] B. M. Hance, R. J. Comstock, and D. K. Scherrer, "The influence of edge preparation method on the hole expansion performance of automotive sheet steels," *SAE Tech. Paper*, 2013, doi: 10.4271/2013-01-1167.
- [13] S. K. Paul, "Fundamental aspect of stretch-flangeability of sheet metals," *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, vol. 233, no. 10, 2019, doi: 10.1177/0954405418815370.
- [14] A. Karelova, C. Krempaszy, E. Werner, P. Tsipouridis, T. Hebesberger, and A. Pichler, "Hole expansion of dual-phase and complex-phase AHS steels – effect of edge conditions," *Steel. Res. Int.*, vol. 80, no. 1, pp. 71–77, Jan. 2009.
- [15] D. J. Branagan, A. E. Frerichs, B. E. Meacham, S. Cheng, and A. V. Sergueeva, "New mechanisms governing local formability in 3rd generation AHSS," *SAE Tech. Paper*, 2017, doi: 10.4271/2017-01-1704.
- [16] *Metallic materials — Method of hole expanding test*, ISO/TS 16630:2009, 2009.

Low Cost and Simple Soil Moisture Measurement Using Multi-Level Capacitive Technique

Phakpoom Punthukhan^{1*} René Pitayataratornb² Chonlatee Photong³

^{1,3}*Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand*

²*All Information Technologies Co., Ltd. (ALLIT), Khon Kaen, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: Phakpoom.ptk@gmail.com

Received: 24 August 2023; Revised: 30 August 2023; Accepted: 4 November 2023

Published online: 28 June 2024

Abstract

Global warming and climate change can cause water scarcity and drought for agricultural areas. Automatic irrigation can be one of the possible solutions for optimum water usage but has to cooperate with soil moisture measurement. However, the devices for soil moisture measurement at present are relatively expensive and require high technical setup and test skills; especially, for multi-depth soil moisture measurement. This paper proposes an alternatively low cost, simple soil moisture profile measurement using the multi-level capacitive technique. The proposed measurement technique was developed and tested by observing the moisture and water absorption capacity of sand, loam and clay soils at a depth up to 30 cm from the ground surface. It is found that the proposed measuring prototype could clearly classify levels of water infiltration, distribution and storage for particular different levels of the soil samples (The uncertainty values: RMSE from soils sandy, loam and clay by less than 8.50, 10.72, and 16.19 VMC%). The results also showed feasibility of the technique that could be used to study behavior of plants and crops in order to achieve the optimum water and moisture supply profile for different types of their roots in particular different soil depths for the best growth rate or quality.

Keywords: Automatic irrigation, Moisture measurement system, Precise farming, Simple real-time IoT-based, Soil water infiltration

I. INTRODUCTION

Agricultural industry is one of the most essential parts for country development for many countries, including Thailand [1]. Agricultural industry and agro-product export play an important role for the development of Thailand [2]–[4]. It is generally known that water is the important factor for agricultural cultivation, but problems related to water shortage and drought are still existing in Thailand because of global warming and climate change [5], [6]. It makes a water shortage for farmers to cultivate. When dehydrated plants result in the quality and productivity of agriculture will decline, the product is more expensive affecting the domestic economy. Precise farming with automatic irrigation technology could be used for optimum water usage for crops and saving water [7]–[9]. It also helps the plants to grow properly and get quality agricultural productivity [10].

To install the automatic irrigation system, soil moisture measurement devices with capability of real-time monitoring and multi-depth soil moisture profile measurement are needed [10], [11]. Unfortunately, these devices that are currently available in marketplace inherently have high prices, which would be difficult for the local farmers to effort.

II. LITERATURE REVIEW

A. Importance of Soil Moisture and Measurement Techniques

Soil moisture is the water that is in the gaps of soil. Soil moisture plays an important role for crops and plants, as well as, chemical, biological and physical of soil. This presents indirect soil moisture measurement using mainly the electrical-conductivity techniques [12], which are the well-known and commonly used technique for precise farming worldwide [13]. Measuring soil moisture to determine automatic irrigation not only helps farmers conserve water resources for their cultivation, but it

also helps to achieve higher quality yields by controlling the soil moisture according to plant needs. In addition, maintaining optimum soil moisture and structure will increase the soil's water retention capacity, which is an important part of preventing and managing flood risks [14]. Estimation of transpiration (ET) and soil moisture (SMC) It is important in food security research, water resource management, wildfire detection etc. [15].

Soil moisture measurement can be by direct method or indirect method. The direct methods such the gravimetric water content, but this method would take long testing time, destroy the soil, and not be possible for real-time monitoring. The indirect methods could be one of the following methods: heat-plus, remote sensing, hygrometric, EMI, capacitive, resistive [16]. Alternatively, Soil moisture measurement could be also divided by the output signals, which are Time Domain Reflectometry (TDR), Frequency Domain (FD), Reflectometry and Capacitance, Time Domain Transmission (TDT), Amplitude Domain Reflectometry (ADR) and Phase Transmission sensor [17].

From the literature review on the estimation methods of soil moisture and their operation time could be summarized that the direct measurement method such as gravimetric water content has high accuracy, low cost, but destroy soil and take long time. On the other hands, the indirect measurement method such Time Domain Reflectometry (TDR) and Ground Penetrating Radar (GPR) would be suitable for large area but could not be the cost-effective method and difficult for the forests compared to TDR method [18]. The criteria for the selection of the indirect soil measurement types are dependent on the types of soil and method to calibrate the measuring tools.

B. Capacitive Soil Moisture Sensor Theory

Capacitive soil moisture sensor has low price and plenty in the Thailand marketplaces.

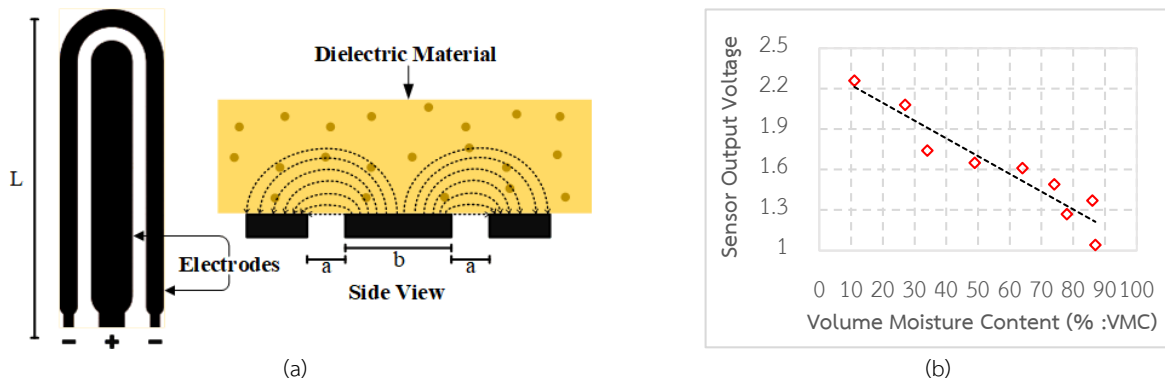


Figure 1: Capacitive soil moisture sensor probe V1.2 (a) structure [20]; (b) Percent moisture-voltage characteristic curves of the probe

These probes utilize the change of dielectric value when indirect contact with different amounts of moisture (water). In this way, the proposed device using capacitive technique offers advantages over the resistive technique as it prevents rusting. [19]; having a simple structure as shown in Figure 1 These probe types are rough, robust, precise and allowable for providing analogue output signal with voltage range between 3.3–5.0 V and thus easy to operate with a microcontroller.

C. Design and Development of a Multi-Level Soil Moisture Measurement

It is suggested in [20] that to measure soil moisture, the probe should be placed about 15 cm from the ground surface, and it would be better to use the multi-depth soil moisture measurement since different types of crops would require different amount of water for their roots. The research results of [21] showed that the traditional resistive probe would have some problem when contacting soil for a long time due to the corrossions; especially, when using in the deep soil ground. The research results in [22] also supported that the capacitive probe with 12 serial peripheral interfaces had higher efficiency and less cost than a single serial interface. In [23], the capacitive with the wireless data sensing based the Zigbee configuration for their designed fringing electric field probe could effectively

measure the soil moisture in the range of 1-80% but would work well only near surface soil ground measurement. The researchers [24] also developed a fast response, precise real-time soil moisture measurement using IoT with time multiplexing technique, which claimed that they achieved low cost and high accuracy measurement with the error less than 1.35%. Similarly, the capacitive based IoT module (SKU: SEN0193) was developed by [25], which provided creditable data, as well as, helped for precise moisture control for the investigated greenhouse. The research proposed in [26] employed solar power for a large, measured data storage system as the additional system for soil moisture tests, which helped for water prediction and management.

However, there are some concerns regarding the use of capacitive probes as follows. The research results in [27] suggested that preparation of soil in terms of cavity of soil affected the creditable measured results of soil moisture.

III. RESEARCH METHODOLOGY

In this research, we utilized low-cost and simple capacitive moisture sensors V1.2 in conjunction with a microcontroller board. The microcontroller board not only facilitated recording, analysis, and display of the measured data but also incorporated real-time functionality through an IoT application.

A. Design System and Construction of Prototype

The data Centre for agricultural information [28] Thailand uses over 238,803 square kilometers of agricultural land, which accounts for 46% of the total area of the country. Therefore, we have designed a simple, inexpensive soil moisture meter to replace expensive equipment with complex applications as well as causing widespread use among local farmers to take advantage of the soil moisture measurements. Figure 2a shows the design concept of the multi-level capacitive soil moisture measurement under this research. Simple commercial capacitive soil moisture sensors are inserted into the target soil levels. The measured data will be then sent to microcontroller board and then transmitted via the wireless module to

the end receivers (users). For greenhouses, several sets of measuring devices could also possibly be set up as shown in Figure 2b, and display screen (Looker studio of Google App) are shown in Figure 5 and 6.

We have applied Probe capacitive soil moisture sensor V.1.2 combined with module Wi-Fi (Table 1) which such equipment can be purchased in the country It is economical and farmers can search for how to use it from the Internet widely. The operation flowchart of the proposed device is shown in Figure 3, Electrical equipment connections are shown in Figure 4, while the transmitted data on the Google sheet (receiver) and the display screen (Looker studio of Google App) are shown in Figure 5 and Figure 6, respectively.

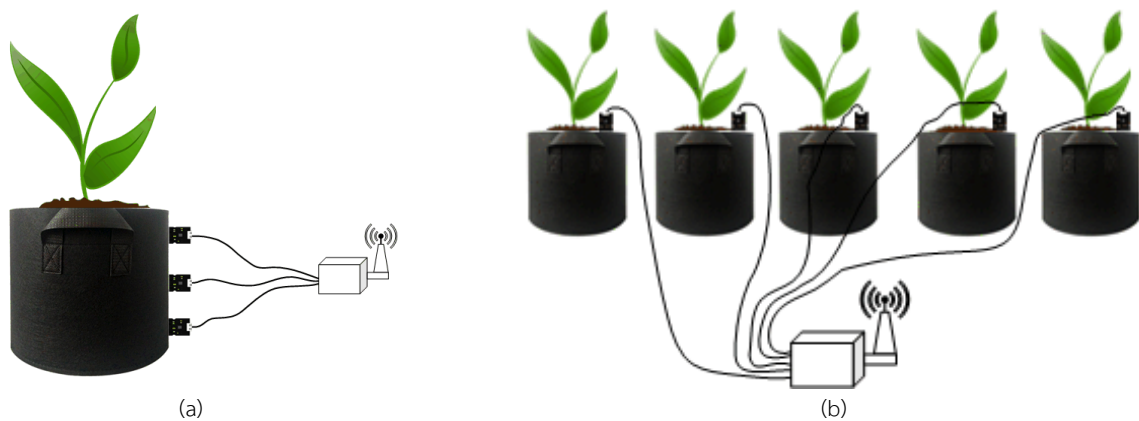


Figure 2: Design concept: (a) field implementation; (b) possible multi-measurement

Table 1: The total cost of the developed low-cost and simple capacitive soil moisture multi-level system

Component	Applied for	Units	Cost (฿)	Subtotal (฿)
Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2	Measure soil moisture.	5	50	250
ESP32 (DevKitC-32UE)	Process soil moisture values and send data to Google Sheet.	1	350	350
Other components	Equipment for system and infiltration tests in laboratory	1	1,500	1,500
Total (THB in 2023)				2,100

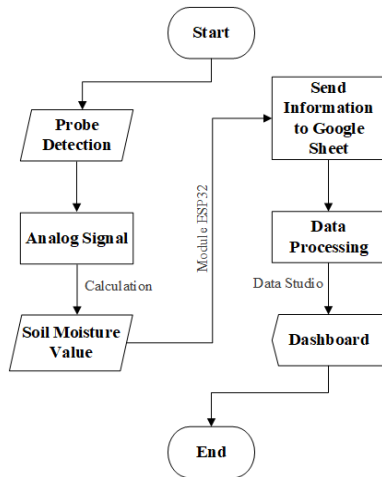


Figure 3: Operation flowchart of the proposed soil moisture measurement device in this research

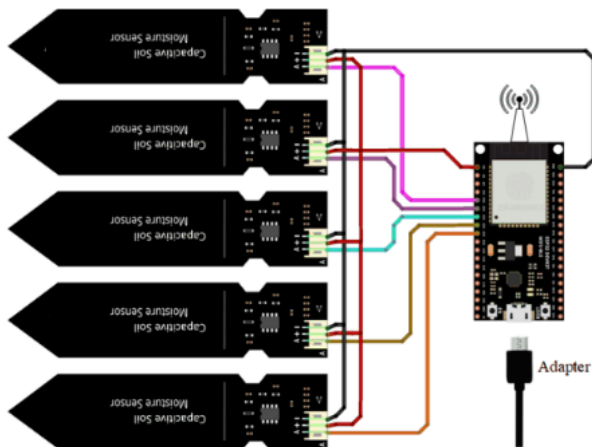


Figure 4: Device electrical wiring diagram in this research

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Date	Time	Depth 10 cm.	Depth 15 cm.	Depth 20 cm.	Depth 25 cm.	Depth 30 cm.					
63	11/4/2021	00:20:33	25	25	34	16	44					
64	11/4/2021	00:20:43	27	25	34	16	44					
65	11/4/2021	00:20:53	30	25	34	16	44					
66	11/4/2021	00:21:04	35	25	34	16	45					
67	11/4/2021	00:21:14	41	26	34	16	45					
68	11/4/2021	00:21:24	47	26	34	16	45					
69	11/4/2021	00:21:34	52	26	34	16	45					
70	11/4/2021	00:21:44	57	26	34	16	45					
71	11/4/2021	00:21:55	60	26	34	16	45					
72	11/4/2021	00:22:05	63	26	34	16	45					
73	11/4/2021	00:22:15	65	26	34	16	45					
74	11/4/2021	00:22:25	68	27	34	16	45					
75	11/4/2021	00:22:35	70	27	34	16	45					
76	11/4/2021	00:22:45	72	27	35	16	45					

Figure 5: Example of transmitted data in the Google sheet receive

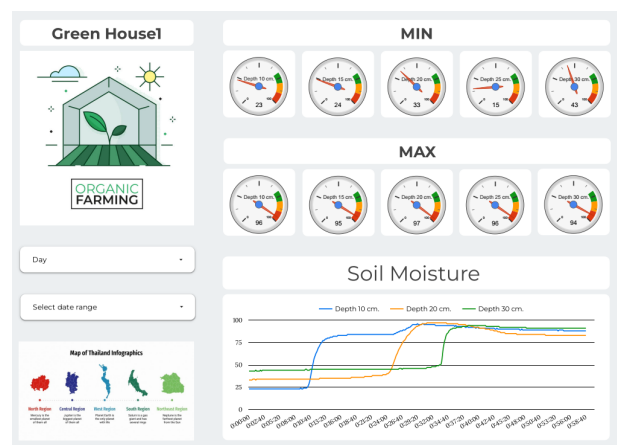


Figure 6: Display screen of the transmitted data collection

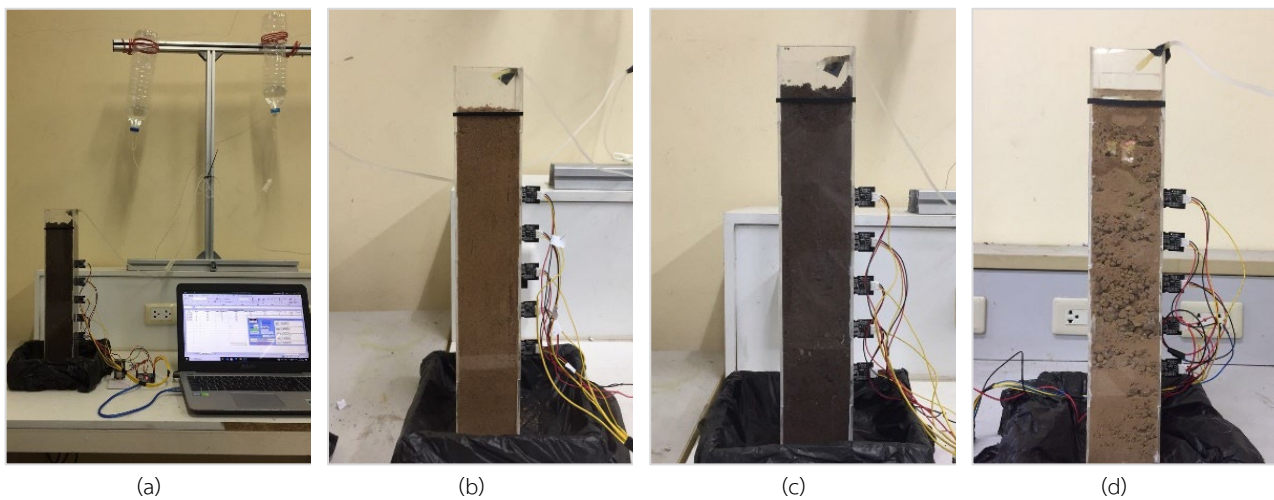


Figure 7: (a) Infiltration testing the proposed multi-level soil moisture measurement; (b) sandy soil; (c) loam soil; (d) clay soil

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 8–10 show the experimental test results obtained from the tests for sandy soil, loam soil and clay soil when placing the capacitive sensor at the depth of 10–30 cm with different amounts of supplying water of 150, 250, and 350 ml for 60 minutes. Regarding soil theory, it is generally known that the investigated soil types have the properties as shown in Table 2 [29].

Table 2: Approximate ranges in soil particle, water and nutrient holding capacities for soils of differing textures [29]

Soil Texture	Soil Particle Diameter (mm)	Available Water Holding Capacity (in/ft)
Sand or loamy sand	0.050 - 2.000	< 0.6
Sandy loam		0.6-1.0
Loam or silt loam	0.002 - 0.050	1.0-1.5
Clay loam		1.5-2.0
Clay	< 0.002	> 2.0

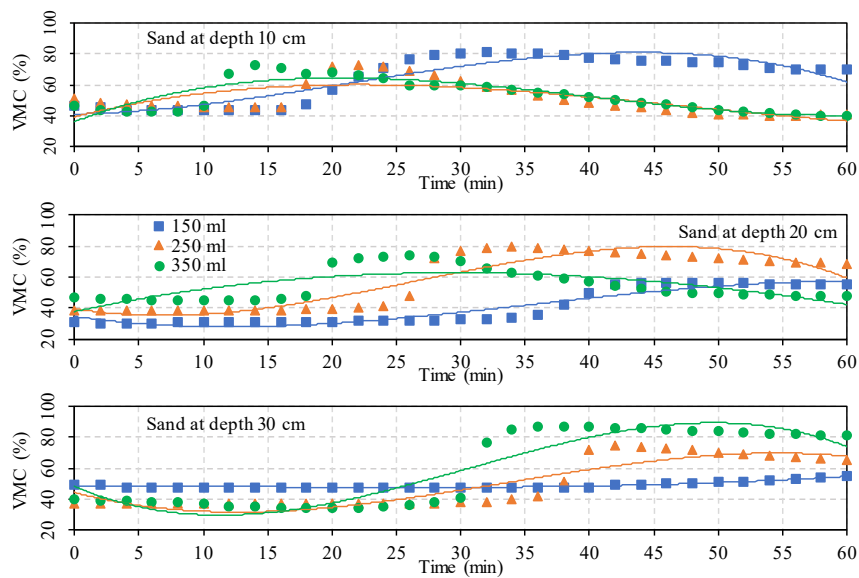


Figure 8. Test results and analysis of moisture values of sandy soil in different irrigation

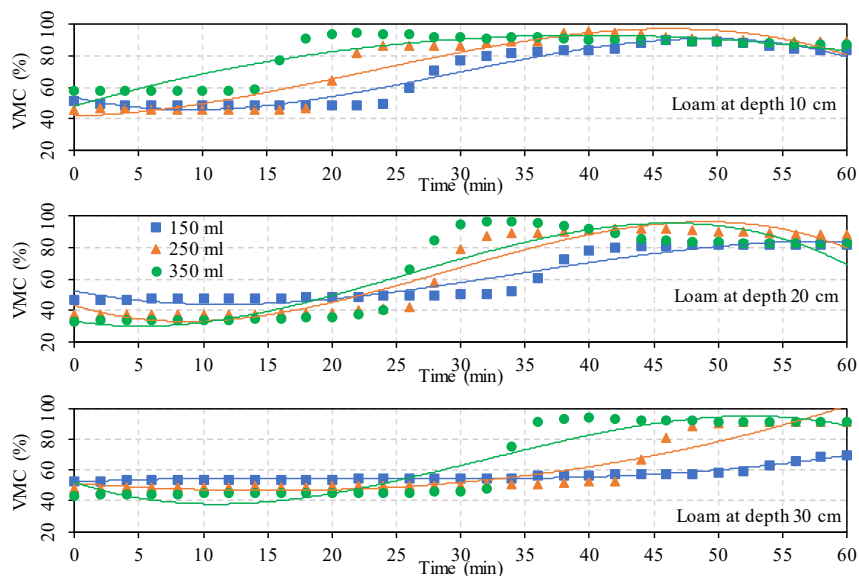


Figure 9. Test results and analysis of moisture values of loam soil in different irrigations

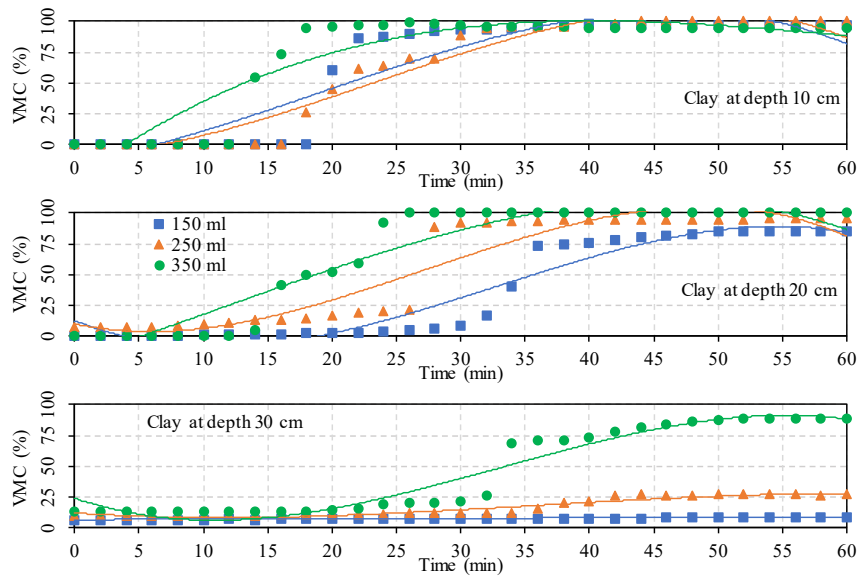


Figure 10. Test results and analysis of moisture values of clay soil in different irrigation

It can be seen from the test results that:

1) The proposed multi-depth soil moisture measurement device could be used to predict the behavior of the water absorption in different soil types correctly. For example, in Figure 8, for small amount of supply water of 150 ml, the top sensors could be measuring the moisture but the bottom sensors could not due to there was no water available to get down to the bottom. In turn, when the amount of water increased, the bottom sensors started to have some moisture appeared. Similar results would be found for the tests with the loam soil and clay soil in Figure 9 and Figure 10, respectively.

2) The proposed soil moisture measurement device could be used to predict the absorption rate of the soil in terms of the water and nutrient holding as shown in Table 2. It can be seen in Figure 8 that the sandy soil has low capacity of water holding capacity, which could be noticed from the rapid decrease of the tailing edge of the graphs. On the other hands, the loam soil and

clay soil would hold the amount of water well, which could be noticed from the nearly stable tailing edge of the graphs for both sample loam and clay soils as shown in Figure 9 and Figure 10.

3) The different of the graphs could be seen among the tests even with the same amount of water supplying and testing time (see Figure 8, 9 and 10). This reveals that the absorbing path of the water through the same soil type could be totally different. Therefore, only few moisture soil profiles would not be precisely predicting the water behavior of the soil, in fact, several measured profiles could be used for the more precise and accurate soil moisture profile measurement.

4) For field applied, sensor circuits need to be protected from environmental conditions (e.g., resin molding) for longer sensor life, including the use of signal interference-proof cables (e.g., Fuel Shield). In addition, Wi-Fi has a small coverage. In practice, the node might be too far from the Wi-Fi.

Table 3: Parameters of prediction of water absorption behavior of different types of soils and uncertainty of measuring systems

Soil	Depth	Water content	$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$				R ²	RMSE
			a	b	c	d		
Sand	10 cm	150 ml	-0.0009	0.0559	0.1455	41.005	0.86	5.79
		250 ml	0.0004	-0.0617	2.0956	39.227	0.54	7.56
		350 ml	0.0008	-0.1014	3.1068	36.182	0.77	6.21
	20 cm	150 ml	-0.0005	0.0588	-1.1802	34.493	0.90	5.33
		250 ml	-0.0014	0.1153	-1.3642	39.523	0.85	7.91
		350 ml	0.0001	-0.0349	1.7842	37.719	0.52	6.91
	30 cm	150 ml	9.00E-05	-0.0036	0.0036	48.507	0.97	0.31
		250 ml	-0.001	0.1044	-2.145	44.273	0.82	7.10
		350 ml	-0.0021	0.1931	-3.5496	48.267	0.87	8.50
Loam	10 cm	150 ml	-0.0014	0.1216	-1.8585	53.797	0.95	3.90
		250 ml	-0.001	0.0691	0.1942	41.946	0.89	6.94
		350 ml	7.00E-05	-0.0343	2.3783	48.159	0.80	6.38
	20 cm	150 ml	-0.0008	0.0819	-1.5754	52.524	0.91	4.77
		250 ml	-0.0019	0.1664	-2.4529	43.223	0.92	7.20
		350 ml	-0.0019	0.144	-1.3278	33.441	0.84	10.72
	30 cm	150 ml	0.0003	-0.0203	0.4089	52.185	0.95	1.04
		250 ml	0.0001	0.0165	-0.5792	51.374	0.88	6.02
		350 ml	-0.0016	0.1516	-2.7567	52.121	0.87	7.99
Clay	10 cm	150 ml	-0.0016	0.0915	1.7876	-14.109	0.86	16.19
		250 ml	-0.0019	0.1307	0.5094	-8.5757	0.94	10.10
		350 ml	0.0008	-0.1427	7.649	-27.913	0.85	15.13
	20 cm	150 ml	-0.0023	0.2288	-4.1569	12.832	0.92	10.52
		250 ml	-0.0025	0.2079	-2.1762	10.147	0.89	13.30
		350 ml	-0.0011	0.0376	3.271	-17.464	0.91	13.24
	30 cm	150 ml	2.00E-05	-0.0016	0.0719	6.8064	0.83	0.32
		250 ml	-0.0003	0.0366	-0.7063	12.338	0.92	4.07
		350 ml	-0.0019	0.192	-3.4855	24.162	0.93	8.73

To achieve high resolution of curve fitting, the 3rd order polynomial function was utilized for the measured results, which revealed that for sandy soils, the prediction coefficient ranged from 0.52 to 0.97, with an uncertainty range of 0.31 to 8.50 VMC%. Notably, the minimum and maximum values were obtained from the sensor at a depth of 30 cm. For loamy soils, the results showed that the prediction coefficient ranged from 0.80 to 0.95, with the highest values observed at sensors 10 and 30 cm. The corresponding

uncertainty ranged from 3.90 to 10.72 VMC%. Based on the test results, it can be concluded that sandy and loam soils exhibit increasing uncertainty values as the amount of irrigation increases. In the case of clay soils, the results indicated that the prediction coefficient ranged from 0.83 to 0.94. However, most uncertainty values exceeded ± 10 VMC% (ranging from 0.32 to 16.19). This is due to the density and gaps between soils, resulting in the observed variability.

It could be summarized from the results of the analysis according to table 3 that the proposed multi-depth soil moisture measurement using multi-level capacitive technique under this research could be used to predict the behavior of the soil water movement of different soil types among sandy soil, loam soil and clay soil. In contrast, unknown soil samples can also be tested and printed using the proposed soil moisture measurement technique as well. This multi-depth soil profile can be used for further studies to reduce uncertainty. This includes determining the appropriate or proper amount of water necessary for proper growth or optimal quality of agricultural products, and so on.

V. CONCLUSIONS

This paper proposes the new low-cost device to measure soil moisture for the multi-depth soil using multi-level capacitive moisture sensors V.1.2. The proposed device could be used to observe behavior of water absorption and water hold in the different types of soil and, in turn, could be used to test and identify the type of the soil sample. There were 3 types of soils used to examine and evaluate the proposed device in this research, which were the sandy soil, the loam soil and the clay soil. The test results showed that the proposed device could be able to produce the correct soil moisture profile, could be used to observe the capacity of water holding for the soil, proof that the water absorption by the same soil type can be totally different, and eventually, used to identify the type of the soil sample. These results facilitate the comprehension of the uncertainty associated with soil moisture measurement for each soil type. Consequently, it is advisable to perform calibration in areas requiring measurements to optimize efficiency.

This multi-depth soil profile could then be used for the further study on the suitable or optimum amount of water that would be required for the best growth or

the best quality of the agricultural products and so on. This is also to achieve the best utilization of the water for the cultivation during the shortage of water or during the drought season.

ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thank Mr. S. Kamlan, Mr. P. Ngijwchairach, Mr. T. Medfai, Mr. S. Phosrithong, Mr. N. Dankratok and Ms. S. Chaila (Team of students from the Faculty of Engineering, Mahasarakham University) that helped preparing the soil samples and experimental equipment in a laboratory. This study was financed supported by the Total Innovation Management Enterprise (TIME) project from the National Science and Technology Development Agency (NSTDA) of Thailand.

REFERENCES

- [1] A. Aher, J. Kasar, P. Ahuja, and V. Jadhav, "Smart agriculture using clustering and IOT," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 4065–4068, Mar. 2018.
- [2] N. Chomchalow, "Agricultural development in Thailand," in *Proc. Int. Symp. Syst. Approaches for Agricultural Develop.*, Bangkok, Thailand, Dec. 1991, pp. 427–443.
- [3] N. Poapongsakorn, M. Ruhs, and S. Tangjitwisuth, "Problems and outlook of agriculture in Thailand," *TDRI Quarterly Review*, vol. 13, no. 2, pp. 3–14, Jun. 1998.
- [4] T. Surasak, N. Wattanavichian, C. Preuksakarn, and S. C. Huang, "Thai agriculture products traceability system using blockchain and internet of things," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 10, no. 9, pp. 578–583, 2019.
- [5] O. Butenschoen, S. Scheu, and N. Eisenhauer, "Interactive effects of warming, soil humidity and plant diversity on litter decomposition and microbial activity," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 43, no. 9, pp. 1902–1907, Sep. 2011.
- [6] T. Khamkhunmuang, K. Punchay, and P. Wangpakapattanawong, "Cases of climate-smart agriculture in Southeast Asian highlands: Implications for ecosystem conservation and sustainability," *Agr. Nat. Resour.*, vol. 56, no. 3, pp. 473–486, 2022.



- [7] M. D. Dukes, E. H. Simonne, W. E. Davis, D. W. Studstill, and R. Hochmuth, "Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use," in *Proc. 2nd Int. Conf. Irrigation and Drainage*, Phoenix, AZ, USA, May 2003, pp. 665–674.
- [8] A. M. Amer and K. H. Amer, "Surface irrigation management in relation to water infiltration and distribution in soils," *Soil & Water Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 75–87, Sep. 2010.
- [9] L. N. dos Santos *et al.*, "Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities," *Agric. Water Manag.*, vol. 170, pp. 91–98, May 2016.
- [10] R. Nolz and W. Loiskandl, "Evaluating soil water content data monitored at different locations in a vineyard with regard to irrigation control," *Soil & Water Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 152–160, Jun. 2017.
- [11] D. L. Corwin and S. M. Lesch, "Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines," *Agron. J.*, vol. 95, no. 3, pp. 455–471, May 2003.
- [12] S. L. Su, D. N. Singh, and M. S. Baghini, "A critical review of soil moisture measurement," *Meas.*, vol. 54, pp. 92–105, Aug. 2014.
- [13] N. Jorapur, V. S. Palaparthi, S. Sarik, J. John, M. S. Baghini, and G. K. Ananthasuresh, "A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 233, no.1, pp. 108–117, Sep. 2015.
- [14] L. Koutný, J. Skoupil, and D. Veselý, "Physical characteristics affecting the infiltration of high intensity rainfall into a soil profile," *Soil & Water Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 104–110, Aug. 2014.
- [15] W. W. Verstraeten, F. Veroustraete, and J. Feyen, "Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation," *Sensors*, vol. 8, no. 1, pp. 70–117, Jan. 2008.
- [16] A. K. Singh *et al.*, "Soil moisture sensing techniques for scheduling irrigation," *J. Soil Salin. Water Qual.*, vol. 11, no. 1, pp. 68–76, Jan. 2019.
- [17] P. Dobriyal, A. Qureshi, R. Badola, and S. A. Hussain, "A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management," *J. Hydrol.*, vol. 458–459, pp. 110–117, Aug. 2012.
- [18] I. A. Saeed *et al.*, "Performance analysis of dielectric soil moisture sensor," *Soil & Water Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 195–199, Oct. 2019.
- [19] J. Hrisko, "Capacitive soil moisture sensor theory, calibration, and testing," Maker Portal LLC, New York, NY, USA, Jul. 5, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342751186_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_Theory_Calibration_and_Testing
- [20] Z. Gao, Y. Zhu, C. Liu, H. Qian, W. Cao, and J. Ni, "Design and test of a soil profile moisture sensor based on sensitive soil layers," *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1648, May 2018.
- [21] J. D. González-Teruel, R. Torres-Sánchez, P. J. Blaya-Ros, A. B. Toledo-Moreo, M. Jiménez-Buendía, and F. Soto-Valles, "Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 491, Jan. 2019.
- [22] S. Sulaiman, A. Manut, and A. N. Firdaus, "Design, fabrication and testing of fringing electric field soil moisture sensor for wireless precision agriculture applications," in *Proc. Int. Conf. Inf. and Multimedia Technol.*, Jeju, South Korea, Dec. 2009, pp. 513–516.
- [23] Q. Shi, Y. Shi, X. Liu, S. Mei, and L. Feng, "A high-sensitivity multilayer soil moisture monitoring sensor based on a double high-frequency tuning detection circuit," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 16, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.1177/1550147720907826.
- [24] E. A. A. D. Nagahage, I. S. P. Nagahage, and T. Fujino, "Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system" *Agriculture*, vol. 9, no. 7, p. 141, Jul. 2019.
- [25] A. M. Okasha, H. G. Ibrahim, A. H. Elmetwalli, K. M. Khedher, Z. M. Yaseen, and S. Elsayed, "Designing low-cost capacitive-based soil moisture sensor and smart monitoring unit operated by solar cells for greenhouse irrigation management," *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5387, Aug. 2021.
- [26] P. Placidi, L. Gasperini, A. Grassi, M. Cecconi, and A. Scorzoni, "Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks," *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3585, Jun. 2020.
- [27] S. Özmen, R. Kanber, P. Steduto, M. Ünlü, Y. Aydin, and K. Diker, "Distribution of water loss via evapotranspiration in a pistachio tree orchard under drip irrigation and non-irrigation conditions," *Soil & Water Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 56–63, 2015.

- [28] Office of Agricultural Economics, “Agricultural Statistics of Thailand 2021,” (in Thai), Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, Accessed: Jan. 31, 2022. [Online]. Available: https://www.oae.go.th/assets/portals/1/ebookcategory/68_yearbookedited2564/
- [29] S. Grant, “Soil Texture and Vineyard Management,” Lodi Winegrape Commission, Lodi, CA, USA, Accessed: Jan. 31, 2022. [Online]. Available: <https://www.lodigrowers.com/>

Method Enhancement of Quality Control in Brake Pads Manufacturing

Werawit Phiewruangnont¹ Meechai Sriwiboon² Toemsak Srikhirin^{3*} Somkid Amornsamankul⁴
Kanyaratt Supaibulwatana⁵ Banpot Horbanluekit⁶

¹*School of Bioinnovation and Bio-based Product Intelligence, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand*

²*Compact International (1994) Co., Ltd., Phetchaburi, Thailand*

^{3*}*Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand*

⁴*Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand*

⁵*Department of Biotechnology, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand*

⁶*National Science and Technology Agency (NSTDA), Pathum Thani, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: toemsak.sri@mahidol.ac.th

Received: 19 September 2023; Revised: 25 February 2024; Accepted: 26 February 2024

Published online: 28 June 2024

Abstract

The disc brake production is coupled with a defect detection process to control quality. The current manufacturing quality is high. However, detection relies on visuals by the operator, posing challenges in terms of accuracy and time. In a high-quality production, using human labor for detection is time-consuming and labor-intensive. This research is aiming at exploring the possibility of applying object recognition using deep learning approach for the in-line defects detection on disc brake pads. Faster R-CNN, Scaled YOLOv4, and YOLOv5s were compared for the detection of two major commonly defective brake pads of brake pad model A. The main criteria for the detection are (a) the detection time must be shorter than residence time of brake pads on the detection station on the conveyor, at 498 milliseconds, and (b) the precision must be higher than 70%. The detection time and precision of YOLOv5s, Scaled YOLOv4, and Faster R-CNN are at 13.9 ms and 83%, 20.0 ms and 83%, and 20.2 ms and 92%, respectively. The detection time of all algorithms investigated in this study is far shorter than the residence time at the checking station with the precision exceeding the criteria. The training time for Faster R-CNN, 220 ms, is five times longer than that of YOLOv5s (49 ms) and Scaled YOLOv4 (41 ms). All three algorithms are capable of real-time detection and yield a consistent result on both splits and poorly consolidated friction material workpieces. Faster R-CNN is chosen because it has the highest precision.

Keywords: Brake pad, Deep learning, Defective brake pad detection, Real-time detection

I. INTRODUCTION

Disc brake pads are a key component of a disc brake system when the driver presses on the brake pedal, the pressure is transmitted through the brake fluid. This pressure pushes the brake caliper, causing the brake pads to clamp onto the brake rotor. This creates a friction force between the brake pads and the rotor, the friction material from the brake pad is transferred to the rotor surface. This transfer of friction material creates a frictional force known as adherent friction. Adherent friction is the frictional force generated when certain layers of the brake lining adhere to the rotor surface. This increased friction force helps to slow down and stop the vehicle. The brake pads are made of a friction material consisting of filler, binder, abrasive, lubricant, and fiber that is designed to be less stiff than the rotor and to wear down over time. These raw materials are blended using a high-speed mixer to create a homogeneous mixture. The mixture is placed in a mold and undergoes curing. Finally, the decoration, where the surface is smoothened, grooves are carved and painted prior to attaching accessories to achieve an attractive appearance.

The quality control and reliability of the brake pads are very important because it means the safety of the driver. Currently, defect detections for brake pads rely on visual inspection by operators, which is time-consuming and low-efficiency. The accuracy is uncertain and dependent on the experience and fatigue of the workers. Additionally, the small size of defects makes them difficult to detect.

The total number of defects in all models was around 2% of total production. They originated from various sources including 0.04% from mixing process, 0.6% from curing process, and 1.3% from decorating process. Brake pads model A were produced during the research period and found defects. In the process of decorating, the number of defects in Model A is

relatively low to generate a dataset, but the critical issue with Model A lies in the vulnerability arising from the lack of defects in other brake pad models. Indicates that the production is of high quality whereas the method of detector is labor-intensive and time-consuming, even though the defects are few. This results in labor inefficiency. This led to the selection of Brake Pad Model A for research purposes.

In object detection, convolutional neural networks inside deep learning algorithms have enhanced precision and speed. There are two categories of object detection algorithms: one-stage detectors and two-stage detectors. Input image features are features extracted in the Backbone by the feature extractor and sent to the Neck and Head to detect objects inside the image. Neck aggregate features are blended and combined feature from the Backbone to be ready for detection in the Head. The Head serves to detect objects, detection includes classification and localization for each bounding box. The two-stage detector separates the functionality of feature aggregation, localization, and classification and then combines results later, called Sparse detection. However, single-stage detectors perform all steps simultaneously, referred to as Dense Detection. An example of a two-stage detector is the Faster R-CNN which is high precision, but it is a low speed because of the deep network structure. While one-stage detectors (YOLO) have rapid processing capabilities. Object detection based on deep learning has been applied in many fields such as road surface crack detection using the YOLOv5 [1], detection and classification of plant pathology using the YOLO series and Faster R-CNN [2], finding the landing area of the plane [3], pest detection using old and new versions of the YOLO detector [4], identifying the disc brake pad model, etc.



Figure 1: Research workflow in this study.

This study aims to explore deep learning techniques for detecting defective brake discs composed of splits and poorly Consolidated friction material, using YOLOv5s, Scaled YOLOv4, and Faster R-CNN algorithms. The study refers to the ISO/PAS 22574:2007 standard for referencing the characteristics of defective with the research process as shown in Figure 1.

II. LITERATURE REVIEW

This section explains three algorithms used in this study and applications for defect detection are reviewed.

Faster R-CNN is a 2 stage object detection algorithm [5]. The structure of Faster R-CNN consists of a region proposal network (RPN) and a detection network (Fast R-CNN). The working methodology of Faster R-CNN is shown in Figure 2. The RPN generates a set of region proposals, which are then fed into the detection network to classify and refine the proposals [6]. The processing of the region proposals to output class labels and bounding boxes for each proposal is done by Fast R-CNN network which is part of the detection network in Faster R-CNN.

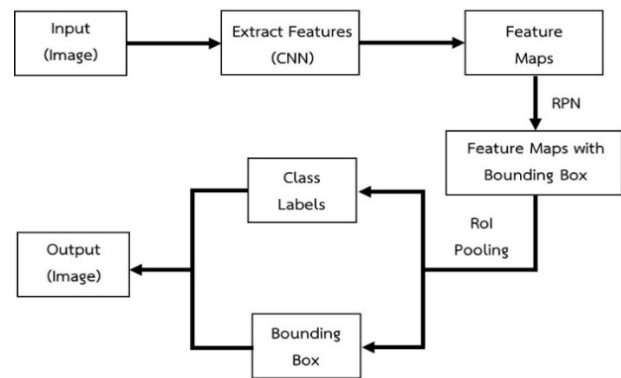


Figure 2: Faster R-CNN structure diagram.

Scaled YOLOv4 is a variant of the YOLOv4 object detection algorithm that has been modified to run on multiple GPUs and to scale to larger input image sizes [7]. Scaled YOLOv4's structure consists of an input layer and feature extraction. The first layer in the network is the input layer, which receives the input image and then forwards it to the feature extraction component. The feature extractor extracts features from the input image, which are then forwarded to the network made up of several convolutional and fully connected layers. The output of the network is a set of bounding boxes and class scores corresponding to the objects present in the image. Although Scaled YOLOv4 is an algorithm modified from an obsolete YOLOv4. Studies have shown that the performance of Scaled YOLOv4 is nearly equal to that of YOLOv5 [8]. Therefore, Scaled YOLOv4 was chosen in this study.

YOLOv5 is a one-stage detector that includes preprocessing and feature extraction. Preprocessing is taken to prepare an input image for processing that includes resizing, normalization, data augmentation, and noise reduction. The feature extraction process consists of several layers of convolutional and pooling operations. The features are extracted from the input image through the application of convolutional layers. The pooling layer reduces the size of the feature map produced by the convolutional layers, improving the model's generalization ability by decreasing the sample

size. The Fully connected layer gets extracted features combines the feature maps and makes predictions about the presence and location of objects in the image as shown in Figure 3.

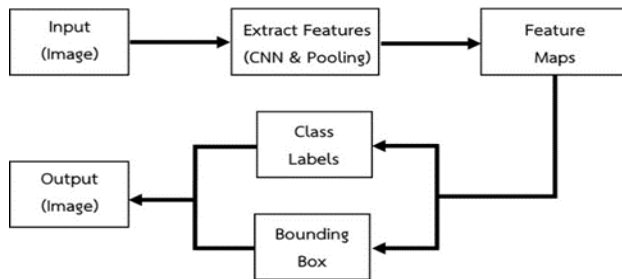


Figure 3: YOLOv5 structure diagram.

The family of YOLOv5 (s, m, l, and x) is designed to trade off accuracy and speed, with larger models tending to be more accurate but slower, and smaller models being less accurate but faster. According to research studies related to the YOLOv5 family. The members' detection accuracy was fairly similar, however, the speed of detection varied greatly [9]. Thus, YOLOv5s was chosen due to its fast detection to be applied to fast-moving brake pads on the conveyor.

YOLOv5 detector has four variants s, m, l, and x to detect defects on particleboard surfaces [10]. The particleboard defects that we aim to detect come in five different types. Training the detector took 300 epochs. YOLOv5s was trained in 9.6 hours while YOLOv5x took 6 days to complete. All four detectors demonstrated a detection precision of over 90%. YOLOv5s had the fastest detection time at only 0.047 seconds, while YOLOv5x had the slowest at 0.069 seconds.

The YOLOv5 was used to identify different types of mold on food surfaces [11]. The dataset was enhanced through data augmentation before training. YOLOv5 was compared to YOLOv3 and YOLOv4 and achieved a precision rate of 98.1%, and had the highest recall rate of 100%.

The YOLO detector was used to detect traffic signs for application in autonomous vehicles [12]. All four versions of YOLOv5 detectors are trained with 50 epochs. The detection precision of the four models is over 80%, YOLOv5x minimum precision is 83% while YOLOv5m and YOLOv5l precision is 87%. The fastest model to detect road marking signs is YOLOv5s, which is only 24.6 FPS. The processing of YOLOv5x is 1.7 FPS which is the slowest among the four detectors.

The YOLOv5 model was compared with Faster R-CNN and YOLOv3 models in detecting spot knots on saw timbers [13]. The training datasets were reduced from 80% to 50% during the training session. As the number of training datasets decreases, the mAP also decreases. YOLOv3 has the largest weight file size, while Faster R-CNN has the longest training time.

YOLOv5 series models, including YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l, and YOLOv5x inspect helmets [14]. The mAP of all YOLOv5s series is over 90%. The YOLOv5s processing peaks at 110 FPS, which is the highest among other series. YOLOv5x is the slowest processing at 21 FPS, but it has a high mAP of 93.6%.

Faster R-CNN detects leaves in complex natural environments to develop smart agriculture [15]. The model was applied to identify sweet potato leaves and the dataset consisted of 8,086 images with varying leaf densities. The model training is set for 50 epochs. In the testing session, the superiority of Faster R-CNN over YOLOv5 is shown in terms of precision and recall.

Faster R-CNN and YOLOv3 were used to detect people wearing face masks during the Coronavirus disease outbreak [16]. The dataset consists of both masked and non-masked people. The mean precision of Faster R-CNN is slightly better than YOLOv3 by only 7%. The processing time of YOLOv3 was almost 3.5 times of Faster R-CNN. In general places, CCTV cameras are used. Therefore, speed is more important, and YOLOv3 is suitable for face mask detection.

The CNN models include YOLOv3, YOLOv4, and YOLOv5. estimate white grape yields [17]. The YOLOv3 and YOLOv4 models require more than 15 hours of training time, whereas the YOLOv5s and YOLOv5x models require 4.6 and 7 hours, respectively, to complete the training process. The models YOLOv4, YOLOv5s, and YOLOv5x have a mAP of over 70%, with YOLOv5s able to process 61 FPS.

YOLOv5s, YOLOv5m, and YOLOv5l are applied to the grasping robot [18]. The dataset contains letter wooden blocks, shape wooden blocks, punctuation wooden blocks, and blank wooden blocks. The test results show that the precision and recall of the three detectors are over 98%. The training time of YOLOv5s is the shortest, only 18 hours, while the longest training time of YOLOv5l is 21 hours. The YOLOv5s processing time is the shortest, only 35 milliseconds. The YOLOv5l's computation time takes the longest to 77 milliseconds.

The YOLOv5 detector family detects the flight of birds [19]. All detector is trained with 20 epochs. The mAP of YOLOv5s, YOLOv5m, and YOLOv5l is above 80%. Except for YOLOv5x, the mAP is 79%. The trend of mAP is like with recall. YOLOv5s, YOLOv5m, and YOLOv5l have a recall rate of over 85%, while YOLOv5x has a recall rate of 83%.

The YOLOv5s and YOLOv3 detectors are used to identify houses damaged by an earthquake [20]. The YOLOv5s take the shortest training time of only 1.4 hours, but YOLOv3 takes up to 5.6 hours. The YOLOv5's average precision is up to 89%, as well as its computing time is up to 100 FPS. The YOLOv3's average precision is only 81% and its processing time is 27 FPS.

The YOLOv5 and Scaled YOLOv4 detectors are used for malaria diagnosis because traditional methods were time-consuming and human error [21]. The YOLOv5 takes 52 minutes to train while the Scaled YOLOv4 takes 206 minutes. The Scaled YOLOv4 archived a mAP

of 83% and a recall of 93% while the YOLOv5 had a mAP of 78% and a recall of 79%. YOLOv5 is superior to Scaled YOLOv4 in diagnosing malaria.

III. RESEARCH METHODOLOGY

In this work, three deep learning algorithms for defective brake pads, consisting of YOLOv5s, Scaled YOLOv4, and Faster R-CNN were compared. The algorithm was mainstream during the research period with a wide range of applications and stability. The research process includes a brake pad production study, dataset acquisition, data preparation, experimental environment, and model testing. The process of brake pad production is a one-piece flow process where the defect is detected at the end of the production line before delivering the products to the customers.

The data acquisition involves the process of collecting defective and good brake pads and photographing images to create a dataset. Photographing the brake pad is carried out using the setting shown in Figure 2. The brake pad samples were photographed from different angles. An example of the image photographing angle is shown in Figure 3. Photos were taken with a simple background to maintain a similar environment to the production line. The images were captured using the camera of the iPhone 13 Pro in a studio environment with a black background.

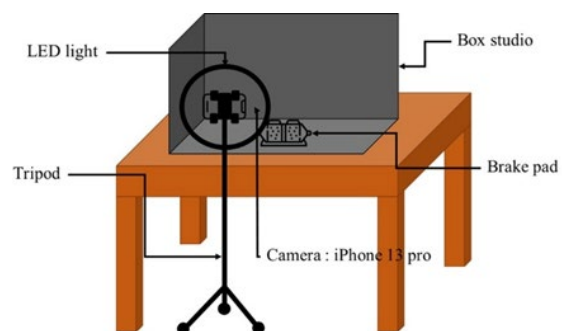


Figure 2: The brake pad photography setting

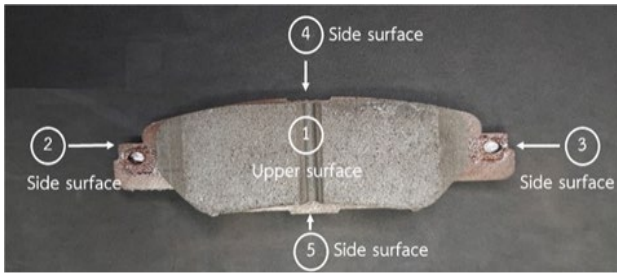


Figure 3: Side of the surface of the brake pad

Data preparation involves 3 steps which are annotation, data augmentation, and split data set. Annotation is a process of labeling the data on images to make algorithms recognize them. In this study, annotation was performed on the Roboflow platform, a software for deep learning tasks established by Joseph Nelson (Iowa, United States). Figure 4 shows an example of data annotation. Three classes of brake pads are selected for this study including split, poorly consolidated friction material, and good brake pads. The classes of defective brake pads are referenced according to the characteristics specified in the ISO/PAS 22574 standard.

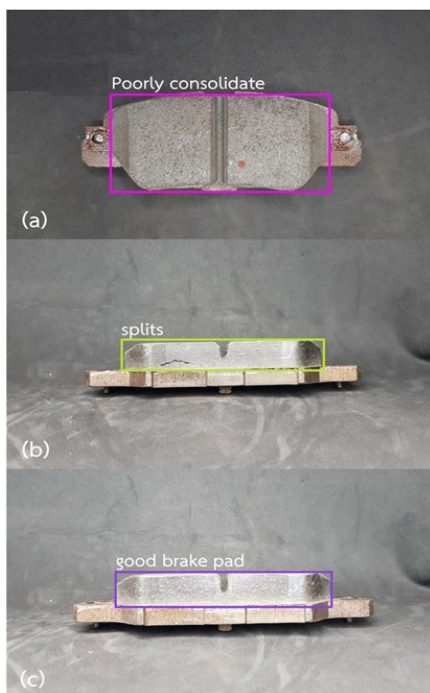


Figure 4: An example of annotations of brake pads on Roboflow:

(a) poorly consolidated, (b) splits, and (c) good brake pad

Due to the limited number of raw datasets, data augmentation was performed on the brake pad images after undergoing annotation. The enhancement of brake pads including flip left and right, changes the hue, brightness, saturation, exposure, and grayscale as shown in Figure 5. The annotated images were automatically augmented through the use of the Roboflow platform.

The split dataset is the process of dividing the data to separate into subsets for training and testing purposes. The model training utilizes the training dataset, while the model testing employs the testing dataset. The data splitting process takes place after completing the data preparation.

The experimental environment consists of experiment preparation and algorithm training. Experiment preparation is the process of embedding the object detection framework in the training and testing platform. YOLOv5s, Scaled YOLOv4, and Faster R-CNN were imported from Roboflow and installed on Google Colab. This process runs on a Windows 10 computer with an Intel Core i7-4750HQ CPU at 2.00GHz. Algorithms training is a process of training object detection models which is a learning process of the detector to recognize patterns and make predictions based on the input data provided. The three algorithms train on Google Colab. The training process of three object detection models utilized GPU and the number of epochs was determined by the best precision obtained from three algorithms after training. The next step is model testing.

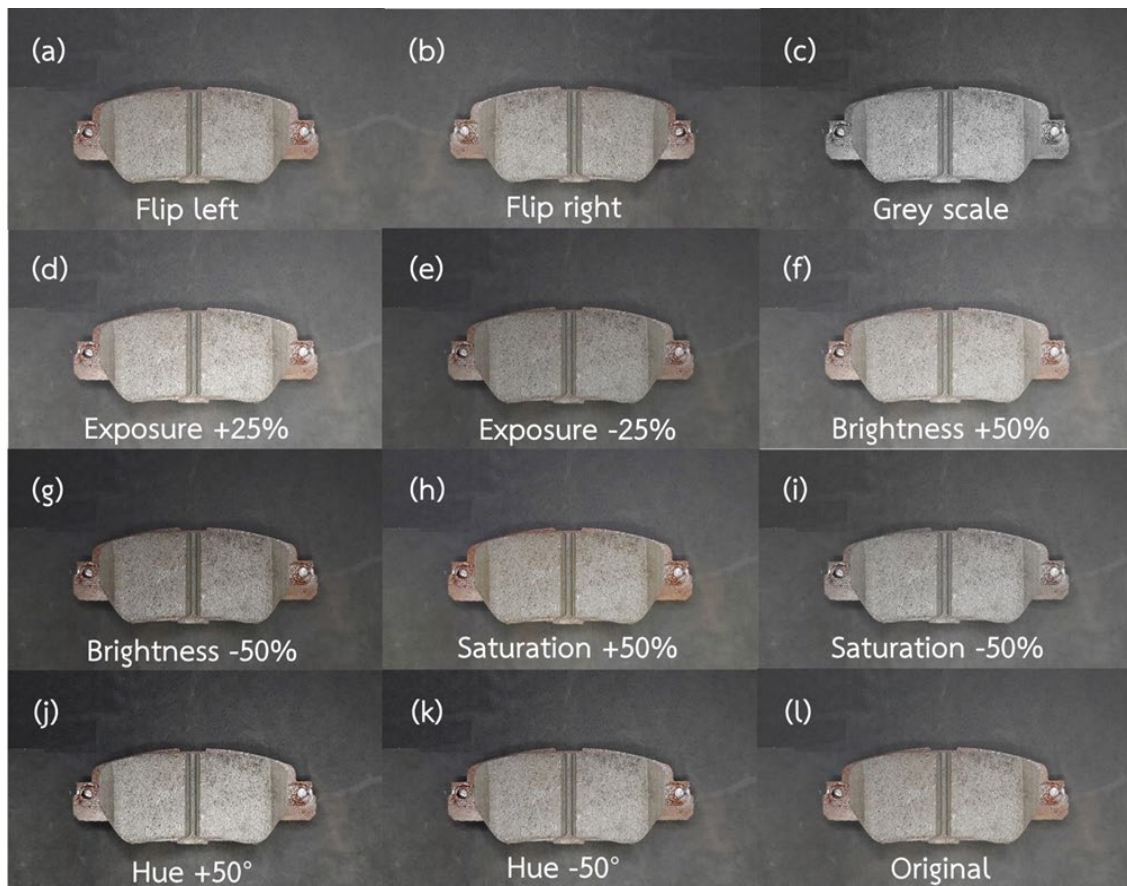


Figure 5: Example of an image using the data augmented technique: (a) flip left, (b) flip right, (c) grey scale, (d) and (e) adjust exposure, (f) and (g) adjust brightness, (h) and (i) adjust saturation, (j) and (k) adjust hue

Model Testing is the process of evaluating the performance and accuracy of a deep learning model on a previously unseen dataset called the testing dataset. The model predictions are compared to the ground truth labels to calculate performance metrics such as precision, recall, F1 score, and detection time. The accuracy in this study is measured by mean average precision (mAP) with the score ranging from 0 to 1. For this study, mAP at an IOU threshold of 0.5 was chosen to measure the accuracy of each class. High mAP indicates that the model can detect and classify different types of defective and good disc brake pads. Recall is the ability of the model to detect objects within an image. The value of recall ranges from 0 to 1. A high recall value indicates that the model is able to detect the objects of interest within the image effectively. The F1 score is a metric used to evaluate

the performance of a model by balancing precision and recall rate. The detection time is the time that the model uses for processing.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The defect detection point was chosen to be after the grinding process because defective brake pads found can be recovered for rework. At this step, the conveyor speed is 6.9 meters per second, the area of the conveyor that visualizes the brake pads on all sides is approximately 40 centimeters wide. The brake pads traverse the area in a time frame of 498 to 1790 milliseconds from one edge to the other. Brake pad detectors require less than 498 milliseconds to detect which is set as the main criteria for the brake pad defect detection parameter for this study.

The total number of defects in all models was around 2% of total production. They originated from various sources including 0.04% from mixing process, 0.6% from curing process, and 1.3% from decorating process. The number of defects from model A were the highest in number compared to other models; therefore, it was chosen for this study.

The observed defect for the brake pad from all models was 0.7%. Two major types of defects, “splits” (23% of total defect) and “poorly consolidated (10% of total defect) friction material”, was chosen for this investigation.

The brake pad model A was selected to represent the defect investigation because they were found with the highest number in the brake pads grinding process. The 80 defective samples consist of splits and poorly consolidated friction material.

Both defects represent the most common problems found in disc brake production failures. Splits can cause the brake pad surface disintegration where a small fragment of friction material could fall off quickly,

causing noise formation during brake and increasing the braking distance. The cause for brake pads splitting are many parameters such as raw material storage, design, and production [22]. A brake pad with a poorly consolidated friction material can cause noise and uneven wear. Causes for poorly consolidated friction material in brake pad include, foreign matter in chemical mixed, and water dripping into a mixer. The rubber does not dissociate due to clumping in the mixing etc.

Appearance for defect brake pads investigated in this study were shown in Figure 6. Figure 6a shows splits, it has at least one crack with about 1 cm long on the side of the brake pad. Using split brake pads may cause some surface brake pads to slip off and be unable to stop the car. Figure 6b shows poorly consolidated friction material where the presence of foreign material or poor mixing on the upper brake pad surface causes the defect. Figure 6c shows a good brake, the top surface is free of impurities, the edge is not broken, the side surface is smooth.

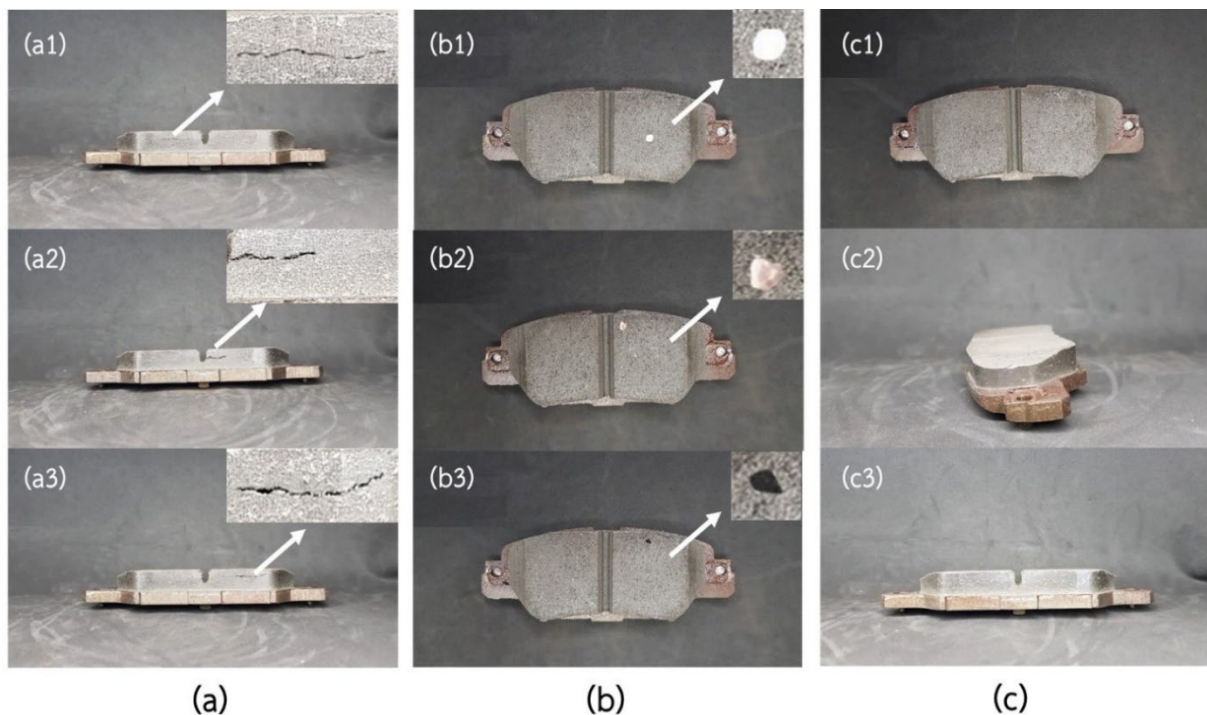


Figure 6: Examples of brake pads in the dataset: (a) splits; (b) poorly consolidate friction material; (c) good brake pad

All 120 images of brake pads were annotated by labeling specific features of the friction material area due to defects appearing on the worn-out area.

Annotated images will undergo augmentation. The image of brake pad that has been annotated and augmentation have been divided into 288 training datasets and 12 testing datasets (ratio 96 to 4) [8]. The detail of datasets is as in Table 1. All characteristics are divided equally, good brake pad calls OK. Datasets were saved as TXT files in YOLO series, XML files in PASCAL VOC for Faster R-CNN.

Table 1: Summary of dataset

Characteristic	Training	Testing
Splits	96	4
Poorly consolidated friction material	96	4
Good brake pad	96	4

A. Result of Model Testing

Table 2 shows the training time of each model. Scaled YOLOv4 has the shortest training time, which is 41 minutes, followed by YOLOv5s (49 minutes), and Faster R-CNN (220 minutes) in that order. Scaled YOLOv4 and YOLOv5s have similar training times as they are both one-stage detectors with strengths in speed. However, YOLOv5s take longer to train than Scaled YOLOv4 due to its high-performance architecture and deeper CNN compared to Scaled YOLOv4. The model with the longest training time is Faster R-CNN, which takes 220 minutes to train, which is significantly longer than the fastest models, which take approximately

5 times less time to train. Faster R-CNN has a complex architecture and a deep CNN, which results in longer training time compared to other models.

B. Performance comparison

The detection of defective and good brake pads by the model includes bounding boxes and labeling. An example of detection is shown in Figure 7.

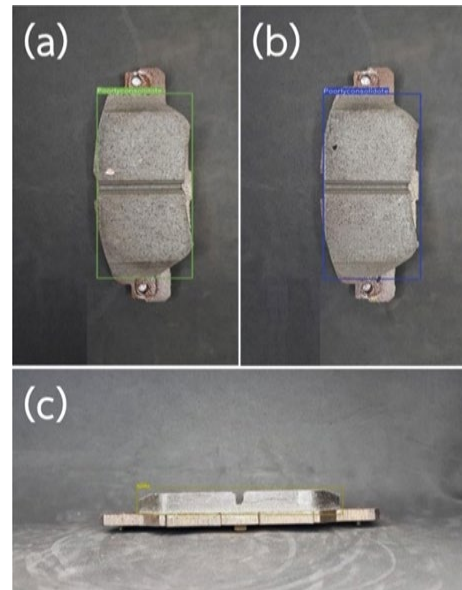


Figure 7: Bounding box and object localization in disk brake detection: (a) and (b) poorly consolidate and (c) splits.

The confusion matrix is shown in Table 3. The results indicate that all models have a similar ability in detecting objects with high proximity. All models can detect defective brake pads that have splits and poorly consolidated friction material, but they still confuse good brake pads with poorly consolidated friction material.

Table 2: Performance of three detector models

Model	Training Time (minute)	mAP	Recall rate	F1 Score	Detection time (ms)
YOLOv5s	49	83.3%	100%	0.91	13.9
Scaled YOLOv4	41	83.3%	100%	0.91	20.0
Faster R-CNN	220	91.7%	100%	0.96	20.2

Table 3: The confusion matrix of YOLOv5s, Scaled YOLOv4, and Faster R-CNN

Predicted \ True	Splits	Poorly consolidated friction material	Good brake pad
Splits	1		
Poorly consolidated friction material		1	
Good brake pad		0.5	0.5

The results of brake detection showed that good brake pads were detected as defective brake pads of the poorly consolidated friction material. The misclassified image was compared to the image of a brake pad with poorly consolidated friction material.

Although the disc brake pad with poorly consolidated friction material indicators has a distinct feature that is clearly visible, which is the prominent color spots that differ from the color of the friction material, the color of the friction material surface in other areas is similar to that of the good brake pad. This includes black, gray, and white colors, as well as some parts of the surface texture that are reflective. The images captured from both poorly consolidated friction material and good brake pads are presented above, the light from the studio reflected off the areas with shadows, causing those areas to appear white in the captured images.

Table 2 shows the mAP values for all models in detection brake pads. The mAP indicates the ability to detect objects in an image. Faster R-CNN achieved the highest mAP value of 91.7%. In comparison, other models had an accuracy of 83.3%, indicating that Faster R-CNN has an average ability to detect brake pads with a 91.7% precision rate. YOLOv5s and Scaled YOLOv4 have an average precision of 83.3% in detecting brake pads. The average precision of Faster R-CNN is higher than YOLOv5s and Scaled YOLOv4 because Faster R-CNN performs region proposal before object detection,

which helps to reduce false positives and can lead to better precision in terms of mAP. On the other hand, YOLOv5s and Scaled YOLOv4 perform object detection and region proposal simultaneously, which increases the chance of false positives and results in lower precision compared to Faster R-CNN.

The recall rate values of all models are shown in Table 2. All models have a recall rate of 100%, indicating that the models can detect all positive objects. Therefore, all models have high precision in object detection with no False Negatives, meaning the models detect all positive objects. All models can detect all brake pads due to the fact that the brake pads within the image are not complex as it only consists of a single object.

When the recall rate of all models is 100%, it indicates that the F1 scores of all models tend to have a similar trend as the average precision values. The F1 score ranges from 0 to 1, where a value close to 1 indicates high model precision, while a value close to 0 indicates low model precision. Table 2 shows the F1 scores of all Faster R-CNN models, with the highest score being 0.96 for Faster R-CNN and the other models having an accuracy of 0.91, indicating that Faster R-CNN has the highest accuracy.

The detection time of three models for detecting brake pads in the testing dataset is shown in Table 2. YOLOv5s has the lowest detection time at 5 milliseconds, which is the shortest time, while Scaled YOLOv4 has a detection time of 20 milliseconds, and Faster R-CNN has a detection time of 20.17 milliseconds. YOLOv5s has a faster detection time than Scaled YOLOv4 because YOLOv5s is a model developed from the architecture of YOLOv4 with several improvements, such as the use of Feature Pyramid Networks to assist in detecting small objects and SPP-block to reduce the number of parameters, resulting in faster detection. Faster R-CNN has the



longest detection time because it uses a region proposal network to locate the regions of interest before performing object detection, which is a complex and time-consuming process. The detection time of YOLOv5s and Scaled YOLOv4 is lower than that of Faster R-CNN because the YOLO detection algorithm is a one-stage detector that does not require the use of a Region Proposal Network, resulting in faster bounding box generation.

V. CONCLUSION

Deep learning principle was applied to brake pads defect detection. Based on a recognition model which included brake pad model A, two defects characteristics and good brake pads. All three object detectors were compared for the performance in terms of training time, mean average precision, and detection time. Scaled YOLOv4 showed the shortest training time at 41 minutes, followed by YOLOv5s (49 minutes), and Faster R-CNN (220 minutes), respectively. Faster R-CNN performs the best in detecting disc brake pads, with a mAP of 91.7%, highest precision. The two detectors have a mAP of 83.3%. Although all detectors have mAP of over 80%, there is still confusion in detecting disc brake pads that needs improvement. All models were able to recognize and detect all disk brake shapes in the images with 100% recall. In terms of object detection speed, YOLOv5s takes only 13.92 milliseconds to detect disc brake pads within an image, followed by Scaled YOLOv4 (20 milliseconds), and Faster R-CNN (20.17 milliseconds). The three algorithms have the potential to detect and process brake pads due to their detection time of less than 498 milliseconds.

The brake pad manufacturing environment comprises high-speed conveyor belts and lighting directions. The essential equipment for implementation consists of five high-speed cameras equipped with vibration reduction

systems, lights capable of illuminating the brake pad surface clearly, and a system for eliminating defective brake pads on the conveyor belt. Moreover, the data transmission equipment must be fast to ensure timely processing by the algorithms.

In this research, there are few samples of defects on Brake Pad Model A due to the high-quality production process, resulting in a limited dataset. For comprehensive and effective utilization of deep learning principles in detecting defective brake pads, the dataset must encompass brake pad models from every car model and all types of defects across all models. Furthermore, each car model undergoes constant changes, both major and minor, directly impacting the shape of the brake pads. Therefore, there must be regular updates to the dataset.

ACKNOWLEDGEMENT

This research has received funding from the NSRF via the Program Management Unit for Human Resources & Institutional Development, Research and Innovation by NSTDA, National Science and Technology Development Agency [grant number: MOU-CO-2564-14056-TH]. Thanks also to the co-support of scholarship from Graduate Program in Science Innovation (SCIN), Mahidol University and to Compact International (1994) Co., Ltd (Head Office), Phetchaburi, Thailand for the collaboration and supports of research facilities.

REFERENCES

- [1] Z. Shu, Z. Yan, and X. Xu, "Pavement crack detection method of street view images based on deep learning," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1952, no. 2, Jun. 2021, Art. no. 022043, doi: 10.1088/1742-6596/1952/2/022043.
- [2] S. Zhao, Y. Peng, J. Liu, and S. Wu, "Tomato leaf disease diagnosis based on improved convolution neural network by attention module," *Agriculture*, vol. 11, no. 7, p. 651, Jul. 2021.

- [3] U. Nepal and H. Eslamiat, "Comparing YOLOv3, YOLOv4 and YOLOv5 for autonomous landing spot detection in faulty UAVs," *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 464, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22020464.
- [4] I. Ahmad *et al.*, "Deep learning based detector YOLOv5 for identifying insect pests," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 19, p. 10167, Oct. 2022, doi: 10.3390/app121910167.
- [5] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 6, 2015, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [6] L. Du, R. Zhang, and X. Wang, "Overview of two-stage object detection algorithms," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1544, no. 1, Jun. 2020, Art. no. 012033, doi: 10.1088/1742-6596/1544/1/012033.
- [7] C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy, and H.-Y. M. Liao, "Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network," in *Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vision and Pattern Recognit. (CVPR)*, Nashville, TN, USA, Jun. 2021, pp. 13024–13033.
- [8] A. H. N. Hidayah, S. A. Radzi, N. A. Razak, W. H. M. Saad, Y. C. Wong, and A. A. Naja, "Disease detection of solanaceous crops using deep learning for robot vision," *J. Robot. Control*, vol. 3, no. 6, pp. 790–799, Nov. 2022.
- [9] G. X. Hu, B. L. Hu, Z. Yang, L. Huang, and P. Li, "Pavement crack detection method based on deep learning models," *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2021, no. 1, Jan. 2021, Art. no. 573590, doi: 10.1155/2021/5573590.
- [10] Z. Zhao, X. Yang, Y. Zhou, Q. Sun, Z. Ge, and D. Liu, "Real-time detection of particleboard surface defects based on improved YOLOv5 target detection," *Scientific Rep.*, vol. 11, Nov. 2021, Art. no. 21777, doi: 10.1038/s41598-021-01084-x.
- [11] F. Jubayer *et al.*, "Detection of mold on the food surface using YOLOv5," *Current Res. Food Sci.*, vol. 4, pp. 724–728, 2021, doi: 10.1016/j.crf.2021.10.003.
- [12] C. Dewi, R.-C. Chen, Y.-C. Zhuang, and H. J. Christanto, "Yolov5 series algorithm for road marking sign identification," *Big Data Cogn. Comput.*, vol. 6, no. 4, p. 149, Dec. 2022.
- [13] Y. Fang, X. Guo, K. Chen, Z. Zhou, and Q. Ye, "Accurate and automated detection of surface knots on sawn timbers using YOLO-V5 model," *BioResources*, vol. 16, no. 3, pp. 5390–5406, Aug. 2021, doi: 10.15376/biores.16.3.5390-5406.
- [14] F. Zhou, H. Zhao, and Z. Nie, "Safety helmet detection based on YOLOv5," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electron., Comput. Appl.*, Shenyang, China, Jan. 2021, pp. 6–11, doi: 10.1109/ICPECA51329.2021.9362711.
- [15] M. Wang, B. Fu, J. Fan, Y. Wang, L. Zhang, and C. Xia, "Sweet potato leaf detection in a natural scene based on faster R-CNN with a visual attention mechanism and DIOU-NMS," *Ecological Inform.*, vol. 73, Mar. 2023, Art. no. 101931, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101931.
- [16] S. Singh, U. Ahuja, M. Kumar, K. Kumar, and M. Sachdeva, "Face mask detection using YOLOv3 and faster R-CNN models: COVID-19 environment," *Multimedia Tools Appl.*, vol. 80, no. 13, pp. 19753–19768, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11042-021-10711-8.
- [17] M. Sozzi, S. Cantalamessa, A. Cogato, A. Kayad, and F. Marinello, "Automatic bunch detection in white grape varieties using YOLOv3, YOLOv4, and YOLOv5 deep learning algorithms," *Agronomy*, vol. 12, no. 2, p. 319, Jan. 2022.
- [18] Q. Song *et al.*, "Object detection method for grasping robot based on improved YOLOv5," *Micromachines*, vol. 12, no. 11, p. 1273, Oct. 2021.
- [19] X. Shi, J. Hu, X. Lei, and S. Xu, "Detection of flying birds in airport monitoring based on improved YOLOv5," in *Proc. 6th Int. Conf. Intell. Comput. and Signal Process.*, Xi'an, China, Apr. 2021, pp. 1446–1451, doi: 10.1109/ICSP51882.2021.9408797.
- [20] Y. Jing, Y. Ren, Y. Liu, D. Wang, and L. Yu, "Automatic extraction of damaged houses by earthquake based on improved YOLOv5: A case study in Yangbi," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 2, p. 382, Jan. 2022.
- [21] P. Krishnadas, K. Chadaga, N. Sampathila, S. Rao, K. S. Swathi, and S. Prabhu, "Classification of Malaria using object detection models," *Informatics*, vol. 9, no. 4, p. 76, Sep. 2022.
- [22] S. Divakaruni, D. Yuhas, C. Vorres, and R. Kaatz, "Objective method for crack detection in brake friction material," presented at Brake Colloq. and Exhib. - 37th Annu., Orlando, FL, USA, Sep. 2019, doi: 10.4271/2019-01-2113.

Monitoring Blood Coagulation Behavior Using Quartz Crystal Microbalance with a Mason Equivalent Circuit Model

Sawit Na Songkhla¹ Wanida Laiwattanapaisal² Watcharee Boonlue^{3*}

¹*Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

^{2,3*}*Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: watcharee.bo@chula.ac.th

Received: 6 February 2024; Revised: 26 February 2024; Accepted: 28 February 2024

Published online: 28 June 2024

Abstract

Blood clotting ability is a vital function of life forms, aiding survival when the body sustains cuts or wounds. Frequently, patients lacking this ability, or those on blood-thinning medications, can suffer from excessive bleeding, posing challenges for medical treatment. This is particularly relevant for dentists, as excessive bleeding may occur during tooth extractions or other dental procedures. Hence, there is a need for real-time blood coagulation detection. We propose using the quartz crystal microbalance (QCM) as a sensor. Its ability to detect mass loading and viscosity makes it feasible for coagulation testing in dental clinics. However, conventional equations like Sauerbrey's and Kanazawa's do not account for the dissipation factor, which plays a crucial role in determining liquid viscosity. We suggest using the Mason equivalent circuit model for interpreting blood viscosity and its clotting on the QCM surface. Observations show that film thickness increases with viscosity. Different samples exhibited varying viscosity changes, while the increase in film thickness was relatively comparable. This demonstrates the potential of the Mason equivalent Circuit model to differentiate results and estimate the underlying physical properties of blood coagulation.

Keywords: Blood clotting, Mason equivalent circuit model, POCT, Quartz crystal microbalance

I. INTRODUCTION

Coagulation tests are essential in clinical diagnostics and treatment management. Their uses include diagnosing bleeding disorders, monitoring anticoagulant therapy, monitoring vitamin level, assessing vascular disease, and pre-surgical screening. In various coagulation assays, the time taken for viscosity changes is measured after adding an activator, using mechanical or optical methods. However, the complexity of preparing blood samples and activator agents is not conducive to on-site measurement or point of care testing (POCT). Since blood can be drawn directly from patients and coagulation can occur spontaneously from surface activation or certain pathways, the sensor required for this phenomenon can be simplified to a typical sensor.

Numerous biosensors have been developed for blood coagulation based on various principles, such as optical, surface plasmon resonance, magnetoelastic, or acoustic sensors. However, acoustic sensors like surface acoustic wave (SAW), film bulk acoustic resonator (FBAR), or quartz crystal microbalance (QCM) have the advantage of being able to measure viscosity changes during coagulation if the measurement circuit can extract loss or dissipation factors from the sensor [1].

The QCM sensor itself lacks affinity for specific molecules unless those molecules have an affinity for the metal electrode. Typically, QCM sensors require a sensitivity coating to achieve selectivity towards target molecules. These coatings can be polymers or biomaterials such as antibodies, enzymes, leptin, DNA, etc. Many of these coatings are viscous, rendering the conventional Sauerbrey equation for detecting rigid mass on QCM less accurate [2]. Coated QCMs have a wide range of applications as chemicals and biosensors. These applications include blood group identification [3], detection of cells, bacteria, and small molecules, gas sensing, and DNA analysis [4]–[6].

We propose using the QCM sensor to monitor coagulation due to its robustness and ability to detect viscosity. However, meaningful data interpretation is required. We applied the Mason equivalent circuit, initially proposed for use with viscous films in our previous investigation [7]. The Mason equivalent circuit Model is based on the coupling of acoustic impedance to electrical impedance. In this work, we further applied the model to data from human blood coagulation samples dropped directly onto a bare QCM electrode. Our focus is on explaining blood coagulation behavior in terms of film thickness and viscosity, as obtained from our model.

II. LITERATURE REVIEW

Measuring coagulation using whole blood samples offers a significant advantage over routine clinical tests such as prothrombin time (PT), activated partial thromboplastin time (aPTT), and platelet count. Whole blood coagulation assessment provides a comprehensive evaluation of hemostasis. It enables the measurement of fibrin formation and extends to clot retraction and fibrinolysis. This process facilitates the interaction of the plasma coagulation system with blood cells, including platelets.

Various biosensors have been developed as alternatives to traditional clinical tests. Munawar *et al.* utilized a QCM sensor to estimate PT, achieving significant reduction in plasma requirement compared to a standard mechanical coagulometer, with promising results (R^2 value of 0.99) [8]. Maji and team also introduced a sensor based on dielectric measurement to detect abnormalities in hemostasis, both non-cellular and cellular [9]. Cakmak *et al.* proposed a sophisticated microfluidic lab-on-chip (LoC) with nickel microcantilevers, actuated by a magnetic coil and measured using a laser doppler vibrometer (LDV), demonstrating reliable viscosity measurement with low coefficients of variation for PT

and aPTT [10]. Chen further advanced this field with the development of a very high frequency acoustic sensor, the FBAR, which showed excellent correlation and consistency in measuring prothrombin times when compared with commercial coagulometers [11].

Viscoelastic hemostasis assays, notably thromboelastography (TEG) and rotational thromboelastometry (ROTEM), stand out in the field for their ability to assess the viscoelastic properties of blood during clot formation and dissolution, offering a comprehensive perspective on the hemostatic process [12]. TEG utilizes a rotating cup with a torsion pin immersed in the blood sample to detect the torsional force from blood viscosity as coagulation progresses, while ROTEM follows a similar principle but with the pin itself rotating. These methods are advantageous for their ability to detect clot formation and dissolution, aiding in identifying clotting abnormalities. However, their use is limited due to the large volume of sample required and the potential for the rotation process to delay clot formation, which can distort the actual viscoelasticity of polymerization.

The QCM sensor operates on the piezoelectric principle, comprising an AT-cut quartz plate coupled with metal electrodes. When mass attaches to these electrodes, it leads to a decrease in the resonance frequency. Moreover, if the attached mass is non-rigid (or liquid), it causes additional damping or loss in the system. With its gravimetric effect and the ability to detect both mass and viscosity loading, combined with its relatively low cost, the QCM sensor becomes an attractive choice for detecting blood coagulation.

There is a wealth of publications on using the QCM sensor as a coagulation sensor, with studies focusing on measuring PT [8], [13], [14], aPTT [13], [15], [16], and thrombin time (TT) [17]. However, most of these studies did not aim to extract underlying parameters such as viscosity, density, or thickness of the coagulation aggregates.

To gain a deeper understanding of the behavior during coagulation, it's important to consider a model that represents this process more comprehensively.

A precise model, such as the one proposed by Lucklum and Hauptmann in 2000, centers on the complex shear modulus $G_k = G' + jG''$, which defines both the elastic (G' , elastic modulus) and viscous (G'' , loss modulus) properties of blood [18]. This work involved simulating the Mason equivalent circuit under various conditions, including both lossy and lossless films in bulk liquid. The findings indicated that frequency changes were predominantly influenced by the film in contact with the QCM. Interestingly, the lossless film sometimes exhibited an unusual positive frequency change. While these studies may not have immediate real-world applications, they extensively explore the parameters of the Mason model, yielding significant insights from their simulations.

Bandey *et al.* analyzed the behavior of non-coagulating whole blood, erythrocyte sedimentation, and coagulation, discovering that non-coagulated whole blood acts as a viscous liquid primarily determined by plasma viscosity [19]. They noted that the penetration depth of liquid in plasma is approximately 300 nm, smaller than the size of RBCs, which must attach to the surface for QCM response observation. During sedimentation and coagulation, the attachment of elastic materials (RBC membranes and fibrin networks) interprets as an increase in G' and real (Z_s) being greater than imag (Z_s). Bandey had previously proposed a multi-layer analysis model [20], considering samples as consisting of two or more layers with distinct characteristics. Evans-Nguyen and Schoenfisch found that surface treatments (hydrophobic, hydrophilic, positively charged, negatively charged) significantly influence frequency response, particularly on hydrophilic surfaces [21]. They observed that fibrin filaments attach rigidly, behaving like mass loading as per the Sauerbrey equation [2].

Unfortunately, most literature simplifies the model to rigid mass [22], or like Muramatsu *et al.* [23], treats it as purely viscous semi-infinite material, lacking information on coagulation forming thickness and viscoelastic properties (G').

Our work also aims to utilize the Mason equivalent circuit model, simplifying it by reducing the parameters to a single-layer film. This approach is a preliminary step before delving into more complex parameters. We are attempting to determine the underlying viscosity and thickness of coagulated blood, achieving simplified yet reasonably accurate approximations.

III. RESEARCH METHODOLOGY

A. QCM Mason Equivalent Circuit

Typically, QCM as a sensor has a vastly used model near its resonant frequency called Butterworth–Van Dyke model (BVD) as shown in figure 1. We can analyze its equivalent impedance in terms of admittance, and it can be expressed as:

$$Y = \frac{1}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + Z_{eL}} + j\omega C_0 \quad (1)$$

The BVD model integrates a series and parallel resonance circuit (motional branch), which includes L_1 , C_1 , and R_1 . The electrodes on either side of the crystal plate add an extra parallel capacitance, C_0 , resulting in the formation of a parallel circuit. Where Z_{eL} is the loading from the deposited viscous film. We usually simplify the model to film deposition which is useful for various conditions. Figure 2 shows a one-dimensional viscous model for the calculation. We consider the case of a viscous thin film, where ω is the angular frequency, m is the shear modulus, and v_{A1} is the shear wave velocity. The particle displacement u_1 and the shear stress T_5 are given by:

$$T_5 = \mu S_5 = \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_3} = j \frac{\omega}{v_{A1}} \mu \left(-A e^{-j\left(\frac{\omega}{v_{A1}}\right)x_3} + B e^{j\left(\frac{\omega}{v_{A1}}\right)x_3} \right) \quad (2)$$

Since A and B are constant, consider the stress free at film surface ($x_3 = t + h$, $T_5=0$). The ratio of A to B can be written as:

$$\frac{A}{B} = e^{j\left(\frac{2\omega}{v_{A1}}\right)(t+h)} \quad (3)$$

Substitute (3) into (2), The solution of the piezoelectric stress equation yields the acoustic impedance Z_L .

$$Z_L = -\frac{T_5}{j\omega u_1} \Big|_{x_3=t} = \frac{\mu}{v_{A1}} \frac{1 - e^{j(2\omega/v_{A1})}}{1 + e^{j(2\omega/v_{A1})}} = j\rho_L v_{A1} \tan\left(\frac{\omega h}{v_{A1}}\right) \quad (4)$$

Where ρ_L represents the density of the film and h denotes its thickness, the shear wave in the viscous film was determined through a different method by replacing the shear wave with velocity in the stress equation, leading to the following result:

$$\rho_L \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \frac{\partial T_5}{\partial x_3} \quad (5)$$

$$T_5 = j\omega \eta_L S_5 \quad (6)$$

And where η_L is the film viscosity. Applying equation (6) into (5) yield the wave velocity of the film

$$v_{A1} = \sqrt{\frac{j\omega \eta_L}{\rho_L}} \quad (7)$$

Then, applying equation (7) to equation (4) we obtain

$$Z_L = j\sqrt{j\rho_L \eta_L \omega} \tan\left(\sqrt{\frac{\rho_L}{j\omega \eta_L}}\right) \quad (8)$$

Electrical impedance Z_{eL} is expressed as

$$Z_{eL} = \frac{t^2 Z_L}{4e_{35}^2 S_A} \quad (9)$$

where t is the quartz thickness, e_{35} is the piezoelectric constant, and S_A is the QCM electrode area.

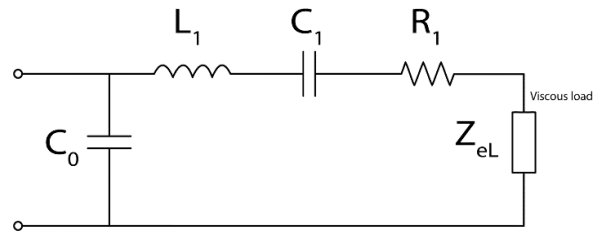


Figure 1: The equivalent circuit of the QCM, the Butterworth–Van Dyke model with viscous loading

The Vector Network Analyzer (VNA) is used for extracting the QCM sensor's equivalent circuit components by measuring its conductance near the resonant frequency.

Impedance data across the frequency sweep range were analyzed and curve-fitted to determine R_1 , L_1 , and C_1 , as depicted in Figure 1. This approach differs from the traditional motional admittance method, which only assesses the frequency at peak conductance. Our technique employs the entire data set for fitting to equation 1, aiming to minimize the mean square error for accurate circuit component determination. This method proves to be more reliable and less affected by noise compared to the standard motional admittance method.

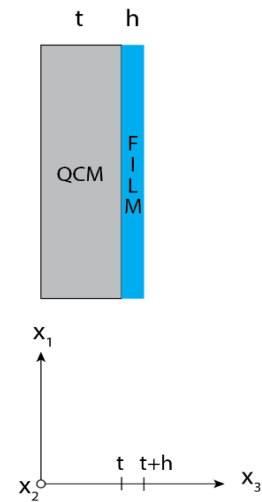


Figure 2: Model of the viscous film

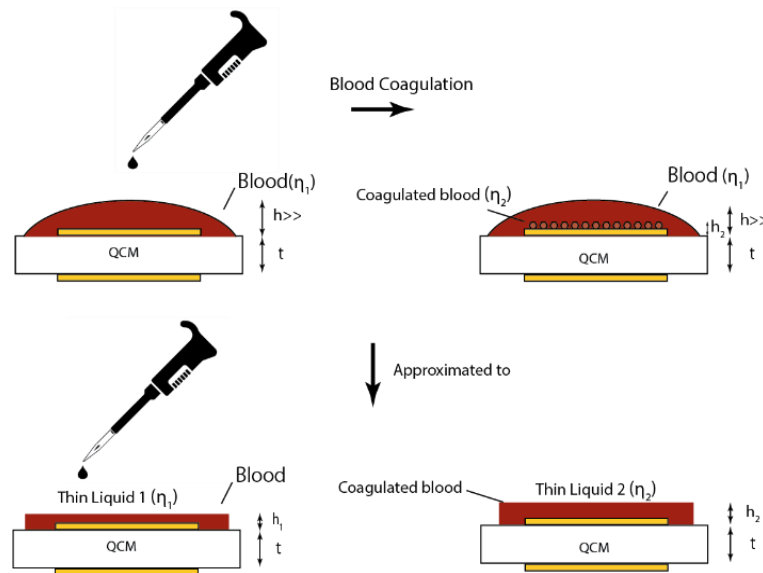


Figure 3: Model approximation blood coagulation from a single layer of viscous film with viscosity (η_1) and film thickness (h_1) into a film with different viscosity (η_2) and film thickness (h_2)

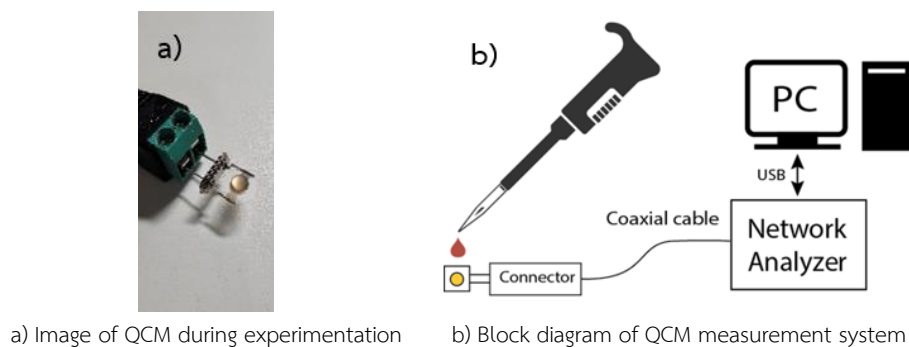


Figure 4: Experimental setup for measurement for blood coagulation test

B. Blood Coagulation Response Approximation to Mason Equivalent Circuit

Figure 3 illustrates the approximation of the blood coagulation process as a single film layer, which changes in both thickness and viscosity. This representation differs from the actual bulk liquid of blood and the coagulation that occurs, potentially creating a film layer directly on the QCM surface. While this approximation may seem drastically inaccurate, it can be conceptualized that the bulk liquid is represented by a viscous film with a known thickness and viscosity. This simplification aids in interpreting the model and should adequately explain the experimental data according to the Mason circuit model of the single-layer film.

C. Measurement System

The QCM was specifically designed to resonate at 12.1 MHz. For measuring the S11 parameter of the QCM, a compact network analyzer (DG8AQ VNWA from SDR-Kits) connected through a coaxial cable was employed. The MATLAB software by MathWorks was used to facilitate these measurements. We scanned a frequency range from 12.115 MHz to 12.131 MHz, encompassing a 16 kHz span, each measured in 1.33 milliseconds. The selection of these parameters was an optimization from our earlier experiment [24]. The conductance curve, obtained from the S11 parameter through frequency scanning, utilized a 16 kHz range—twice the bandwidth of the curve for a Quartz Crystal Microbalance (QCM) in a 50% (w/w) aqueous glycerol solution. Measurements indicated that for this scanning range, the standard deviation was kept below 3 Hz, allowing quick sampling without much loss in precision. We collected 1000 data points within the scanning range, each at 1.33 milliseconds, amounting to a total of 1.33 seconds. Combined with the 16 kHz scanning range, this approach kept the scan time under 2 seconds, suitable for real-time applications. The configuration of our measurement system is illustrated in Figure 4.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. aPTT Assay with Standard Serum, Coagulation Measurement Using QCM Sensor and Its Interpretation Using Mason Equivalent Circuit.

To perform the aPTT assay, we used platelet-poor plasma (PPP), reagents (including phospholipid and a contact activator specific to the aPTT), and calcium. We added 15 μL of the reagent to an equal volume of standard PPP (15 μL). Following this, we introduced 15 μL of 0.025 M calcium chloride (CaCl_2), initiating the clotting reaction. Subsequently, 15 μL of the resulting solution was carefully placed at the center of a QCM, ensuring full coverage of the electrode. This procedure was replicated five times. The raw data from the QCM experiments are presented in Figure 5. To clean the data of outliers, we employed the MATLAB function `filloutliers`, utilizing the median absolute deviation (MAD) method to identify outliers at three times its scale. Outliers were replaced using linear interpolation based on neighboring values, with the MAD window size set at 50 data points.

It's normal for the base frequency of each QCM to vary, due to manufacturing process tolerances. Our measurement system employs a vector network analyzer to extract the QCM's impedance. This method allows us to represent the motional impedance parts of the QCM through both resonant frequency and resistance, offering a more comprehensive analysis than merely reading the resonant frequency alone, as done in an oscillator circuit. Typically, we interpret the QCM's response through frequency changes. Around 100 seconds mark the point when the solution is deposited onto the QCM sensor, with the actual deposition time showing slight deviations due to the manual process. A significant drop in frequency and an increase in resistance were observed. Figure 6 displays shifts in both QCM frequency and resistance.

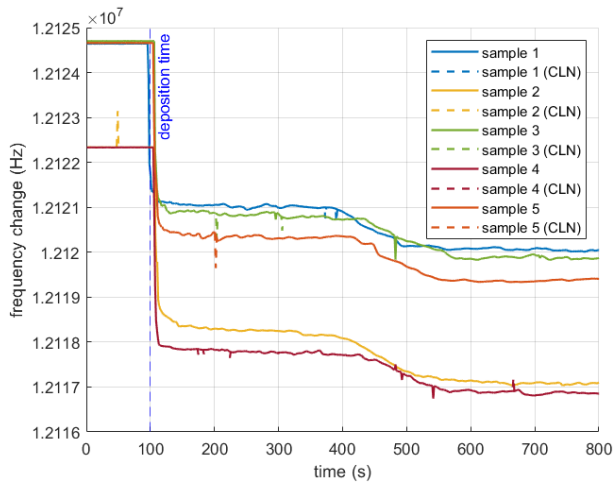


Figure 5: The raw frequency measurements from the QCM for five separate experiments of the aPTT assay using standard plasma

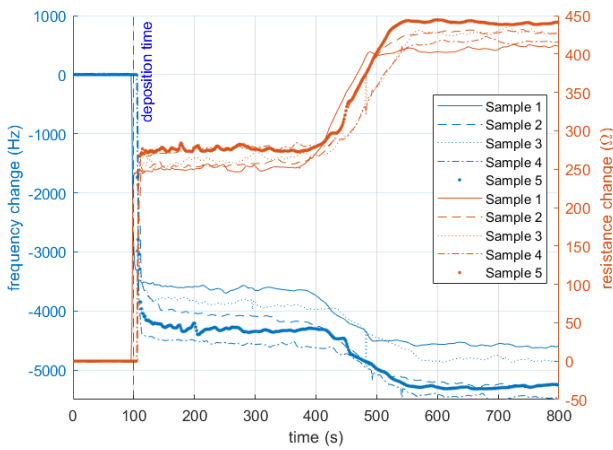


Figure 6: The changes in frequency and resistance measured by the QCM across five separate experiments of the aPTT assay using standard plasma

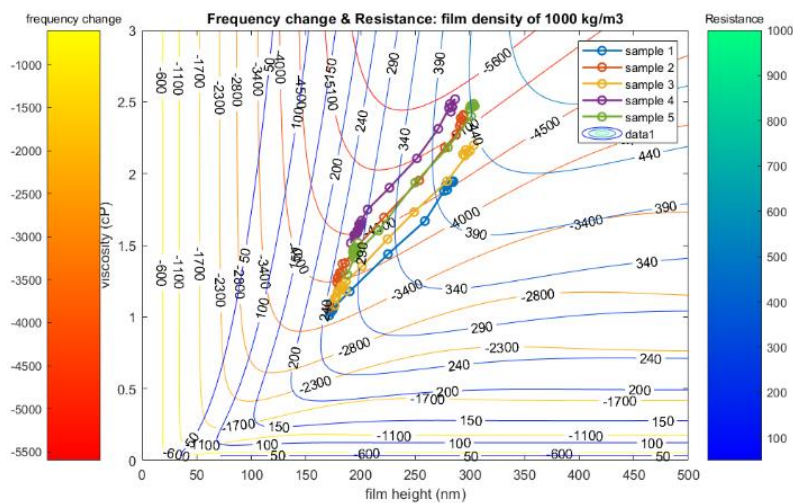


Figure 7: Combined contour plot of both resistance and frequency when across five separate experiments of the aPTT assay

The coagulation process starts at around 400 seconds, as verified by visually inspecting the remaining solution. This was done by tilting it and then tapping and poking it with a pipette tip. Both the QCM results and visual inspection confirmed that coagulation was occurring simultaneously.

In the Mason equivalent circuit section, we identified three key variables related to coating film properties: film thickness (h), film viscosity (η_L), and film density (ρ_L), with an assumption of constant film density at 1 g/cm^3 . This assumption is integral to impedance derivation. We can convert resistance and frequency changes into impedance, which then allows for the calculation of film viscosity and thickness through specific equations. To integrate these test results into our models, we sampled data every 30 seconds after deposition for a total duration of 600 seconds. These data points were then plotted on a contour using a minimal numerical solver (fminsearch) in the applied equations. This approach enables us to estimate viscosity and film thickness, assuming a constant density of 1 g/cm^3 .

Figure 7 converts the frequency and resistance shifts into a contour plot, mapping all data points collected up to 600 seconds after deposition onto a graph of viscosity and film thickness. The results indicate that as time progresses, the film's thickness increases from approximately 175 nm to 300 nm, and the viscosity changes from around 1 cP to 2.5 cP. These findings demonstrate the viability of our method for approximating changes in film thickness and plasma viscosity. The data from all five samples align closely within the contour plot, showcasing the method's repeatability. Furthermore, presenting the data in a plot of viscosity and film thickness facilitates easier interpretation of the results.

B. Whole Blood Coagulation Measurement Using QCM Sensor and Its Interpretation Using Mason Equivalent Circuit

We conducted an experiment focusing on blood deposition to study how blood coagulation affects the QCM. A micro pipette was used to precisely apply a 10 μL sample of whole blood directly onto the QCM electrode. These samples originated from two different human blood sources. Figure 8 illustrates the QCM's response over time, where notable changes in frequency and resistance are observed due to the deposition.

Immediately after the blood is deposited, a negative frequency shift occurs, indicative of a typical response to viscous loading. Over time, the resistance continues to increase, while the frequency shift gradually decreases. Eventually, the trend in frequency changes: it starts to increase, reversing its initial behavior, and eventually shifts to a positive value.

Interpreting this response solely using the Sauerbrey equation and Kanazawa theory proves insufficient. This is because we also have resistance data, and the specific condition of coagulating blood doesn't align with the mass loading conditions assumed in the Sauerbrey equation or the bulk liquid conditions of the

Kanazawa equation. Furthermore, the coagulated blood may form a film-like layer at the electrode, suggesting that this scenario should be analyzed using the Mason equivalent circuit model.

We collected data every 30 seconds over a period of 600 seconds (10 minutes) post-deposition. These data points were then plotted on the contour using a minimum numerical solver (fminsearch) in the applied equations, enabling us to deduce viscosity and film thickness, while assuming a constant density.

The contour plot showing changes in frequency and resistance for a whole blood sample is depicted in Figure 9. The results obtained from the fminsearch are represented as circular points. However, mapped data points are available only for the first three instances following blood deposition (the first three circles from the left in Figure 8). This limitation stems from the equation solver's difficulty in identifying local minima with an acceptable mean square error (less than 10^{-3}). A detailed analysis of the contour plot highlights its constraints: it does not reflect the slight increase in frequency while resistance increases significantly, and as the film thickness grows, the contour lines for frequency and resistance shifts become almost parallel. The occurrence of frequency increase alongside resistance increase is not observed at greater film thicknesses. This observation implies that film thickness has a minimal effect on the changes in frequency and resistance, with viscosity playing a more significant role. Additionally, the plot does not account for positive frequency changes. Introducing complex viscosity into the Mason equivalent circuit model could explain these positive frequency shifts, but this complicates the equation's understanding and interpretation, warranting further study.

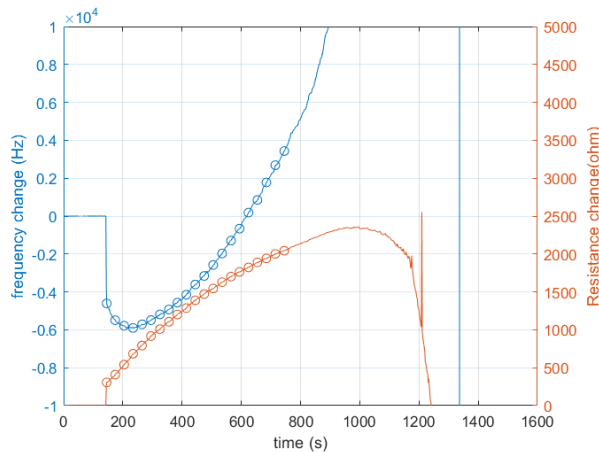


Figure 8: presents the QCM's response following the deposition of blood sample 1. The circled data points, used for mapping onto the Mason equivalent circuit plot, were sampled every 30 seconds

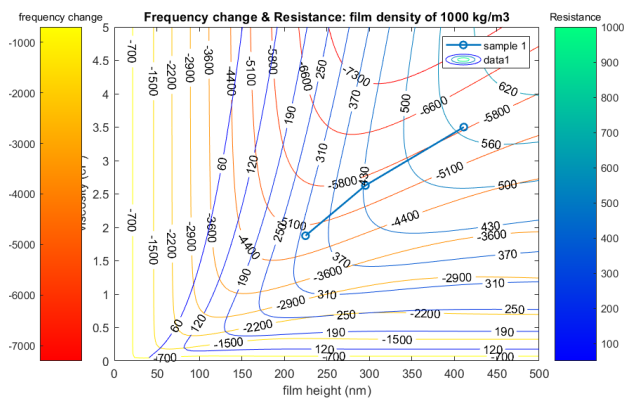


Figure 9: Combined contour plot of both resistance and frequency when blood is deposited onto QCM of blood sample 1

Despite these limitations, the interpretation remains useful for thin film layers, with the first three data points indicating that as coagulation progresses, both film thickness and viscosity increase. Yet, beyond a certain point, the frequency increases so much that it no longer fits the model meaningfully, suggesting a need to explore the concept of complex viscosity to rationalize the positive frequency shifts. Instances of increasing frequency upon deposition have been observed, such as in [18]. Their study, involving a Mason equivalent circuit model with a viscous film layer immersed in a bulk liquid, showed that under specific conditions (a 500 nm film thickness, with real and imaginary parts of the acoustic load Z_f at 2,721 and

17,697 Pa s m⁻¹, respectively, immersed in a 10 cp viscosity liquid), a positive frequency shift is possible. Their simulation implies that in a high viscosity liquid with a low loss film, such positive frequency changes may occur.

V. CONCLUSION

In conclusion, the enhanced Mason equivalent circuit model, incorporating a viscous film boundary condition, has proven to be a highly effective tool for monitoring coagulation progress. Its strength is its ability to provide more definitive results than those obtained solely through cutoff values of frequency and resistance shifts. Our model offers a more intuitive and comparative analysis of coagulation by translating frequency and resistance data into viscosity and film thickness. This could make it comparable to other viscoelastic hemostasis assays.

Moreover, our model presents a faster approach to coagulation testing, eliminating the need for activators and potentially estimating coagulation times in under a minute without reagents. This significantly reduces both the operational costs and the time required for testing. This model can be a part of a point-of-care testing device for various applications, including preoperative screening before dental procedures and the result from the blood coagulation test can provide guidance on adjusting dietary habits to increase the intake of vitamin K from food sources.

It is also evident that focusing on thinner films, where the model remains effective, should be a priority. We have established its feasibility for film thicknesses up to approximately 400 nm. Initially, we overlooked the potential impact of bulk liquid on top of forming blood clots. Our current efforts are aimed at further validating the model with a larger sample size and incorporating a bulk liquid layer above the viscous layer to improve accuracy. Additionally, considering the

incorporation of the elastic modulus (G') to account for the viscoelastic properties of the film is an area for future improvement.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded by grants for development of new faculty staff, Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund.

REFERENCES

- [1] A. Mujahid, A. Afzal, and F. L. Dickert, "An overview of high frequency acoustic sensors—QCMs, SAWs and FBARs—chemical and biochemical applications," *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4395, Oct. 2019.
- [2] G. Sauerbrey, "Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung," (in German), *Zeitschrift für Physik*, vol. 155, no. 2, pp. 206–222, Apr. 1959.
- [3] A. Seifner, P. Lieberzeit, C. Jungbauer, and F. L. Dickert, "Synthetic receptors for selectively detecting erythrocyte ABO subgroups," *Analytica Chimica Acta*, vol. 651, no. 2, pp. 215–219, Oct. 2009.
- [4] P. J. Jandas, K. Prabakaran, J. Luo, and M. G. D. Holaday, "Effective utilization of quartz crystal microbalance as a tool for biosensing applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 331, Nov. 2021, Art. no. 113020.
- [5] M. Jenik, A. Seifner, P. Lieberzeit, and F. L. Dickert, "Pollen-imprinted polyurethanes for QCM allergen sensors," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 394, no. 2, pp. 523–528, Mar. 2009.
- [6] M. Jenik *et al.*, "Sensing picornaviruses using molecular imprinting techniques on a quartz crystal microbalance," *Anal. Chem.*, vol. 81, no. 13, pp. 5320–5326, Jul. 2009.
- [7] S. N. Songkhla and T. Nakamoto, "Interpretation of quartz crystal microbalance behavior with viscous film using a mason equivalent circuit," *Chemosensors*, vol. 9, no. 1, p. 9, Jan. 2021.
- [8] M. Hussain, "Prothrombin Time (PT) for human plasma on QCM-D platform: A better alternative to 'Gold Standard'," *Pharmaceutical Biosci. J.*, vol. 3, no. 6, pp. 1–8, Sep. 2015.
- [9] D. Maji *et al.*, "Assessment of whole blood coagulation with a microfluidic dielectric sensor," *J. Thrombosis Haemostasis*, vol. 16, no. 10, pp. 2050–2056, Oct. 2018.
- [10] O. Cakmak *et al.*, "A cartridge based sensor array platform for multiple coagulation measurements from plasma," *Lab Chip*, vol. 15, no. 1, pp. 113–120, Oct. 2015.
- [11] D. Chen *et al.*, "Micro-electromechanical film bulk acoustic sensor for plasma and whole blood coagulation monitoring," *Biosensors Bioelectron.*, vol. 91, pp. 465–471, May 2017, doi: 10.1016/j.bios.2016.12.063.
- [12] S. D. Sahli, J. Rössler, D. W. Tscholl, J. D. Studt, D. R. Spahn, and A. Kaserer, "Point-of-care diagnostics in coagulation management," *Sensors*, vol. 20, p. 4254, Jul. 2020.
- [13] J. Yao *et al.*, "Blood coagulation testing smartphone platform using quartz crystal microbalance dissipation method," *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 3073, Sep. 2018.
- [14] L. Müller *et al.*, "Investigation of prothrombin time in human whole-blood samples with a quartz crystal biosensor," *Anal. Chem.*, vol. 82, no. 2, pp. 658–663, Jan. 2010.
- [15] M. Hussain, "Ultra-sensitive detection of heparin via aPTT using plastic antibodies on QCM-D platform," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 68, pp. 54963–54970, Jun. 2015.
- [16] Y. Yang *et al.*, "Stability enhanced, repeatability improved Parylene-C passivated on QCM sensor for aPTT measurement," *Biosensors Bioelectron.*, vol. 98, pp. 41–46, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.bios.2017.06.021.
- [17] W. Pan *et al.*, "Applicability of a sensitivity-enhanced quartz crystal microbalance in analyzing blood plasma viscosity and coagulation," *Sensors Mater.*, vol. 34, no. 4, pp. 1515–1525, Apr. 2022.
- [18] R. Lucklum and P. Hauptmann, "The Δf - ΔR QCM technique: An approach to an advanced sensor signal interpretation," *Electrochim. Acta*, vol. 45, no. 22–23, pp. 3907–3916, Jul. 2000.
- [19] H. L. Bandey, R. W. Cernosek, W. E. Lee III, and L. E. Ondrovic, "Blood rheological characterization using the thickness-shear mode resonator," *Biosensors Bioelectron.*, vol. 19, no. 12, pp. 1657–1665, Jul. 2004.
- [20] H. L. Bandey, S. J. Martin, R. W. Cernosek, and A. R. Hillman, "Modeling the responses of thickness-shear mode resonators under various loading conditions," *Anal. Chem.*, vol. 71, no. 11, pp. 2205–2214, Jun. 1999.
- [21] K. M. Evans-Nguyen and M. H. Schoenfish, "Fibrin proliferation at model surfaces: Influence of surface properties," *Langmuir*, vol. 21, no. 5, pp. 1691–1694, Mar. 2005.



- [22] B. C. Heinze and J.-Y. Yoon, "Real-time monitoring of fibrinogen cross-linking on model biomaterial surfaces with quartz crystal microbalance," *Open Biotechnol. J.*, vol. 2, no. 1, Nov. 2008.
- [23] H. Muramatsu, J. Kim, and S. Chang, "Quartz-crystal sensors for biosensing and chemical analysis," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 372, no. 2, pp. 314–321, Jan. 2002.
- [24] S. N. Songkhla and T. Nakamoto, "Signal processing of vector network analyzer measurement for quartz crystal microbalance with viscous damping," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 22, pp. 10386–10392, Nov. 2019.

การออกแบบตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึม ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากค้างคาว สำหรับควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาไฟฟ้า

จุฬารัตน์ ม่วงดิษฐ์¹ กิตติศักดิ์ ฤาแรง^{2*}

^{1,2*} คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น, กาญจนบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : kitiskak.l@western.ac.th

รับต้นฉบับ : 20 กันยายน 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 26 ตุลาคม 2566; ตอรับบทความ : 15 พฤศจิกายน 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 28 มิถุนายน 2567

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าเป็นระบบอันดับสองที่มีการประวิงเวลา (Second-Order System Plus Time Delay: SOSPD) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรม โดยปกติจะดำเนินการภายใต้รูปแบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID แต่อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุม PIDA ยังให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PID สำหรับโรงงานที่มีลำดับสูงกว่า ในวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า เกี่ยวกับบริบทการเพิ่มประสิทธิภาพที่ทันสมัย ด้วยอัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากค้างคาว (BA) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพเมตาฮิวริสติก ตามประชากรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดถูกนำไปใช้เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ของ PIDA ที่เหมาะสม เปรียบเทียบในการออกแบบ PIDA ที่ออกแบบโดย BA ที่เสนอถือเป็นปัญหาการปรับให้เหมาะสมที่มีข้อจำกัด การตอบสนองของระบบที่ได้รับจากคอนโทรลเลอร์ PIDA ที่ออกแบบโดย BA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ การตอบสนองที่ได้รับจากคอนโทรลเลอร์ PIDA ด้วย จากผลการวิจัยพบว่า PIDA ที่ออกแบบด้วย BA สามารถติดตามและควบคุมการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิเตาไฟฟ้าที่เหนือกว่า PIDA ได้อย่างน่าพอใจอย่างมาก

คำสำคัญ : การควบคุมอุณหภูมิเตาไฟฟ้า การเพิ่มประสิทธิภาพเมตาฮิวริสติก ตัวควบคุมพีไอดีเอ

Optimized PIDA Controller Design with Bat-inspired Algorithm for Temperature Control of Electric Furnace System

Chulaphorn Muangdit¹ Kittisak Lurang^{2*}

^{1,2*}*Faculty of Liberal Arts and Science, Western University, Kanchanaburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: kitisak.lu@western.ac.th

Received: 20 September 2023; Revised: 26 October 2023; Accepted: 15 November 2023

Published online: 28 June 2024

Abstract

The electric furnace temperature control system is one of the real-world second-order systems plus time delay (SOSPD) widely used as the process control in industries. It is normally operated under the PID feedback control loop. The PIDA controller, however, performed better response than the PID controller for higher order plant. In this paper, an optimal PIDA controller design for the electric furnace temperature control system is presented. Regarding to modern optimization context, the Bat-inspired Algorithm (BA) which is one of the most efficient population-based metaheuristic optimization techniques is applied to search for the appropriate PIDA's parameters. The proposed BA-based PIDA design framework is considered as the constrained optimization problem. System responses obtained by the PIDA controller designed by the BA will be compared with those obtained by the PIDA controller also designed by the BA. As results, it was found that the PIDA can provides the very satisfactory tracking and regulating responses of the electric furnace temperature control system superior to the PIDA, significantly.

Keywords: Electric furnace temperature control, Metaheuristic optimization, PIDA controller

1) บทนำ

ระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าเป็นระบบอันดับสองที่มีการประวิงเวลา (Second-Order System Plus Time Delay: SOSPD) [1], ซึ่งเป็นปัญหาจริงที่ถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม [2], เตาหลอมไฟฟ้าใช้พลังงานหลักจากแหล่งกำเนิดเพื่อผลิตความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนดเพื่อการใช้งานเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า หรืออุตสาหกรรมผลิตกระเบื้อง เป็นต้นจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า อุณหภูมิของระบบเตาหลอมไฟฟ้าสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ตัวควบคุม PID (proportional-integral-derivative controller) [3], ภายใต้ระบบควบคุมวงปิด นอกจากนี้ยังมีการใช้งานตัวควบคุมฟัซซี [4], ตัวควบคุมฟัซซี-PID [5] อย่างไรก็ตาม การควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม PID เป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมและมีรูปแบบง่ายที่สุด

ในบริบทของการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้าสามารถพิจารณาให้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข (constrained optimization problem) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการเมตาฮิวริสติกจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้มีการประยุกต์วิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อการออกแบบ PID สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [6], และขั้นตอนวิธีแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) [7]

ในปี ค.ศ. 1996 Jung และ Dorf [8] ได้เสนอให้ตัวควบคุม PIDA (proportional-integral-derivative-accelerated controller) สำหรับพลาสมาอันดับสามโดยเฉพาะ ตัวควบคุม PIDA ประกอบด้วย ศูนย์ (zero) จำนวนสามตัว และขั้ว (pole) ที่จุดกำเนิดจำนวนหนึ่งตัว ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพเหนือกว่า ตัวควบคุม PID ภายหลังจากที่ตัวควบคุม PIDA ได้รับการนำเสนอ ได้มีการนำเอาเทคนิคการค้นหาแบบเมตาฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบอย่างแพร่หลาย เช่น การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วย GA [9], การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [10], การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยการค้นหาแบบกระแสน้ำ (Current Search: CuR) [11], เป็นต้น

วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary algorithm) [6], [7], [12] เป็นวิธีที่ใช้กลุ่มประชากรเป็นฐานเพื่อใช้สำหรับค้นหาผลลัพธ์

ของปัญหาที่มีความซับซ้อน วิธีการเชิงวิวัฒนาการจะใช้กลไกการคำนวณที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากการวิวัฒนาการทางชีววิทยา ได้แก่ การสืบพันธุ์ การกลายพันธุ์และการแลกเปลี่ยนยีน เป็นการคัดเลือกโดยใช้คำตอบที่ได้ในการแก้ไขปัญหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด เช่น การคำนวณสัดส่วนของสารเคมีเพื่อให้ได้องค์ประกอบของสารที่มีประสิทธิภาพ การบริหารทรัพยากรในการผลิตให้มีประสิทธิภาพ วิธีการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ใช้การคำนวณเชิงวิวัฒนาการทั้งสิ้น

วิธีการเชิงวิวัฒนาการมีหลายแบบวิธี และวิธีที่ใช้กันแพร่หลายคือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [6] และวิธีนี้ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด

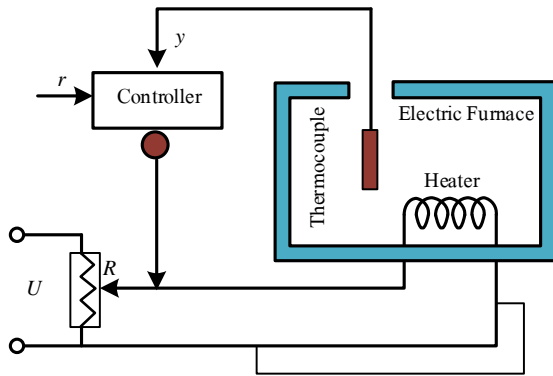
ในปี ค.ศ. 2010 ขั้นตอนวิธีแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) [13] ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรกจาก Yang โดยวิธีการเมตาฮิวริสติกแบบอิงประชากร (population-based metaheuristics) ขั้นตอนวิธี BA เลียนแบบพฤติกรรมการระบุตำแหน่งด้วยเสียงสะท้อน (echolocation) ของค้างคาวขนาดเล็ก ซึ่งทำให้สามารถค้นหาเหยื่อและระบุความแตกต่างของเหยื่อและวัตถุอื่นได้ในความมืด จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า BA ได้รับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น การออกแบบคันเชื่อม [14], การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง [15], การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าอย่างประหยัด [16] และการออกแบบระบบควบคุม [17]

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PIDA อย่างเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้าด้วย BA เนื่องจาก BA เป็นหนึ่งในอัลกอริทึม (algorithm) ที่ยังใหม่ และฟังก์ชันไม่คอยซับซ้อน สามารถนำมาพัฒนาต่อได้ ผู้วิจัยจึงนำ BA มาทำงานวิจัยในครั้งนี้ และงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลกับตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตัวควบคุม PIDA และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมไฟฟ้า กรอบงานการออกแบบ ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA การอภิปรายผลการออกแบบ และสรุป

2) ระบบเตาหลอมไฟฟ้า

ระบบเตาหลอมไฟฟ้าในรูปที่ 1 [18], [19] ประกอบด้วยเตาหลอมไฟฟ้าตัวควบคุมเทอร์โมคัปเปิลและเครื่องทำความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาไฟฟ้า r คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้า, U คือ

แรงดันไฟฟ้าขาออกแรงดันไฟฟ้าจากตัวควบคุม y คือแรงดันขาออกจากเทอร์โมคัปเปิล และ R เป็นตัวเหนี่ยวนำความต้านทาน



รูปที่ 1 : กรอบงานการออกแบบระบบเตาหลอมไฟฟ้า

ฟังก์ชันการถ่าย S โอนโดเมนของระบบเตาไฟฟ้า ถูกจัดทำขึ้น [18] ตามที่ระบุในสมการที่ (1) ความหน่วงเวลา (หรือความล่าช้าการส่ง) ในสมการที่ (1) เป็นค่าประมาณในสมการที่ (2) จากนั้นฟังก์ชันการถ่าย S โอนโดเมนของระบบเตาไฟฟ้าในสมการที่ (1) สามารถเขียนใหม่ได้ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ (3) รูปแบบในสมการที่ (3) จะใช้เป็นสมการควบคุมที่แสดงในรูปที่ 1

$$G_p(s) = \frac{0.15e^{-1.5s}}{s^2 + 1.1s + 0.2} \quad (1)$$

$$e^{-1.5s} = \frac{1 - 0.75s}{1 + 0.75s} \quad (2)$$

$$G_p(s) = \frac{-0.1125s + 0.15}{0.75s^3 + 1.825s^2 + 1.25s + 0.2} \quad (3)$$

3) การออกแบบตัวควบคุม PIDA

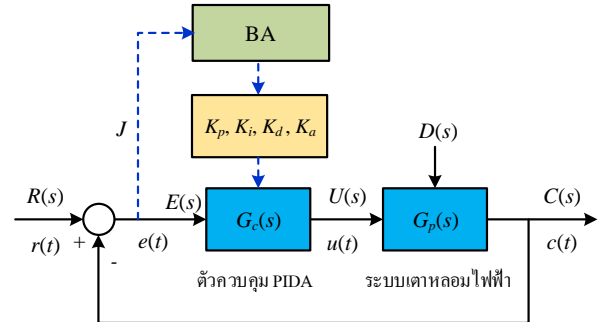
3.1) ตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA)

การออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีตัวควบคุม PIDA แสดงดังสมการที่ (4) และการค้นหาค่า K_p , K_i , K_d และ K_a ภายในปริภูมิการค้นที่กำหนดในสมการที่ (6) ด้วยการทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในสมการที่ (5) มีค่าน้อยที่สุด

$$G_c(s) \Big|_{PIDA} = K_c \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \quad (4)$$

$$\text{Minimize } J = \sum_{i=1}^N (r_i - c_i)^2 \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \left. \begin{aligned} t_r &\leq t_{r_max}, & M_p &\leq M_{p_max}, \\ t_s &\leq t_{s_max}, & E_{ss} &\leq E_{ss_max}, \\ K_{p_min} &\leq K_p \leq K_{p_max}, \\ K_{i_min} &\leq K_i \leq K_{i_max}, \\ K_{d_min} &\leq K_d \leq K_{d_max}, \\ K_{a_min} &\leq K_a \leq K_{a_max}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$



รูปที่ 2 : การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วย BA

3.2) ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบค้างคาว

ขั้นตอนวิธีแบบค้างคาว หรือ BA ได้รับการนำเสนอโดย Yang ในปี ค.ศ. 2010 [13], [14] ด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติก ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการหาอาหารของค้างคาว ขั้นตอนวิธี BA ได้ถูกนิยามจากกฎอุดมคติ 3 ข้อต่อไปนี้

1. ค้างคาวทุกตัวใช้หลักการสะท้อนเพื่อตรวจวัดระยะทาง (echolocation) และรับรู้ถึงความแตกต่างระหว่างอาหาร (หรือเหยื่อ) และสิ่งกีดขวาง

2. ค้างคาวจะบินแบบสุ่มที่ความเร็ว v_i ณ ตำแหน่ง x_i ด้วยความถี่ f_{min} จากนั้นจะปรับแปรความยาวคลื่น (wavelength) λ และความดัง (loudness) A_0 เพื่อค้นหาเหยื่อ ซึ่งสามารถปรับ λ (หรือความถี่ $f \in [0, f_{max}]$) ได้อย่างอัตโนมัติ รวมทั้งยังสามารถปรับอัตราการส่งพัลส์ $r \in [0, 1]$ ที่ขึ้นกับระยะห่างของเหยื่อ ($r = 0$ คือไม่มีการส่งพัลส์ และ $r = 1$ คือมีการส่งพัลส์ด้วยอัตราการส่งสูงสุด)

3. ความดังสามารถปรับแปรได้หลายแนวทาง ในขั้นตอนวิธี BA จะกำหนดให้ความดัง A_0 มีค่าเป็นบวกมาก ๆ และลดลงสู่ค่าความดังต่ำสุด A_{min} เมื่อค้างคาวเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อ

ขั้นตอนวิธีแบบ BA สามารถแสดงด้วยรหัสเทียมดังรูปที่ 3 ค้างคาวแต่ละตัวจะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว v_i และตำแหน่ง x_i ณ เวลา t ในปริภูมิการค้นหามิติ d เมื่อ x^* คือ ผลเฉลย (ตำแหน่ง) ที่ดีที่สุดปัจจุบัน ในระหว่างการค้นหา ค้างคาวแต่ละ

ตัวจะถูกกำหนดแบบการสุ่มตามความถี่ในช่วง (f_{min}, f_{max}) ดังแสดงในสมการที่ (7) เมื่อ $\beta \in [0, 1]$ คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกภาพ ความเร็ว v_i ของค้างคาวแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) ตำแหน่ง x_i (หรือผลเฉลย) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) ความดัง A_i และอัตราการส่งพัลส์ r จะถูกปรับตามที่แสดงในสมการที่ (10) และสมการที่ (11) ซึ่งพบว่าจากคำแนะนำของ Yang [13], [14] ในกรณีทั่วไป $\alpha = \gamma \in [0.90, 0.98]$

Objective function $f(x)$, $x=(x_1, \dots, x_d)^T$
Initialize the bat population $x_i(i=1,2,\dots,n)$ and v_i
Define pulse frequency f_i at x_i
Define initial best x^*
Initialize pulse rates r_i and the loudness A_i
While ($t < \text{Max_Iteration}$)
-Generate new solutions by adjusting frequency in (7)
-Updating velocities in (8) and locations/solutions in (9)
 if ($\text{rand} > r_i$)
 -Select a solution among the best solution
 -Generate a local solution around the selected best solution
 end if
-Generate a new solution by flying randomly
if ($\text{rand} < A_i$ & $f(x_i) < f(x^*)$)
-Accept the new solutions
-Reduce A_i in (10) and increase r_i in (11)
end if
-**Rank** the bats and find the current best x^*
end while
Report the best solution found

รูปที่ 3 : รหัสเทียมของขั้นตอนวิธี BA

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \quad (7)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x^*)f_i \quad (8)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (9)$$

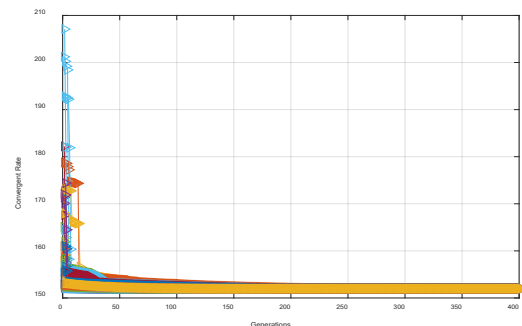
$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 (1 - e^{-\gamma}), \quad \gamma > 0 \quad (11)$$

4) ผลการทดลองและอภิปรายผล

การออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA แสดงดังรูปที่ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ถูกกำหนดให้เป็นผลรวมกำลังสองระหว่างสัญญาณเข้า $r(t)$ และสัญญาณออก $c(t)$ ดังแสดงในสมการที่ (5) เมื่อ N คือจำนวนข้อมูล จากรูปที่ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J จะถูกป้อนให้กับ BA เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขสมการที่กำหนดจากข้อกำหนดสมรรถนะที่พึงประสงค์ในการออกแบบ ขอบเขตของสัญญาณควบคุมในการอนุญาตตัวควบคุม และปริภูมิการค้นหา ดังแสดงในสมการที่ (6)

การออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA ขั้นตอนวิธี BA จะถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาด้วยโปรแกรม MATLAB ประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU@2.30GHz, 8GB RAM จากนั้นดำเนินการทดสอบสมรรถนะการค้นหาผลเฉลยของ BA กับปัญหาการออกแบบตัวควบคุม PIDA สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า ด้วยการกำหนดให้ $n = 25$, $\alpha = 0.90$ และ $\gamma = 0.98$ เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ของ BA ที่เหมาะสมที่สุด ดำเนินการทั้งหมด 50 ครั้ง (trial) ซึ่งในแต่ละครั้งกำหนดให้เกณฑ์ยุติการค้นหา (TC) เมื่อจำนวนรอบการค้นหา (Iter) มีค่าเท่ากับจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด (Max_Iter = 400) จะได้ $K_p = 5.56$, $K_i = 0.48$, $K_d = 8.11$ และ $K_o = 3.22$ แสดงอัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยในรูปที่ 4



รูปที่ 4 : เส้นกราฟอัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของ BA ดำเนินการทั้งหมด 50 ครั้ง

จากรูปที่ 4 เป็นผลการออกแบบตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA เมื่อดำเนินการทั้งหมด 50 ครั้ง อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของ BA พบว่า เส้นกราฟจำนวน 50 เส้นแสดงการลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของแต่ละเส้นจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าผลเฉลยเริ่มต้น (initial solution) ที่ได้จากการสุ่ม (random process) มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อการค้นหาของ BA ดำเนินการไปจนถึงรุ่น (generation) ที่ 400 ซึ่งเป็นเงื่อนไขยุติการค้นหา จะพบว่า BA สามารถค้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (optimal solution) ได้ทุกครั้ง แสดงให้เห็นถึงความทน (robustness) ของกลไกการค้นหาของ BA ที่มีต่อผลเฉลยเริ่มต้นที่แตกต่างกัน

ตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมสำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (12) และตัวควบคุม PIDA ที่เหมาะสมสำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่ออกแบบด้วย BA แสดงดังสมการที่ (13)

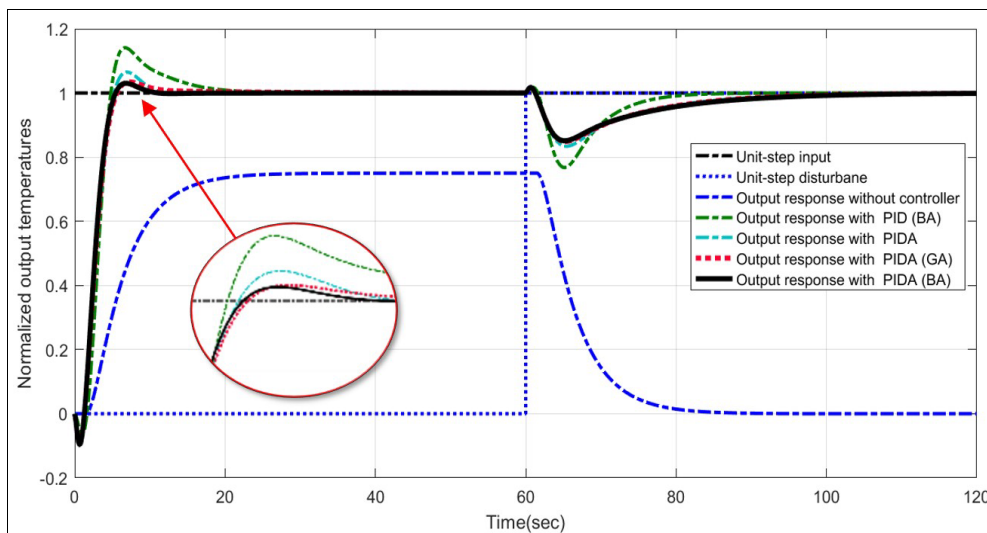
ซึ่งการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA, เมื่อมีตัวควบคุม PIDA ในสมการที่ (12) และเมื่อมีตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA ในสมการที่ (13) แสดงดังรูปที่ 5 และสรุปได้ดังตารางที่ 1

$$G_c(s)|_{PIDA} = 5.13 + \frac{0.47}{s} + 6.78s + 3.22s^2 \quad (12)$$

$$G_c(s)|_{PIDA-BA} = 5.65 + \frac{0.48}{s} + 8.11s + 3.22s^2 \quad (13)$$

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 5 พบว่า เมื่อระบบรับสัญญาณอินพุตที่วินาทีที่ 0 ระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อไม่มีตัวควบคุม จะให้ผลตอบสนองที่ค่อนข้างล่าช้า และเมื่อระบบรับสัญญาณรบกวนที่วินาทีที่ 60 ระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อไม่มีตัวควบคุม ไม่สามารถคุมค่าผลตอบสนองให้กลับคืนมาได้ สำหรับระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID และ PIDA ผลตอบสนองแบบแปรตามสัญญาณอินพุต ในช่วงวินาทีที่ 0-60 พิจารณาจากค่า

M_p และ t_s ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA และตัวควบคุม PIDA ในขณะที่ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตัวควบคุม PIDA และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA ตามลำดับ ส่วนผลตอบสนองแบบคุมค่าการรบกวน ในช่วงวินาทีที่ 60-120 ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA ตัวควบคุม PIDA และ ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA จึงสรุปได้ว่า ตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA มีประสิทธิภาพในการควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า ที่เหนือกว่าตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA, ตัวควบคุม PIDA และ ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตามลำดับ



รูปที่ 5 : การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA, เมื่อมีตัวควบคุม PIDA และเมื่อมีตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA

ตารางที่ 1 : ผลตอบสนองของระบบเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อมีตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA, เมื่อมีตัวควบคุม PIDA และเมื่อมีตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA

ตัวควบคุม	ผลตอบสนอง						
	ผลตอบสนองแบบแปรตามสัญญาณอินพุต				ผลตอบสนองแบบคุมค่าการรบกวน		
	t_r (sec)	M_p (%)	t_s (sec)	e_{ss} (%)	t_{reg} (sec)	$M_{p_{reg}}$ (%)	e_{ss} (%)
ไม่มีตัวควบคุม	7.00	0.00	26.00	0.00	-ไม่สามารถคุมค่าการรบกวน-		
PID-BA	4.35	14	20.1	0.00	85	23.2	0.00
PIDA	4.4	6.5	16	0.00	105	16.5	0.00
PIDA-GA	4.5	3.4	15.6	0.00	105.5	15.35	0.00
PIDA-BA	4.3	3.01	10.5	0.00	105.5	14.6	0.00

5) สรุปผล

การออกแบบควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย BA เพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาไฟฟ้า ในบทความนี้ได้นำเสนอปัญหาด้านการเพิ่มประสิทธิภาพที่จำกัดมีการใช้ขั้นตอนวิธี BA เพื่อลดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ควบคุมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุม PIDA และได้รับการเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วย BA ตัวควบคุม PIDA และตัวควบคุม PIDA ที่ออกแบบด้วย GA จากผลการวิจัยพบว่า PIDA ที่ออกแบบด้วย BA สามารถติดตามและควบคุมการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิเตาไฟฟ้าที่เหนือกว่า PID_BA, PIDA และ PIDA_GA ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการควบคุมระบบเตาหลอมไฟฟ้า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลงด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น ที่อำนวยความสะดวกห้องวิจัย

REFERENCES

- [1] A. O' Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, 3rd ed. London, U.K.: Imperial College Press, 2009.
- [2] B. G. Lipták, *Instrumentation Engineers Handbook Process Control*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1995.
- [3] Y. Han, J. Jinling, C. Guangjian, and C. Xizhen, "Temperature control of electric furnace based on fuzzy PID," in *Proc. Int. Conf. Electron. and Optoelectronics*, Dalian, China, Jul. 2011, pp. V3-41–V3-44.
- [4] F. Teng and H. Li, "Adaptive fuzzy control for the electric furnace," in *Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Comput. and Intell. Syst.*, Shanghai, China, Nov. 2009, pp. 439–443.
- [5] X. Junming, Z. Haiming, J. Lingyun, and Z. Rui, "Based on Fuzzy-PID self-tuning temperature control system of the furnace," in *Proc. Int. Conf. Elect. Inf. and Control Eng.*, Wuhan, China, Apr. 2011, pp. 1203–1206.
- [6] B. Srilakshmi and K. Venkataratnam, "Temperature control of electric furnace using genetic algorithm based PID controller," *Int. J. Adv. Eng. Global Technol.*, vol. 3, no. 11, pp. 1348–1352, Dec. 2015.
- [7] C. Thammarat, K. Lurang, D. Puangdownreong, S. Hlangnamthip, A. Nawikavatan, and S. Suwannarongsri, "Application of bat-Inspired algorithm to optimal PIDA controller design for liquid-level system," in *Proc. Int. Elect. Eng. Congr. (IEECON)*, Krabi, Thailand, Mar. 2018, pp. 556–559.
- [8] S. Jung and R. C. Dorf, "Analytic PIDA controller design technique for a third order system," in *Proc. 35th IEEE Conf. Decis. and Control*, Kobe, Japan, Dec. 1996, pp. 2513–2518.
- [9] S. Sornmuang and S. Sujitjorn, "GA-based PIDA control design optimization with an application to AC motor speed control," *Int. J. Math. Comput. Simul.*, vol. 4, no. 3, pp. 67–80, Jan. 2010.
- [10] D. Puangdownreong and S. Suwannarongsri, "Torsional resonance suppression via PIDA controller designed by the particle swarm optimization," in *Proc. 5th Int. Conf. Elect. Eng./Electron. Comput. Telecommun. Inf. Technol. (ECTI-CON)*, Krabi, Thailand, May 2008, pp. 673–676.
- [11] C. Thammarat, P. Sukseam, D. Puangdown-reong, and S. Suwannarongsri, "Design of PIDA controllers via particle swarm optimization," (in Thai), in *Proc. Int. Annu. Symp. Comput. Sci. and Eng. Symp. (ANSCSE12)*, Ubon Ratchathani, Thailand, Mar. 2008, pp. 393–398.
- [12] X. S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, Heidelberg, Germany: Springer, 2010, pp. 65–74.
- [13] X.-S. Yang, "Bat algorithm for multi-objective optimisation," *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, vol. 3, no. 5, pp. 267–274, 2011.
- [14] A. Benaissa, A. Zeblah, A. Belafdal, and A. Chaker, "An efficient bat algorithm for series-parallel power system optimization," *J. Elect. Electron. Syst.*, vol. 5, no. 3, 2016, Art. no. 1000189.
- [15] B. Ramesh, V. C. J. Mohan, and V. C. V Reddy, "Application of bat algorithm for combined economic load and emission dispatch," *Int. J. Elect. Eng. Telecommun.*, vol. 2, no.1, pp. 1–9, Jan. 2013.
- [16] C. Thammarat, K. Lurang, D. Puangdownreong, S. Hlangnamthip, A. Nawikavatan, and S. Suwannarongsri, "Application of Bat-Inspired algorithm to optimal PIDA controller design for liquid-level system," in *Proc. Int. Elect. Eng. Congr. (IEECON)*, Krabi, Thailand, Mar. 2018, pp. 556–559.



- [17] J. Paulusová and M. Dubravská, "Application of design of PID controller for continuous systems," in *Proc. 20th ročník medzinárodnej konferencie: Tech. Comput. Bratislava*, Bratislava, Slovakia, Nov. 2012. pp. 1–6.
- [18] N. Pringsakul, D. Puangdownreong, C. Thammarat, and S. Hlangnamthip, "Obtaining optimal PIDA controller for temperature control of electric furnace system via flower pollination algorithm," *WSEAS Trans. Syst. Control*, vol. 14, pp. 1–7, 2019.

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติต้นทุนต่ำแบบ หัวจ่ายเดียวที่ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

ธีระพงษ์ บุญรักษา¹ ธนทัต เกตุแก้ว¹ ยศนันท์ หนูคง¹ กันต์ธีร์ คงเจริญ¹ สมมาตร ทองคำ² มณีนีรัตน์ ชนะสกุลนิยม²
วรกฤตย์ พ่วงทรัพย์² อธิพงษ์ ย่องหยี³ วิภาดา วงศ์สุริยา³ พรหมพัชร์ บุญรักษา^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, นครปฐม, ประเทศไทย

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

^{3*}สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ,
นนทบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : promphak.b@rmutsb.ac.th

รับต้นฉบับ : 2 กรกฎาคม 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 24 กุมภาพันธ์ 2567; ตอบรับบทความ : 11 มีนาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 28 มิถุนายน 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติต้นทุนต่ำแบบหัวจ่ายเดียวที่ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ซึ่งโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ถูกใช้ควบคุมการทำงานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและควบคุมสเต็มมอเตอร์ของตัวเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ โดยมีหลักการทำงานเป็นขั้นตอนดังนี้ 1) เมื่อน้ำขวดน้ำวางที่สายพานลำเลียง สายพานลำเลียงจะส่งขวดไปยังจุดบรรจุน้ำ 2) เมื่อบรรจุน้ำจนถึงปริมาตรที่เหมาะสมจะย้ายขวดน้ำจากจุดบรรจุน้ำไปยังจุดปิดชั้นฝาโดยใช้การหมุนจากสเต็มมอเตอร์ 3) ขั้นตอนการปิดฝาขวดน้ำดื่ม ทำการขันฝาขวดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระบอกลม โดยมีเซนเซอร์สั่งการให้กระบอกลมดันลงมาปิดฝาและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนเพื่อทำการปิดฝาให้เข้าเกลียว และ 4) เมื่อปิดฝาเสร็จสเต็มมอเตอร์หมุนเพื่อนำตัวขวดน้ำที่ปิดแล้วไปที่สายพานลำเลียงขาออก ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ มาตรฐานการวิเคราะห์ทางสถิติ (analytical statistics) ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง ประกอบด้วย 3 ค่า คือ การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำดื่มที่บรรจุได้อยู่ที่ 597.27 มิลลิลิตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) อยู่ที่ 2.87 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) มีค่า 1.95 แปลผลว่าเครื่องบรรจุน้ำดื่มคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ± 1.95 มีผลการทดสอบหารอบเวลาการผลิตที่เหมาะสมอยู่ที่ 12 นาที และอัตราการบรรจุน้ำพบว่าสามารถบรรจุน้ำได้เฉลี่ย 8 ขวดต่อนาที ผลด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าพบว่าใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 32.1 วัตต์ โดยใช้พลังงานต่อการทำงาน 1 ขวดเท่ากับ 0.6 วัตต์ชั่วโมง เครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติที่ได้สร้างขึ้นมีอัตราการเดินเครื่องร้อยละ 99 ค่าประสิทธิภาพการเดินเครื่องร้อยละ 100 อัตราคุณภาพร้อยละ 88.89 และค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness) อยู่ที่ร้อยละ 88.00 เมื่อเทียบกับเครื่องจักรในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปถือว่าเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติมีประสิทธิภาพโดยรวมในระดับดี และในส่วนของต้นทุนในการสร้างเครื่องพบว่ามีความต่ำกว่าราคาขายบนท้องตลาด

คำสำคัญ : เครื่องบรรจุน้ำดื่ม, การวัดประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร, ต้นทุนการผลิต, โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์, อัตราการบรรจุน้ำ



Performance Analysis of a Low-cost Automatic Single-Dispenser Drinking Water Filling Machine Controlled by a Programmable Logic Controller

Terapong Boonraksa¹ Thanatat Ketkaew¹ Yotsanon Nukong¹ Kanthi Kongcharoen¹ Sommart Thongkom²
Maneerat Chanasakunniyom² Worakrit Phuangsub² Ittipong Yongyee³ Wipada Wongsuriya³
Promphak Boonraksa^{3*}

¹*School of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom, Thailand*

²*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, Bangkok, Thailand*

^{3*}*Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: promphak.b@rmutsb.ac.th

Received: 2 July 2023; Revised: 24 February 2024; Accepted: 11 March 2024

Published online: 28 June 2024

Abstract

This research presents the application of a Programmable logic controller to control the operation of an automatic drinking water filling machine. The PLC is used to control the operation of the DC motor and control the stepper motor of the automatic drinking water filling machine. The working principle is as follows: 1) When a water bottle is placed on the conveyor belt, a conveyor belt delivers the bottles to the water-filling point. 2) When the water is filled to the right volume, the water bottle will be moved from the water-filling point to the capping point using the stepper motor rotation. 3) The process of capping the bottle cap tightening by direct current electric motor and air cylinder with a sensor to order the air cylinder to push down to close the lid, and the DC electric motor rotates to close the lid to the screw, and 4) When the lid is closed, the stepping motor rotates to bring the closed water bottle to the leg conveyor. The operation of the automatic drinking water filling machine was tested using statistical analysis standards with a total of 30 tests consisting of 3 values: finding the average value of the bottled drinking water volume at 597.27 milliliters and the standard deviation is 2.87 and the root mean square error (RMSE) is 1.95, meaning the water filling machine has an error of ± 1.95 . The test results to find the optimum production cycle time of 12 minutes and the water filling rate found that it could fill an average of 8 bottles of water per minute. The energy consumption was found to use a maximum power of 32.1 W with an energy of 0.6 Wh per bottle. The automatic drinking water filling machine that has been created has an Availability% is at 99%, a Performance% is at 100%, a quality rate is at 88.89% and an overall equipment effectiveness is at 88.00%. Compared to industrial machines, automatic drinking water filling machines are generally considered to have good overall performance at a lower cost than the market price.

Keywords: Drinking water filling machine, Overall equipment effectiveness, Production costs, Programmable logic controller, Water filling rate

1) บทนำ

ปัจจุบันในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งเล็กและใหญ่ มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทั้งด้านกระบวนการผลิต การลำเลียงสินค้า การจัดเก็บสินค้า และมีความต้องการที่จะลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มผลผลิต ดังนั้น จึงได้มีการนำเอาโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดการใช้จ่ายในการจ้างบุคลากรในการทำหน้าที่ในแต่ละส่วนในการทำงาน เช่น การจำแนกสินค้า การเช็คจำนวน การจัดเก็บสินค้า การจัดส่งสินค้า และอีกมากมาย [1], [2]

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Control: PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการทำงานต่าง ๆ โดยภายในมี Microprocessor เป็นมันสมองสั่งการที่สำคัญ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มีส่วนที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถต่อออกไปใช้งานได้ทันที ตัวตรวจวัดหรือสวิตช์ต่าง ๆ จะต่อเข้ากับอินพุต ส่วนเอาต์พุตจะใช้ต่อออกไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่เป็นเป้าหมาย ซึ่งสามารถสร้างวงจรหรือแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนเป็นโปรแกรมคำสั่งเข้าไปในโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น เช่น เครื่องอ่านบาร์โค้ด (Barcode Reader) เครื่องพิมพ์ (Printer) ในปัจจุบันนอกจากโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์จะใช้งานแบบเดี่ยว (Stand-alone) แล้วยังสามารถต่อโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์หลาย ๆ ตัวเข้าด้วยกัน (Network) เพื่อควบคุมการทำงานของระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วยจะเห็นได้ว่าการใช้งานโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มีความยืดหยุ่นมากดังนั้นในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงเปลี่ยนมาใช้ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มากขึ้น [3], [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพเครื่องบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติเพื่อให้ต้นทุนต่ำที่สุด โดยใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานระบบสายพาน และทำการเปรียบเทียบต้นทุนการสร้างเครื่องกับราคาขายบนท้องตลาด

2) ทบทวนวรรณกรรม

การใช้งานโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เริ่มมีความนิยมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้นำโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มาใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักร เช่น แขนกลจับชิ้นงานจากเครื่องคัดแยกวัตถุดิบตามสายพาน [5], [6] และการออกแบบและสร้างเครื่องปิดฝาจับอัตโนมัติ [7] โดยนักวิจัยกลุ่มหนึ่งได้ออกแบบและพัฒนาระบบคัดแยกขนาดปลาอัตโนมัติโดยการวิเคราะห์ข้อมูลภาพจากกล้องวิดีโอภาพปลาที่ไหลมาตามสายพานจะผ่านระบบประมวลผลเพื่อวิเคราะห์หาความยาวของตัวปลาแล้วไปเปรียบเทียบกับความยาวกับข้อมูลในฐานข้อมูล ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของระบบทางกลศาสตร์ที่สามารถแยกขนาดปลาออกจากกันได้จริง ระบบนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุตสาหกรรมประมงจากการใช้แรงงานมนุษย์ในกระบวนการคัดแยกขนาดปลา โดยใช้สายตาวัดหรือไม้บรรทัดวัดซึ่งมีโอกาสผิดพลาดได้ง่าย [8] และอีกงานวิจัยหนึ่งนักวิจัยได้มีการสร้างเครื่องคัดแยกพริกหวานอัตโนมัติโดยอาศัยหลักการตรวจจับสีของพริกด้วยการประมวลผลภาพในระบบภาพ HSV ผ่านระบบสายพานลำเลียง จากนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 จะควบคุมส่วนคัดแยกให้พริกหวานไหลลงสู่ช่องตามที่กำหนด [9] โดยสามารถนำระบบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าแรงงานได้ ระบบนี้สามารถเป็นต้นแบบเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดกับอุตสาหกรรมต่อไป

ในส่วนสายพานลำเลียงอัตโนมัติแยกขยะรีไซเคิลด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ มอเตอร์กระแสตรงใช้สำหรับดันวัตถุสร้างสายพานลำเลียงลงในถังรีไซเคิล ระบบประกอบด้วยสายพานลำเลียงสองเส้นสำหรับถ่ายวัตถุและกล่องและกลไกการซ้อนประกอบด้วยลิฟต์และขาตั้งสำหรับวางกล่อง สายพานลำเลียงนำวัตถุที่อยู่ใกล้เซนเซอร์และด้วยเหตุนี้จึงมีการตัดสินใจลอจิกสำหรับ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ได้รับการตั้งโปรแกรมสำหรับการเรียงลำดับการนับและการซ้อนของวัตถุ ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์สำหรับส่งสัญญาณการนับวัตถุ และการตรวจจับกล่องของโลหะด้วยเซนเซอร์ [10], [11]

ในมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตน้ำดื่มบรรจุขวดโดยใช้หลักการ ECRS และหลักการ 5W1H เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมในการผลิต และมุ่งเน้นขจัดความสูญเปล่าด้านเวลา ทำการบันทึกข้อมูล

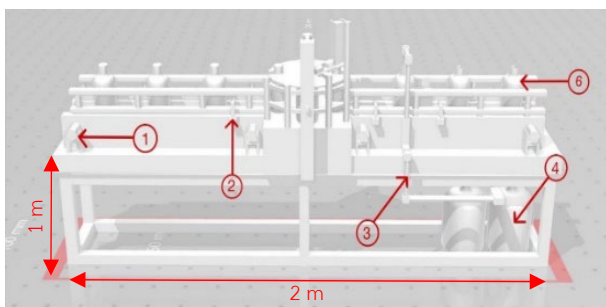
ขั้นตอนการผลิต ระยะเวลาในการผลิตของแต่ละขั้นตอนและหาเวลามาตรฐาน จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อหากิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า (NVA) และทำให้เกิดความสูญเปล่าด้วยเทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H และออกแบบแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามหลัก ECRS จากผลการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการปรับปรุงขั้นตอนการผลิตพบว่า สามารถลดขั้นตอนการผลิตลงจากเดิม 14 ขั้นตอน เหลือ 11 ขั้นตอน ซึ่งลดลงร้อยละ 21.43 และสามารถลดระยะเวลาการผลิตน้ำดื่มบรรจุขวดจากเดิม 247.77 วินาทีต่อการผลิตน้ำดื่ม 12 ขวด ลดลงมาเหลือ 207.79 วินาทีต่อการผลิตน้ำดื่ม 12 ขวด ลดลงร้อยละ 16.14 [12]

3) วิธีดำเนินการวิจัย

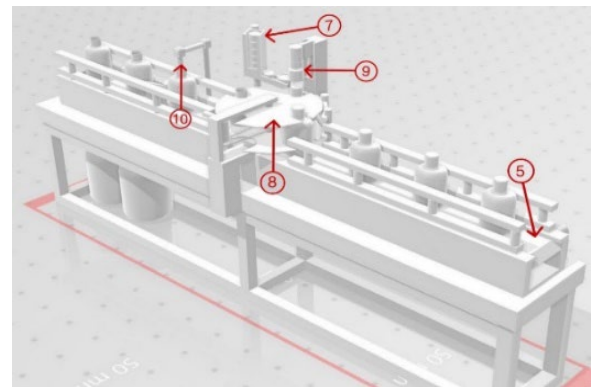
การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งได้ 2 หัวข้อ ประกอบด้วย การออกแบบกระบวนการการทำงานเบื้องต้นของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ และการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1) การออกแบบโครงสร้างของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

ทำการออกแบบโครงสร้างเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยระบบโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ โดยใช้โปรแกรม Shapr3D แบบจำลองของชิ้นงานเบื้องต้นมุมที่ 1 แสดงดังรูปที่ 1 และแบบของชิ้นงานเบื้องต้นมุมที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2 และรายการอุปกรณ์ที่ใช้และเหตุผลในการเลือกใช้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 : แบบของชิ้นงานเบื้องต้นมุมที่ 1



รูปที่ 2 : แบบของชิ้นงานเบื้องต้นมุมที่ 2

จากรูปที่ 1 และ 2 แบบของชิ้นงานเบื้องต้นมุมที่ 1 และแบบของชิ้นงานเบื้องต้นมุมที่ 2 อธิบายได้ดังนี้

หมายเลขที่ 1 มอเตอร์ (motor) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนสายพานตามระบบงานและขับเคลื่อนสล็อตขวดน้ำให้ทำงานตามระบบสุดท้ายทำหน้าที่ปิดฝาขวดให้สมบูรณ์ตามการทำงาน

หมายเลขที่ 2 เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (capacitive sensor) ทำหน้าที่ตรวจจับวัตถุขนาดระบบกำลังทำงานเพื่อให้การทำงานสมบูรณ์ เป็นไปตามขั้นตอนการทำงานของระบบ

หมายเลขที่ 3 ท่อลำเลียงน้ำทำหน้าที่ลำเลียงน้ำดื่มไปยังขวดน้ำตามการทำงานของระบบ

หมายเลขที่ 4 ถังกักเก็บน้ำเพื่อส่งต่อท่อลำเลียงน้ำ

หมายเลขที่ 5 สายพานลำเลียงขวดน้ำของเครื่องบรรจุน้ำดื่มทั้งระบบ

หมายเลขที่ 6 ขวดน้ำที่รอการบรรจุน้ำดื่ม

หมายเลขที่ 7 สล็อตบรรจุฝาขวดน้ำที่รอการลำเลียงไปยังจุดปิดฝาขวดเพื่อให้ตัวปิดฝาขวดทำงาน

หมายเลขที่ 8 สล็อตหมุนการทำงานจากสายพานลำเลียงขวดน้ำที่บรรจุน้ำเสร็จสมบูรณ์ หมุนมาตามตำแหน่งของตัวปิดฝาขวดและทำงานตามลำดับ

หมายเลขที่ 9 ตัวปิดสล็อตฝาขวดให้สมบูรณ์

หมายเลขที่ 10 วาล์วเปิด-ปิดน้ำเพื่อทำการบรรจุน้ำที่ละขวดตามการทำงาน

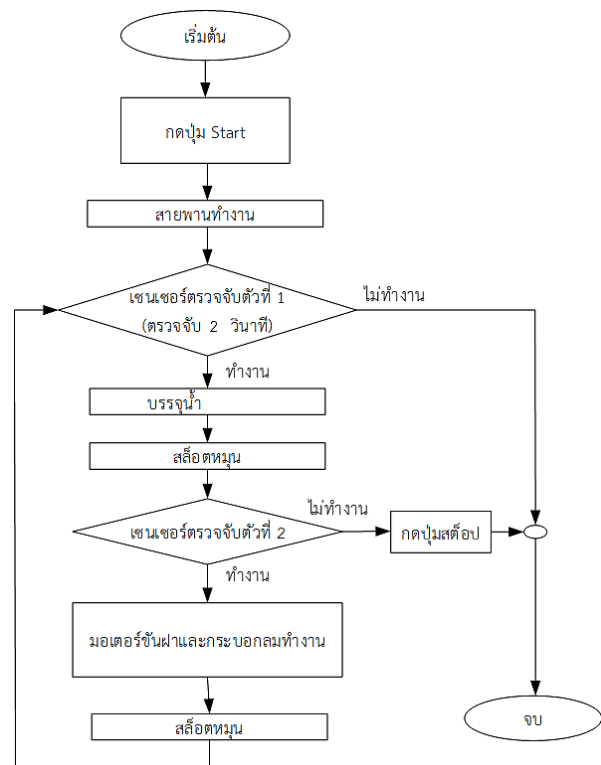
ตารางที่ 1 : รายการอุปกรณ์ที่ใช้และเหตุผลในการเลือกใช้งาน

รายการอุปกรณ์ที่ใช้	เหตุผลในการเลือกใช้งาน	ราคา (บาท)
1. อุปกรณ์จ่ายไฟ กระแสตรง 24 V _{DC}	เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวในการทำงานใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 24 โวลต์และค่าไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 10 A แหล่งจ่ายไฟนี้จึงเหมาะสมต่อการใช้งาน	950
2. มอเตอร์กระแสตรง 24 V _{DC} ความเร็วรอบ 20 rpm	เนื่องจากมีความเร็วรอบต่ำทำให้สายพานลำเลียงขูดน้ำเคลื่อนที่ไม่เร็วมากจึงทำให้ขูดเปลาที่ยังไม่ได้บรรจุหน้านั้นไม่ล้มขณะลำเลียงจึงเหมาะสมกับการใช้งานลำเลียงขูดน้ำที่มีน้ำหนักเบา	1700
3. ปั๊มน้ำมีความเร็วการบรรจุน้ำต่ำลง ขูด 4500 มิลลิเมตร/นาที่	เนื่องจากปั๊มน้ำตัวนี้สามารถดูดน้ำได้ขนาด 4500 มิลลิเมตร/นาที่ แรงมากพอที่จะบรรจุน้ำต่ำลงขูดน้ำที่ขนาด 600 มิลลิเมตร	1800
4. สเต็ปมอเตอร์ และวงจรขับสเต็ปมอเตอร์ TB6560	เนื่องจากสเต็ปมอเตอร์ไม่สามารถทำงานจากบอร์ดคอนโทรลเลอร์โดยตรงได้ จึงใช้วงจรขับสเต็ปมอเตอร์ TB6560 เพื่อเป็นการสั่งการขับเคลื่อนให้กับสเต็ปมอเตอร์ และการปรับค่าความละเอียดขององศาที่ใช้ในงานจริง จะคำนวณได้ดังนี้ จาก Step 1 Step = 1.8 องศา $1.8 / 32 = 0.05625$ องศาต่อ 1 Step	1174
5. พีแอลซีรุ่น FX3U-24MT	มีรูปแบบการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Ladder ด้วยโปรแกรม Gx-developer หรือ Gx-work2 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับแบบวงจรควบคุมไฟฟ้า ทำให้ผู้ใช้งานทำความเข้าใจได้ไม่ยาก จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมไฟฟ้า สามารถเพิ่มหรือขยาย I/O, Analog I/O ได้ เพื่อรองรับระบบควบคุมที่ต้องใช้จำนวน input หรือ output จำนวนมาก	1200
6. อื่น ๆ	อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่นโครงสร้าง	1000
ราคารวม		7,824

3.2) การควบคุมการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยระบบโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

หลักการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติเริ่มจากการกดปุ่มสตาร์ทสายพานชุดที่หนึ่งและชุดที่สองเริ่มทำงานสายพานจะลำเลียงขูดเปลาไปยังเซนเซอร์ตรวจจับขูดน้ำตัวที่ 1 เมื่อเซนเซอร์ทำงานพีแอลซีสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานเป็นกระบวนการบรรจุ

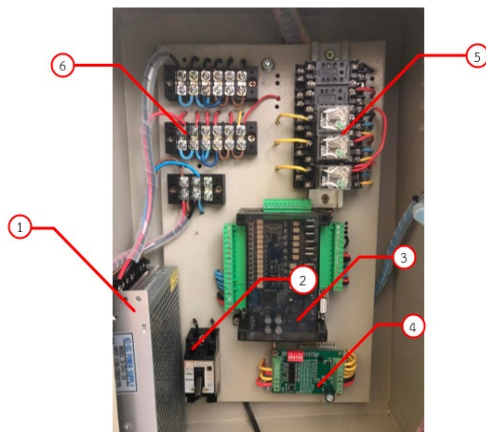
น้ำเป็นเวลา 8 วินาที หากเซนเซอร์ไม่ทำงานเป็นเวลา 2 วินาทีตัวเครื่องจะหยุดการทำงานทันทีต่อจากกระบวนการบรรจุน้ำพีแอลซีสั่งให้สเต็ปมอเตอร์ทำงานเพื่อหมุนสล็อตไปยังจุดขึ้นฝาเมื่อเซนเซอร์ตรวจจับขูดน้ำตัวที่ 2 ทำงานพีแอลซีสั่งให้มอเตอร์ขึ้นฝาและกระบอกลมทำงานเพื่อเป็นการขึ้นฝาให้แน่นสเต็ปมอเตอร์ทำงานอีกครั้งเป็นการส่งออกขูดไปยังสายพานชุดที่ 2 บล็อกโคดของการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : การทำงานเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

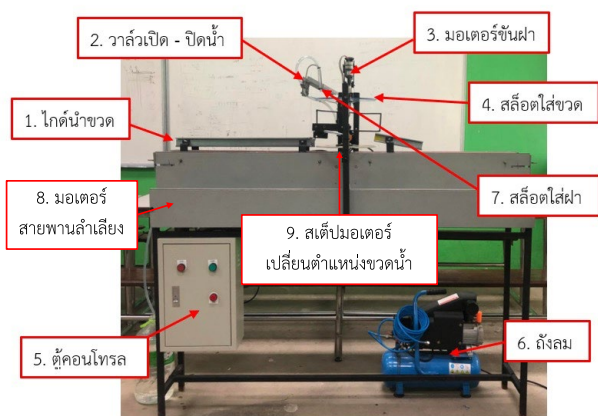
รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์ภายในตู้คอนโทรลของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยระบบ PLC มีส่วนประกอบหลักดังนี้

- หมายเลข 1 Power Supply 24 V_{DC}
- หมายเลข 2 Breaker 2 Pole 15 A
- หมายเลข 3 PLC FX-3U-24 MT
- หมายเลข 4 Drive Stepper Motor TB6560
- หมายเลข 5 Relay MY2N 24 V_{DC}
- หมายเลข 6 Connector



รูปที่ 4 : อุปกรณ์ภายในตู้คอนโทรลของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

เครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น มีโครงสร้างขึ้นเสร็จสมบูรณ์และส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 5

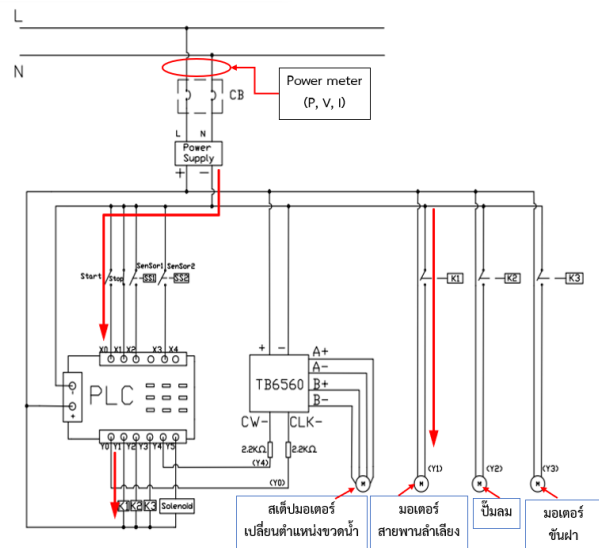


รูปที่ 5 : โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

3.3) การทดสอบวัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

จากการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติมีการใช้กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าโดยการใช้เครื่องวัดไฟฟ้า (power meter) และ (clamp meter) ในการวัดค่าทางไฟฟ้าผู้วิจัยทำการวัดค่าจากจุดที่ต่อจากไฟบ้าน (ไฟฟ้ากระแสสลับ) แสดงดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 เครื่องพีแอลซีทำการควบคุมมอเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว ตัวแรกมอเตอร์สายพานลำเลียงขวดเปล่าเข้าและออกบรรจุน้ำ, ปั้มน้ำ, มอเตอร์หมุนขวดเข้าและออกตามลำดับ และมอเตอร์สำหรับชั้นฝาขวด โดยทำการวัดค่าทางไฟฟ้าประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้า



รูปที่ 6 : ไดอะแกรมการทำงานและการวัดค่าทางไฟฟ้าของการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

3.4) การวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

การทดสอบการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ทางสถิติ (analytical statistics) ประกอบด้วย 3 ค่า คือ การหาค่าเฉลี่ย (Mean: \bar{X}) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Squared Error: RMSE) [13]–[15]

ค่าเฉลี่ยของการบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติสามารถคำนวณจากสมการที่ (4)

$$\bar{X} = \frac{\sum xi}{N} \quad (4)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของการบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติสามารถคำนวณจากสมการที่ (5)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{(N-1)}} \quad (5)$$

และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Squared Error: RMSE) ของการบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติสามารถคำนวณจากสมการที่ (6)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_t - \hat{Y}_t)^2} \quad (6)$$

ในการวัดค่าความแม่นยำของการเติมปริมาณน้ำดื่มจากวิธีการนี้ การแปลผลคือยิ่งค่า RMSE ที่ได้มีค่าน้อยแสดงว่าโมเดลมีความแม่นยำมาก [15]

3.5) การวัดประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร

การวัดประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness) เป็นวิธีการที่ทำให้รู้ประสิทธิภาพและรู้ถึงสาเหตุของการสูญเสีย (loss) ที่เกิดขึ้นในระบบของเครื่องจักร สามารถแยกการสูญเสียและรายละเอียดของสาเหตุนั้น ทำให้สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไข ลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ถูกต้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การพิจารณาค่าประสิทธิผลการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติเพื่อให้ทราบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง [16]-[18] โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$OEE = Availability \times Performance \times Quality \quad (5)$$

อัตราการใช้เครื่อง (Availability) คือประสิทธิภาพที่พิจารณาความพร้อมผลิต ยกตัวอย่างการหยุดที่ทำให้ Availability ลดลง เช่น การหยุดเครื่องจักรโดยไม่ได้วางแผน การเสียของเครื่องจักร การเสียจากการติดตั้งเครื่องจักร ความผิดพลาดจากการเดินเครื่อง เป็นต้น สมการคำนวณแสดงดัง (6)

$$Availability = \frac{Operating Time}{Load Time} \times 100 \quad (6)$$

ประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (Performance Efficiency) คือค่าประสิทธิภาพที่พิจารณาจากจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้เทียบกับขีดความสามารถในการผลิตของเครื่อง ค่า Performance Efficiency จะบอกได้ว่าศักยภาพในการผลิตของเครื่องจักรนั้น ๆ สามารถผลิตได้เต็มกำลังหรือไม่ คำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$Performance Eff = \frac{Good Piece + Bad Piece}{Specification's Capacity Piece} \quad (7)$$

อัตราคุณภาพ (Quality Rate) คือ ค่าประสิทธิภาพที่พิจารณาจากจำนวนชิ้นงานที่ได้จากการผลิต โดยพิจารณาจากชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบว่าเป็นชิ้นงานที่ใช้ได้ เทียบกับจำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ผลิตได้ (Actual output) ค่าอัตราคุณภาพจะบอกถึงประสิทธิภาพในด้านคุณภาพของการผลิตชิ้นงานว่าสามารถผลิตชิ้นงานได้โดยไม่มีชิ้นงานชำรุดเสียหาย (Defect) สมการคำนวณแสดงดังสมการที่ (8)

$$Quality Rate = \frac{(Actual output - Defects)}{Actual output} \quad (8)$$

โดยที่ Actual output คือ จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ผลิตได้

Defects คือ จำนวนชิ้นงานที่เสีย

เครื่องจักรที่ดีต้องเป็นเครื่องจักรที่เปิดขึ้นมาแล้วทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เดินเครื่องได้เต็มกำลังความสามารถ

4) ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1) ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

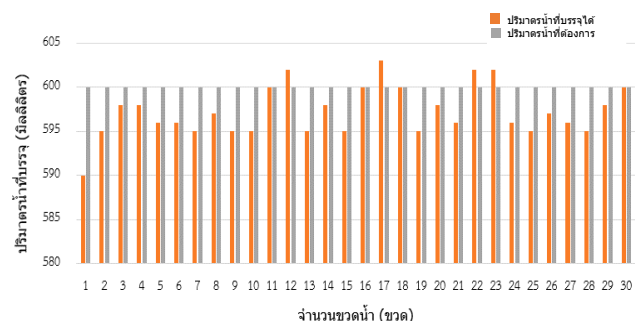
การทดสอบเริ่มจากการหาเวลา (cycle time) ที่เหมาะสมของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติที่สร้างขึ้น การหาเวลานั้นมีความสำคัญต่อระบบการผลิตอัตโนมัติเป็นอย่างมาก หากเราตั้งค่ารอบเวลาเร็วเกินไป ก็อาจจะทำให้ผลผลิตมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง หากตั้งรอบเวลาช้าไปก็อาจจะส่งผลให้ได้ผลผลิตไม่ได้ตามจำนวนที่ต้องการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการหาเวลาที่เหมาะสมของเครื่องโดยรอบเวลาที่เหมาะสมของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : รอบเวลา (Cycle Time) ที่เหมาะสม

สถานะ	เวลาที่ใช้ในการทำงาน (วินาที)
เวลาในการลำเลียงขวดน้ำเข้า	2
เวลาในการบรรจุน้ำ	8
เวลาในการลำเลียงขวดน้ำออก	2
รวมรอบเวลาการทำงาน	12

จากผลการทดสอบในตารางที่ 2 จึงสรุปได้ว่าเครื่องที่สร้างขึ้นมีเวลามาตรฐาน (cycle time) อยู่ที่ 12 วินาที ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับระยะทางการลำเลียงขวดเข้าและออกห่างระยะห่างมากก็จะทำให้เวลานั้นมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนเวลาในการบรรจุน้ำนั้นขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปั๊มน้ำที่นำมาใช้หากปั๊มมีขนาดอัตราเร็วสูงก็จะทำให้มีอัตราการบรรจุน้ำได้เร็วขึ้นแต่ปั๊มน้ำก็จะมีราคาสูงขึ้นด้วย

รูปที่ 7 แสดงผลปริมาตรการบรรจุน้ำโดยทำการทดสอบจำนวน 30 ขวด พบว่าเครื่องสามารถบรรจุน้ำดื่มและขึ้นฝาขวดได้ครบร้อยละ 100 และค่าปริมาตรเฉลี่ยอยู่ที่ 597.27 มิลลิลิตร



รูปที่ 7 : ทดสอบการบรรจุน้ำของเครื่องจำนวน 30 ขวด

การทดสอบการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 30

ครั้ง ประกอบด้วย 3 ค่า คือ การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำดื่มที่บรรจุได้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

รายการ	\bar{X}	SD	RMSE
ประสิทธิภาพของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ	597.27	2.87	1.95

จากตารางที่ 3 การทดสอบการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำดื่มที่บรรจุได้อยู่ที่ 597.27 มิลลิลิตร และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 2.87 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง มีค่า 1.95 ถือว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย

4.2) ผลการทดสอบวัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

จากการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติมีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าโดยการใช้เครื่องวัดไฟฟ้า (power meter) และ (clamp meter) วัดค่าทางไฟฟ้าดังไดอะแกรมรูปที่ 6 คือ วัด ณ จุดที่ต่อจากไฟบ้าน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 : ทดสอบกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะที่เครื่องทำงาน

ขั้นตอนการทำงาน	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
สายพานลำเลียงขวดเปล่า	220	0.142	15.3
กระบวนการบรรจุน้ำ	220	0.265	32.1
สแตมป์มอเตอร์หมุนครั้งที่ 1	220	0.205	23.9
กระบวนการขึ้นฝา	220	0.244	29.3
สแตมป์มอเตอร์หมุนครั้งที่ 2	220	0.189	21.4
สายพานลำเลียงขวดที่มีน้ำ	220	0.159	17.3

จากการทดลองดังกล่าวสรุปได้เมื่อทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในขณะที่เครื่องทำงานมีขนาดกระแสไหลสูงสุด 0.265 A แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V_{AC} ดังนั้นจึงทำให้

กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องนี้อยู่ที่ 32.1 วัตต์ จากกระบวนการบรรจุน้ำ

4.3) ผลการวัดประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ โดยทำการเดินเครื่องเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเดินเครื่องว่าสามารถเดินเครื่องได้เต็มกำลังความสามารถหรือไม่แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 : การวัดประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ

รายการ	ข้อมูล	หน่วย
Shift Time (ระยะเวลาในการผลิต)	360	นาที
Break (เวลาพัก)	60	นาที
Planned Production Time (เวลาการผลิตที่ได้วางแผนไว้)	300	นาที
Downtime	3	นาที
Run Time (เวลาที่เดินการผลิต)	297	นาที
Ideal Run Rate	5	ชิ้น/นาที
Ideal Cycle Time (ความเร็วรอบการทำงานสูงสุด)	0.2	นาที
Total Count จำนวนผลิตทั้งหมด	1,485	ชิ้น
Net Run Time	297	นาที
Reject Count จำนวน Reject (NG)	165	ชิ้น
Good Parts	1,320	ชิ้น
Availability	99.00	%
Performance	100.00	%
Quality	88.89	%
OEE	88.00	%

จากตารางที่เห็นได้ว่าเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติที่ได้สร้างขึ้นมีค่าอัตราการเดินเครื่อง (Availability %) อยู่ที่ 99% ค่าประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (Performance %) อยู่ที่ 100% อัตราคุณภาพ (Quality Rate) 88.89% และค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness) มีค่า 88.00% เมื่อเทียบกับเครื่องจักรในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปถือว่าเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติมีประสิทธิภาพโดยรวมในระดับดี

4.4) เปรียบเทียบราคาเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติแบบหนึ่งหัวจ่าย

เมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตของเครื่องเรียบร้อยแล้วผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบราคาค้นทุนการผลิต

กับเครื่องที่วางขายในท้องตลาดผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 : เปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติแบบหนึ่งหัวจ่าย

ชื่อรุ่นผลิตภัณฑ์	อัตราการบรรจุน้ำ (ขวด/นาที)	ราคา (บาท)
G1WTD 100-1000 ML (เครื่องบรรจุน้ำของเหลว 1 หัว แบบมีกรวยบรรจุ) [19]	15-25	27,000
เครื่องบรรจุน้ำของเหลวแบบ 1 หัวจ่าย รุ่น G1WY LIQUID FILLING MACHINE [20]	20	19,990
G1WTD 500-5000 ML (เครื่องบรรจุน้ำของเหลว 1 หัว แบบมีกรวยบรรจุ) [21]	15-25	42,000
เครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติ แบบหนึ่งหัวจ่ายที่คณะผู้วิจัย สร้างขึ้น	8	7,824

จากการเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติแบบหนึ่งหัวจ่ายพบว่า ต้นทุนการผลิตของเครื่องที่ผู้วิจัยได้ทำการสร้างนั้นมีราคาต่ำที่สุด และมีอัตราการบรรจุน้ำอยู่ที่ 8 ขวดต่อนาที ที่ปริมาตรบรรจุน้ำ 600 มิลลิลิตร และเมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วการบรรจุน้ำจะพบว่าแต่ละรุ่นมีอัตราการบรรจุน้ำที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่ต้องการบรรจุหากปริมาณมากก็จะทำให้ใช้เวลาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5) สรุปผล

การออกแบบเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มาออกแบบวัสดุที่นำมาใช้ในการทำชิ้นงานค่อนข้างแข็งแรง รูปทรงและการออกแบบง่ายต่อการใช้งาน เหมาะสำหรับใช้ศึกษาโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

เมื่อทำการทดสอบการออกแบบเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติควบคุมการทำงานของเครื่องด้วยการนำโปรแกรมโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์มาควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสเต็ปมอเตอร์ โดยมีการทำงานเมื่อนำขวดน้ำวางที่สายพานลำเลียงจะส่งขวดไปยังจุดเติมน้ำ เมื่อเติมน้ำ

จนถึงปริมาณที่เหมาะสมจะย้ายขวดน้ำโดยใช้การหมุนจากสเต็ปมอเตอร์ไปทำกระบวนการปิดฝาขวดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระบอกลม โดยทำงานเมื่อขวดมาถึงจะทำการสั่งให้กระบอกลมลงมาปิดฝาพร้อมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการปิดฝาให้เข้าเกลียวเมื่อปิดฝาเสร็จ สเต็ปมอเตอร์หมุนเพื่อนำตัวขวดน้ำที่ปิดแล้วไปที่สายพานลำเลียงขาออก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการทำงานในทุกขั้นตอนมีประสิทธิภาพที่ดี โดยขวดที่จะใช้งานกับตัวเครื่องนี้จะมีขนาดเท่ากับ 600 มิลลิลิตร และมีฝาเกลียวขนาดประมาณ 20-30 มิลลิเมตรจากการทดลองโดยเฉลี่ยมีอัตราการกรอกน้ำ 5 ขวดต่อนาที จากการทดสอบการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติโดยใช้เวลา 10 นาที เครื่องสามารถบรรจุน้ำดื่มได้ทั้งหมด 27 ขวด และมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 14.81 และเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 32.1 W ดังนั้น สามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อขวดเท่ากับ 0.6 กิโลวัตต์ชั่วโมง และการทดสอบการทำงานของเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ทางสถิติ (analytical statistics) โดยทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง ประกอบด้วย 3 ค่า คือ การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำดื่มที่บรรจุได้อยู่ที่ 597.27 มิลลิลิตร และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD) อยู่ที่ 2.87 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) มีค่า 1.95 แปลผลว่าเครื่องบรรจุน้ำคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ± 1.95 และเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติที่ได้สร้างขึ้นมีค่าอัตราการเดินเครื่อง (Availability %) อยู่ที่ 99% ค่าประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (Performance %) อยู่ที่ 100% อัตราคุณภาพ (Quality Rate) 88.89% และค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness) มีค่า 88.00% เมื่อเทียบกับเครื่องจักรในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปถือว่าเครื่องบรรจุน้ำดื่มอัตโนมัติมีประสิทธิภาพโดยรวมในระดับดี และเมื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนเครื่องที่ขายตามท้องตลาดพบว่าราคาต้นทุนต่ำกว่าท้องตลาด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

REFERENCES

- [1] A. Tarantino, "Introduction to Industry 4.0 and Smart Manufacturing," in *Smart Manufacturing: The Lean Six Sigma Way*, New Jersey, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2022, ch. 1, pp. 1–19.
- [2] L. Zhou and Y. Cui, "The application of PLC control technology in electric automation," *Int. J. Frontiers Eng. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 25–30, 2022.
- [3] X. Niu, "Application analysis of PLC technology in electrical engineering automation control," *Foreign Sci. Technol. Periodical Database (Abstract Edition) Eng. Technol.*, pp. 058–059, Aug. 2021, doi: 10.47939/et.v2i8.19.
- [4] N. Tanchiwawong, *PLC System (Programmable Logic Controller System)*. Bangkok, Thailand: Technology Promotion Association (Thailand-Japan) (in Thai), 1998.
- [5] K. Prewthaisong, "Automatic color sorting machine on conveyor systems controlled by arduino," (in Thai), *APHEIT J. (Sci. Technol.)*, vol. 5, no. 1, pp. 15–21, 2016.
- [6] D. Tailor, V. Kamani, A. Ghetiya, and N. Bhatiya, "Object sorting and stacking automation with PLC," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 3S, pp. 197–201, Jul. 2017.
- [7] N. Pipatpaiboon, C. Chaiyakhote, M. Raksamerwong, T. Chiangkhwang, and A. Donmuang, "Design and construction of lid automatic machine for SMEs," (in Thai), *Sakon Nakhon Rajabhat Univ. J.*, vol. 5, no. 9, pp. 109–118, 2013.
- [8] S. Arsaipanich and T. Srinak, "Automatic fish size measurement by image analysis," (in Thai), in *Proc. 1st Conf. Appl. Res. and Develop.*, Bangkok, Thailand, May 2009, pp. 7–12.
- [9] S. Kongsintu, A. Singjan, S. Dumnui, and N. Suksong, "The design of automatic color sorting machine on conveyor systems by arduino color recognition sensor module," (in Thai), *J. Res. Innov. Inst. Vocational Educ. Bangkok*, vol. 1, no. 2, pp. 56–68, 2018.
- [10] K. Chahine and B. Ghazal, "Automatic sorting of solid wastes using sensor fusion," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 4408–4414, Dec. 2017.
- [11] K. Sasidhar, S. F. Hussain, S. A. Safdar, and M. A. Uddin, "Design and development of a plc based automatic object sorting," *Int. J. Res. Scientific Innov.*, vol. 4, no. 12, pp. 2321–2705, Dec. 2017.
- [12] C. Nopphonkrang and P. Tamapan, "Reducing time and increasing the efficiency of bottled water production: Case study of Yang Chum Noi Agricultural Cooperative Plant Limited, Yang Chum Noi District Sisaket Province," (in Thai), *Sci. Technol. J. Sisaket Rajabhat Univ.*, vol. 2, no. 2, pp. 32–42, 2022.
- [13] C. Ruangraksa and P. Sanposh, "Design of automatic soup filling machine," (in Thai), *Srinakharinwirot Univ. Eng. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 17–30, 2023.
- [14] J. Phasadutharn, P. Dumrongchai, and C. Satirapod, "Performance test of geodetic GNSS receiver with mems and IMU sensors using network-based GNSS RTK method," (in Thai), in *Proc. 27th Nat. Conv. Civil Eng.*, Chiang Rai, Thailand, Aug. 2022, pp. 161–169.
- [15] P. Dawan *et al.*, "Comparison of power output forecasting on the photovoltaic system using adaptive neuro-fuzzy inference systems and particle swarm optimization-artificial neural network model," *Energies*, vol. 13, no. 2, p. 351, 2020, doi: 10.3390/en13020351.
- [16] T. Ouypornkochagorn, "Spy OEE: A novel method for getting OEE by operating time characteristic," (in Thai), *Romphruek J.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–24, 2012.
- [18] L. C. Ng Corrales, M. P. Lambán, M. E. Hernandez Korner, and J. Royo, "Overall equipment effectiveness: systematic literature review and overview of different approaches," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 18, p. 6469, 2020, doi: 10.3390/app10186469.

นโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังครั้งเดียวสำหรับระบบที่มีหลายวัสดุคงคลังทดแทนกัน

ปัญญาต์ ป.ปาน¹ วิสุทธิ์ สุพิทักษ์^{2*}

^{1, 2*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : fengwsst@ku.ac.th

รับต้นฉบับ : 26 ตุลาคม 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 1 กุมภาพันธ์ 2567; ตอบรับบทความ : 18 กุมภาพันธ์ 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 28 มิถุนายน 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาการกำหนดนโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังครั้งเดียวสำหรับระบบที่มีวัสดุคงคลังสามประเภทสามารถใช้งานทดแทนกันได้ วัสดุคงคลังคงเหลือที่มีต้นทุนต่ำกว่าสามารถนำมาใช้ตอบสนองอุปสงค์ที่ขาดแคลนของวัสดุคงคลังที่มีต้นทุนสูงกว่าด้วยอัตราส่วนทดแทนที่กำหนด หรือขายในราคารวมค่าซาก งานวิจัยได้นำเสนอวิธีการค้นหาคำตอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล ซึ่งถูกสร้างขึ้นบนแพลตฟอร์มของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และฟังก์ชันโซลเวอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดปริมาณการเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละประเภทที่เหมาะสม โดยมีสมการวัตถุประสงค์คือการเพิ่มค่าคาดหวังผลกำไรรวมของระบบ เพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ ปัญหาทดสอบจำนวน 120 ปัญหา ถูกสุ่มขึ้นจากการพิจารณาปัจจัยมูลค่าซากสองระดับ และปัจจัยอัตราส่วนทดแทนสองระดับ โดยมีจำนวนการทำซ้ำ 30 ปัญหา ที่แต่ละระดับของปัจจัย คำตอบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอถูกนำไปเปรียบเทียบกับ คำตอบที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ซึ่งพิจารณาปริมาณสิ่งเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละประเภทเป็นอิสระต่อกัน จากผลการทดสอบพบว่า วิธีการที่นำเสนอให้คำตอบที่มีค่าคาดหวังผลกำไรรวมของระบบสูงกว่าวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ทั้ง 120 ปัญหาทดสอบ ทั้งนี้อิทธิพลหลักของปัจจัยมูลค่าซากและปัจจัยอัตราส่วนทดแทน มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลกำไรระหว่างวิธีการที่นำเสนอและวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ โดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลกำไรมีค่าสูงขึ้นที่ระดับต่ำของปัจจัยทั้งสอง

คำสำคัญ : ปัญหาเด็กส่งหนังสือพิมพ์ นโยบายเติมเต็ม การสั่งซื้อครั้งเดียว วัสดุคงคลังทดแทน



Single Order Inventory Replenishment Policy for the System Having Multiple Substitutable Inventory Items

Punyathat Porpan¹ Wisut Supithak^{2*}

^{1,2*}*Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: fengwsst@ku.ac.th

Received: 26 October 2023; Revised: 1 February 2024; Accepted: 18 February 2024

Published online: 28 June 2024

Abstract

The research discusses the single order inventory replenishment policy for a system consisting of three inventory items with substitutability. The leftovers of lower-cost inventory items can be either used to satisfy those demands occurred from the shortage of higher-cost inventory items with a specified ratio or sold at their salvage value. In order to determine the proper order quantity for each inventory item, the method based on the concept of mathematical solving on a Monte Carlo simulation model is proposed. This can be done by modeling the system on the Microsoft Excel platform and, with the objective function of maximizing the expected system profit, applying the solver function to determine a good solution. For the performance evaluation, 120 experimental problems are randomly generated considering two main factors, salvage value (2 levels) and substitution ratio (2 levels), with 30 replications for each treatment combination. The solution obtained from the proposed method is compared with the solution yielded from the traditional benefit analysis method, which is to independently determine the single order quantity of each inventory item without the consideration of substitution opportunity. According to the study result, in comparison to the benefit analysis method, the proposed method provides a larger expected profit for all 120 experimental problems. Moreover, the main influences of salvage value and substitution affect the percentage difference in profit between the proposed method and the benefit analysis approach. Here, the percentage difference in profit increases at the lower levels of both factors.

Keywords: Newsboy problem, Replenishment policy, Single order, Substitutable inventory

1) บทนำ

ในสภาวะปัจจุบันซึ่งมีการแข่งขันทางธุรกิจสูง ราคาสินค้าถูกกำหนดด้วยผู้บริโภคและคู่แข่ง องค์กรจำเป็นต้องลดต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสินค้าเพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน ทั้งนี้ ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการผลิตสินค้าที่สำคัญประการหนึ่งคือต้นทุนการบริหารจัดการวัสดุคงคลังในระบบ การมีวัสดุคงคลังในระบบมากเกินไปสามารถก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการถือครองที่สูง เกิดต้นทุนจมในระบบจำนวนมาก ในทางกลับกัน การมีปริมาณวัสดุคงคลังในระบบน้อยเกินไปอาจก่อให้เกิดการขาดแคลนวัสดุคงคลัง ซึ่งส่งผลให้กิจกรรมการผลิตหยุดชะงัก หรือเกิดการสูญเสียการขายจากการที่ระบบไม่สามารถตอบสนองอุปสงค์ของลูกค้า การบริหารวัสดุคงคลังที่ดีจะทำให้ระบบมีปริมาณวัสดุคงคลังที่เหมาะสม กิจกรรมต่าง ๆ สามารถถูกดำเนินการได้อย่างราบรื่น โดยมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ต่ำ

โดยทั่วไปตัวแบบเติมเต็มวัสดุคงคลังที่เหมาะสมกับระบบ มีรูปแบบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปสงค์ในระบบนั้น [1] โดยการจำแนกลักษณะของอุปสงค์สามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การจำแนกอุปสงค์ตามความเป็นอิสระต่อกัน เป็นอุปสงค์ที่มีความเป็นอิสระต่อกัน (independent demand) และอุปสงค์ที่ไม่มีความเป็นอิสระต่อกัน (dependent demand) การจำแนกอุปสงค์ตามความต่อเนื่องของการเกิดมีขึ้น เป็นอุปสงค์ที่มีความต่อเนื่อง (continuous demand) และอุปสงค์ที่ไม่มีความต่อเนื่อง (discrete demand) การจำแนกอุปสงค์ตามการเกิดซ้ำของคำสั่งซื้อ เป็นอุปสงค์ที่ระบบมีการสั่งซื้อซ้ำ (repeat order) และอุปสงค์ที่ระบบไม่มีการสั่งซื้อซ้ำ (single order) เป็นต้น

ตัวแบบพื้นฐานจัดการวัสดุคงคลังกรณีระบบมีการสั่งซื้อซ้ำและอุปสงค์ต่อเนื่อง ถูกศึกษาโดย Harris [2] ซึ่งได้นำเสนอตัวแบบการสั่งซื้อแบบประหยัด (Economic Order Quantity: EOQ) โดยเป็นการคำนวณปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังที่เหมาะสมจากการถ่วงน้ำหนักระหว่างค่าใช้จ่ายในการเติมเต็มและค่าใช้จ่ายในการถือครองวัสดุคงคลัง การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวแบบการสั่งซื้อแบบประหยัด สามารถพิจารณาได้จาก [3] และ [4] การประยุกต์ใช้ตัวแบบการสั่งซื้อแบบประหยัดสำหรับระบบวัสดุแตกต่าง เช่น ระบบที่มีส่วนลดราคาตามปริมาณสั่งซื้อ [5]–[7] ระบบที่วัสดุคงคลังมีการเสื่อมสภาพได้ [8]–[10] เป็นต้น สำหรับกรณีที่ระบบมีอุปสงค์ไม่ต่อเนื่อง [11] ได้นำเสนอตัวแบบโปรแกรมพลวัต (dynamic programming)

ซึ่งสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่มีต้นทุนวัสดุคงคลังต่อหน่วย ต้นทุนการสั่งซื้อ และต้นทุนการจัดเก็บ แตกต่างกันในแต่ละคาบเวลา กระบวนการฮิวริสติกสำหรับการค้นหาคำตอบที่ดีของปัญหาดังกล่าวภายในระยะเวลาที่เหมาะสมสามารถศึกษาได้จาก [12] การกำหนดนโยบายเติมเต็มวัสดุคงคลังสำหรับระบบที่อุปสงค์ที่ไม่มีการสั่งซื้อซ้ำ เป็นรูปแบบที่ระบบมีอุปสงค์เกิดขึ้นเพียงคาบเวลาเดียว หากปริมาณการสั่งซื้อเติมเต็มวัสดุคงคลังมีค่าน้อยกว่าอุปสงค์ จะทำให้ระบบสูญเสียโอกาสในการขาย ในทางกลับกันหากปริมาณวัสดุคงคลังที่สั่งเติมเต็มมีค่ามากกว่าอุปสงค์ จะส่งผลให้เกิดวัสดุคงคลังคงเหลือในระบบ ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง หรือการขายวัสดุคงคลังที่เหลือในราคาที่ลดลง รูปแบบของระบบดังกล่าวสามารถถูกพิจารณาได้ว่าเป็นปัญหาเด็กส่งหนังสือพิมพ์ (newsboy problem) หรือปัญหาการขายต้นคริสต์มาส (christmas tree problem) ตัวแบบการคำนวณปริมาณวัสดุคงคลังในระบบดังกล่าวศึกษาได้จาก [13] และ [14] การทบทวนวรรณกรรมสำหรับการเติมเต็มวัสดุคงคลังครั้งเดียวพิจารณาได้จาก [15] และ [16] ในระบบการเติมเต็มครั้งเดียวที่มีวัสดุคงคลังหลายประเภททดแทนกันได้สามารถจำแนกได้เป็นสองรูปแบบคือ การทดแทนทางเดียว (one-way substitution) และการทดแทนสองทาง (two-way substitution) [17], [18] ได้ทำการศึกษาระบบที่มีการสั่งเติมเต็มครั้งเดียวสำหรับวัสดุคงคลังสองประเภทโดยการขาดแคลนวัสดุคงคลังประเภทหนึ่ง สามารถถูกทดแทนได้ด้วยวัสดุคงคลังอีกประเภทหนึ่งในรูปแบบการทดแทนสองทาง โดยได้นำเสนอการพิจารณาขอบเขตบนและขอบเขตล่างของปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภทและใช้การจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลพิจารณาปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภทที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาปริมาณการสั่งเติมเต็มครั้งเดียวโดยมีวัสดุคงคลังหรือชิ้นส่วนสามประเภทที่ใช้แทนทดแทนกันได้ในอัตราส่วนที่กำหนด ตัวอย่างรูปแบบงานวิจัยสามารถพิจารณาได้จากผู้ผลิต และจำหน่ายคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรุ่นของคอมพิวเตอร์ที่มีความจุของหน่วยความจำสำรองแตกต่างกันสามรุ่นเป็น 4 GB 8 GB และ 16 GB ซึ่งคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำสำรองขนาด 4 GB สามารถใช้การ์ดหน่วยความจำสำรองขนาด 4 GB จำนวน 1 ชิ้น คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำสำรองขนาด 8 GB สามารถใช้การ์ดหน่วยความจำสำรองขนาด 8 GB จำนวน 1 ชิ้น หรือการ์ดหน่วยความจำสำรองขนาด 4 GB จำนวน 2 ชิ้น สำหรับ

คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำสำรองขนาด 16 GB สามารถใช้การทดหน่วยความจำสำรองขนาด 16 GB จำนวน 1 ชิ้น หรือใช้การทดหน่วยความจำสำรองขนาด 8 GB จำนวน 2 ชิ้น หรือใช้การทดหน่วยความจำสำรองขนาด 4 GB จำนวน 4 ชิ้น ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเป็นลักษณะการใช้งานทดแทนกันของวัสดุคงคลังต่างประเภท โดยมีต้นทุนที่แตกต่างกัน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการหาปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภทที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มผลกำไรรวมของระบบที่มีการเติมเต็มครั้งเดียว

2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1) คำอธิบายสัญลักษณ์ย่อ

μ_i	ค่าเฉลี่ยอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภท i (ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$
μ'_k	ค่าเฉลี่ยอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภท k รวมกับค่าเฉลี่ยอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทราคาสูงกว่า k (ชิ้น) โดยที่ $k = 2, 3$
σ_i	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภท i โดยที่ $i = 1, 2, 3$
σ'_k	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภท k รวมกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานวัสดุคงคลังประเภทราคาสูงกว่า k โดยที่ $k = 2, 3$
Q_i	ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภท i (ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$
C_i	ต้นทุนวัสดุคงคลังประเภท i ต่อชิ้น (บาท/ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$
P_i	ราคาขายวัสดุคงคลังประเภท i ต่อชิ้น (บาท/ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$
D_i	ปริมาณอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภท i (ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$
$r_{i,j}$	จำนวนวัสดุคงคลังประเภทที่ i (ชิ้น) ซึ่งถูกใช้ตอบสนองวัสดุคงคลังประเภทที่ j จำนวน 1 ชิ้น โดย $i \geq j$
$X_{i,j}$	จำนวนวัสดุคงคลังประเภท i (ชิ้น) ซึ่งถูกใช้เพื่อตอบสนองอุปสงค์ของวัสดุคงคลังประเภทที่ j (ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$ โดย $i \geq j$ ทั้งนี้กรณีที่ $i = j$ ค่าของ $X_{i,j}$ แสดงจำนวนชิ้นของวัสดุคงคลังประเภทที่ i (หรือ j) ที่ถูกใช้เพื่อตอบสนองวัสดุคงคลังประเภทที่ i (หรือ j) สำหรับกรณีที่ $i > j$ ค่าของ $X_{i,j}$ แสดงจำนวนชิ้นของวัสดุคงคลังประเภทที่ i ที่ถูกใช้เพื่อตอบสนองวัสดุคงคลังประเภทที่ j
V_i	มูลค่าซากวัสดุคงคลังประเภท i (บาท/ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$

S_i^{before}	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ i ขาดแคลนก่อนการทดแทน โดยที่ $i = 1, 2, 3$
S_i^{after}	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ i ขาดแคลนหลังการทดแทน โดยที่ $i = 1, 2, 3$
L_i^{before}	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ i เหลือก่อนการทดแทน โดยที่ $i = 1, 2, 3$
L_i^{after}	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ i เหลือหลังการทดแทน โดยที่ $i = 1, 2, 3$
E_l	รูปแบบของเหตุการณ์ที่ l
PF	ผลกำไรรวมของระบบ (บาท)
RE	รายรับรวมของระบบ (บาท)
CO	รายจ่ายรวมของระบบ (บาท)
Q_i^L	ขอบเขตล่างปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภท i (ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$
Q_i^U	ขอบเขตบนปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภท i (ชิ้น) โดยที่ $i = 1, 2, 3$
$E(x_i)$	ค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่ม
$V(x_i)$	ความแปรปรวนของตัวแปรสุ่ม
PF_m	ผลกำไรรวมของชุดข้อมูลที่ข้อมูล m โดยที่ $m = 1, 2, 3, \dots, n$
n	จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้การสุ่ม
α_i	ความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังแต่ละประเภท i ที่เหมาะสม โดยที่ $i = 1, 2, 3$
Z_{α_i}	ค่ามาตรฐานที่ความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังแต่ละประเภท i ที่เหมาะสม โดยที่ $i = 1, 2, 3$
Q_i^{BA}	ปริมาณสั่งซื้อที่ได้จากวิธีวิเคราะห์ผลประโยชน์
PF_{SS}	ค่าคาดหวังของผลกำไรจากวิธีค้นหาคำตอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบจำลองสถานการณ์
PF_{BA}	ค่าคาดหวังของผลกำไรจากวิธีการวิเคราะห์ผลประโยชน์

2.2) คุณลักษณะของปัญหา

งานวิจัยพิจารณาการสั่งเติมเต็มเพียงครั้งเดียวสำหรับระบบที่มีวัสดุคงคลังสามประเภท โดยอุปสงค์วัสดุคงคลังแต่ละประเภท (D_i) เป็นตัวแปรสุ่มที่ทราบค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจง การขาดแคลนวัสดุคงคลังประเภทหนึ่งสามารถใช้วัสดุคงคลังประเภทอื่นมาทดแทนได้ในอัตราส่วนที่กำหนด วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเป็นการพิจารณากำหนดปริมาณสั่งซื้อเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละประเภทที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มผลกำไรของระบบ (profit maximization) โดยมีสมมติฐานของงานวิจัย ดังนี้

- ต้นทุนต่อชิ้นของวัสดุคงคลัง (C_i) ราคาขายต่อชิ้น (P_i) และมูลค่าซากต่อชิ้น (V_i) เป็นค่าที่ทราบล่วงหน้า
- ต้นทุนของวัสดุคงคลังถูกกำหนดตามต้นทุน (C_i) และราคาขาย (P_i) โดยวัสดุคงคลังประเภทที่ $i = 1, 2$ และ 3 มีค่าต้นทุนและราคาขาย ดังนี้

$$C_3 < C_2 < C_1 \quad (1)$$

$$P_3 < P_2 < P_1 \quad (2)$$

- ในกรณีที่มีการขาดแคลนวัสดุคงคลัง ระบบสามารถใช้วัสดุคงคลังที่มีราคาต่ำกว่าทดแทนอุปสงค์ที่ขาดแคลนของวัสดุคงคลังที่มีราคาสูงกว่าในอัตราส่วนที่กำหนด ทั้งนี้ระบบไม่สามารถใช้วัสดุคงคลังที่มีราคาสูงกว่าทดแทนอุปสงค์วัสดุคงคลังที่มีราคาต่ำกว่า เนื่องจากไม่สามารถแบ่งย่อยวัสดุคงคลังที่มีราคาสูงกว่าได้
- ไม่พิจารณาค่าใช้จ่ายถือครองวัสดุคงคลัง เนื่องจากงานวิจัยพิจารณาอุปสงค์วัสดุคงคลังเพียงคาบเวลาเดียว โดยวัสดุคงคลังคงเหลือสามารถถูกนำไปใช้ทดแทนวัสดุคงคลังประเภทอื่นหรือถูกจำหน่ายด้วยราคามูลค่าซาก
- ต้นทุนของวัสดุคงคลังที่นำมาทดแทนมีค่าสูงกว่าต้นทุนวัสดุคงคลังที่ถูกทดแทน แสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$r_{i,j}C_i > C_j \quad (3)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเป็นการกำหนดปริมาณการสั่งซื้อเพื่อเพิ่มผลกำไรรวมของระบบ ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 1

$$\text{Maximize } PF = RE - CO \quad (4)$$

รายรับรวมและรายจ่ายรวมของระบบสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5 และสมการที่ 6 ตามลำดับ

$$RE = P_1X_{1,1} + P_2X_{2,2} + P_3X_{3,3} + P_1(X_{3,1} + X_{2,1}) + P_2X_{3,2} + V_1(Q_1 - X_{1,1}) + V_2(Q_2 - X_{2,2} - r_{2,1}X_{2,1}) + V_3(Q_3 - X_{3,3} - r_{3,2}X_{3,2} - r_{3,1}X_{3,1}) \quad (5)$$

พิจารณาสมการที่ 5 ค่าของ $P_1X_{1,1}$, $P_2X_{2,2}$ และ $P_3X_{3,3}$ เป็นรายรับจากการขายวัสดุคงคลังโดยตรง จากวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ ค่าของ $P_1(X_{3,1} + X_{2,1})$ เป็นรายรับจากการขายวัสดุคงคลังจากการทดแทนวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งด้วยวัสดุคงคลังประเภทที่สอง และสาม ค่าของ $P_2X_{3,2}$ เป็นรายรับจากการขายวัสดุคงคลังจากการทดแทนวัสดุคงคลังประเภทที่สองด้วยวัสดุคงคลังประเภทที่สาม ค่าของ $V_1(Q_1 - X_{1,1})$, $V_2(Q_2 - X_{2,2} - r_{2,1}X_{2,1})$ และ $V_3(Q_3 -$

$X_{3,3} - r_{3,2}X_{3,2} - r_{3,1}X_{3,1})$ เป็นรายรับจากการขายมูลค่าซากของวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ

$$CO = C_1Q_1 + C_2Q_2 + C_3Q_3 \quad (6)$$

พิจารณาสมการที่ 6 ค่าของ C_1Q_1 , C_2Q_2 และ C_3Q_3 เป็นต้นทุนวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ

จากสมการที่ 4, 5 และ 6 สามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังสมการที่ 7

$$\text{Maximize } PF = [P_1X_{1,1} + P_2X_{2,2} + P_3X_{3,3} + P_1(X_{3,1} + X_{2,1}) + P_2X_{3,2} + V_1(Q_1 - X_{1,1}) + V_2(Q_2 - X_{2,2} - r_{2,1}X_{2,1}) + V_3(Q_3 - X_{3,3} - r_{3,2}X_{3,2} - r_{3,1}X_{3,1})] - [C_1Q_1 + C_2Q_2 + C_3Q_3] \quad (7)$$

2.3) ตัวอย่างแสดงคุณลักษณะของปัญหา

กำหนดให้ระบบประกอบด้วยวัสดุคงคลังสามประเภทที่สามารถทดแทนกันได้ โดยมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคงคลังแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคงคลังในระบบ

ตัวแปร	ประเภทของวัสดุคงคลัง		
	1	2	3
ค่าเฉลี่ยของอุปสงค์ (ชิ้น)	70	80	120
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	10	18	25
ราคา (บาท/ชิ้น)	50	40	20
ต้นทุน (บาท/ชิ้น)	18	15	10
มูลค่าซาก (บาท/ชิ้น)	10.5	9	6
อัตราส่วนทดแทน	$r_{2,1}$	$r_{3,1}$	$r_{3,2}$
	2	4	2

กำหนดให้คำตอบที่สนใจ (ซึ่งอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด) มีค่าปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสาม มีค่าเป็น $Q_1 = 68$ ชิ้น $Q_2 = 75$ ชิ้น และ $Q_3 = 150$ ชิ้น ตามลำดับ หากค่าอุปสงค์ที่แท้จริงของวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสาม มีค่าเป็น $D_1 = 66$ ชิ้น $D_2 = 78$ ชิ้น และ $D_3 = 132$ ชิ้น ตามลำดับ จะได้ว่าอุปสงค์วัสดุคงคลังที่ระบบสามารถตอบสนองได้โดยไม่มีการทดแทนมีค่าเป็น $X_{1,1} = 66$ ชิ้น $X_{2,2} = 75$ ชิ้น และ $X_{3,3} = 132$ ชิ้น ตามลำดับ และพิจารณาได้ว่า ก่อนการทดแทนมีอุปสงค์วัสดุคงคลังที่ขาดแคลนคือ วัสดุคงคลังประเภทที่สองจำนวน $S_2^{before} = 3$ ชิ้น และมีวัสดุคงคลังเหลือก่อนทดแทนคือ วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งจำนวน $L_1^{before} = 2$ ชิ้น และวัสดุคงคลังประเภทที่สามจำนวน

$L_3^{before} = 18$ ชิ้น จากเหตุการณ์ดังกล่าว สามารถใช้วัสดุคงคลังประเภทที่สามทดแทนวัสดุคงคลังประเภทที่สองในอัตราส่วน $r_{3,2} = 2$ ดังนั้นอุปสงค์ของวัสดุคงคลังประเภทที่สองซึ่งสามารถตอบสนองได้จากการทดแทนมีค่าเท่ากับ $X_{3,2} = 3$ ชิ้น หลังการทดแทนระบบมีวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งเหลือจำนวน $L_1^{after} = 2$ ชิ้น และมีวัสดุคงคลังประเภทที่สามเหลือจำนวน $L_3^{after} = 12$ ชิ้น จากรูปแบบดังกล่าวสามารถคำนวณผลกำไรของคำตอบได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : การคำนวณรายรับ รายจ่าย และผลกำไรของคำตอบที่สนใจ

รายการ	มูลค่า (บาท)
รายรับ	
1. การขายวัสดุคงคลังโดยตรง	$(66 \times 50) + (75 \times 40) + (132 \times 20)$ 8940 บาท
2. การขายวัสดุคงคลังทดแทนในราคาวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง	0 บาท
3. การขายวัสดุคงคลังทดแทนในราคาวัสดุคงคลังประเภทที่สอง	(3×40) 120 บาท
4. การขายวัสดุคงคลังในราคามูลค่าซาก	$(2 \times 10.5) + (12 \times 6)$ 93 บาท
รวม	9153 บาท
รายจ่าย	
1. ต้นทุนวัสดุคงคลัง	$(68 \times 18) + (75 \times 15) + (150 \times 10)$ 3849 บาท
รวม	3849 บาท
ผลกำไร	5304 บาท

3) วิธีดำเนินการวิจัย

จากคุณลักษณะของปัญหาในงานวิจัย การเกิดขึ้นของเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดแทนวัสดุคงคลังสามารถจำแนกได้เป็น 8 กรณีดังนี้

เหตุการณ์ที่ 1 วัสดุคงคลังทั้งสามประเภทเกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_1 = \{0, 0, 0\}$ ในกรณีนี้จะไม่มีการเกิดทดแทนวัสดุคงคลัง

เหตุการณ์ที่ 2 วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง และสองเกิดการขาดแคลน โดยวัสดุคงคลังประเภทที่สามไม่เกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_2 =$

$\{0, 0, 1\}$ ในกรณีนี้ หากวัสดุคงคลังประเภทที่สามเหลือ ปริมาณคงเหลือดังกล่าวอาจมีการนำใช้ทดแทนวัสดุคงคลังที่ขาดแคลน (ประเภทที่หนึ่งและ/หรือประเภทที่สอง) หรือขายเป็นมูลค่าซาก ตามการวิเคราะห์ผลประโยชน์รายรับที่เกิดขึ้น

เหตุการณ์ที่ 3 วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง และสามเกิดการขาดแคลน โดยวัสดุคงคลังประเภทที่สองไม่เกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_3 = \{0, 1, 0\}$ ในกรณีนี้ หากวัสดุคงคลังประเภทที่สองเหลือ ปริมาณคงเหลือดังกล่าวอาจมีการนำใช้ทดแทนวัสดุคงคลังที่ขาดแคลน (ประเภทที่หนึ่ง) หรือขายเป็นมูลค่าซาก ตามการวิเคราะห์ผลประโยชน์รายรับที่เกิดขึ้น

เหตุการณ์ที่ 4 วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งเกิดการขาดแคลน โดยวัสดุคงคลังประเภทที่สอง และสามไม่เกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_4 = \{0, 1, 1\}$ ในกรณีนี้ หากวัสดุคงคลังประเภทที่สอง และสามเหลือ ปริมาณคงเหลือดังกล่าวอาจมีการนำใช้ทดแทนวัสดุคงคลังที่ขาดแคลน (ประเภทที่หนึ่ง) หรือขายเป็นมูลค่าซาก ตามการวิเคราะห์ผลประโยชน์รายรับที่เกิดขึ้น

เหตุการณ์ที่ 5 วัสดุคงคลังประเภทที่สอง และสามเกิดการขาดแคลน โดยวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งไม่เกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_5 = \{1, 0, 0\}$ ในกรณีนี้ หากวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งเหลือ ปริมาณคงเหลือดังกล่าวจะขายเป็นมูลค่าซาก

เหตุการณ์ที่ 6 วัสดุคงคลังประเภทที่สองเกิดการขาดแคลน โดยวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง และสามไม่เกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_6 = \{1, 0, 1\}$ ในกรณีนี้ หากวัสดุคงคลังประเภทที่สามเหลือ ปริมาณคงเหลือดังกล่าวอาจมีการนำใช้ทดแทนวัสดุคงคลังที่ขาดแคลน (ประเภทที่สอง) หรือขายเป็นมูลค่าซากพร้อมวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง ตามการวิเคราะห์ผลประโยชน์รายรับที่เกิดขึ้น

เหตุการณ์ที่ 7 วัสดุคงคลังประเภทที่สามเกิดการขาดแคลน โดยวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง และสองไม่เกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_7 = \{1, 1, 0\}$ ในกรณีนี้ หากวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง และสองเหลือ ปริมาณคงเหลือดังกล่าวจะขายเป็นมูลค่าซาก

เหตุการณ์ที่ 8 วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสามคงเหลือไม่เกิดการขาดแคลน ซึ่งในงานวิจัยแทนเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยสัญลักษณ์ $E_8 = \{1, 1, 1\}$ ในกรณีนี้ หากวัสดุคง

คลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสามเหลือ ปริมาณคงเหลือดังกล่าว
จะขายเป็นมูลค่าซาก

เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม ในงานวิจัยใช้วิธีการค้นหาคำตอบ
 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล
 โดยมีตัวแปรตัดสินใจคือปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภท
 ที่ส่งผลให้การบริหารวัสดุคงคลังมีผลกำไรเพิ่มขึ้น การหาคำตอบ
 จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล
 บนโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) และส่วน
 การหาคำตอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนแพลตฟอร์มการจำลอง
 สถานการณ์ด้วยฟังก์ชันโซลเวอร์

3.1) การจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล

ตัวแบบจำลองสถานการณ์ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม
ไมโครซอฟท์เอ็กเซล มีตัวแปรตัดสินใจคือปริมาณสั่งซื้อวัสดุคง
คลังแต่ละประเภท (Q_i) มีข้อมูลนำเข้าประกอบด้วย

ค่าพารามิเตอร์อุปสงค์วัสดุคงคลังแต่ละประเภท ต้นทุนต่อชิ้น (C_i) ราคาต่อชิ้น (P_i) มูลค่าซากต่อชิ้น (V_i) และอัตราส่วนทดแทน ($r_{i,j}$) โดยมีตัวแปรตอบสนองคือค่าคาดหวังของผลกำไร ซึ่งในงานวิจัยจะทำการสุ่มค่าอุปสงค์ของวัสดุคงคลังแต่ละประเภทจำนวน 1000 ชุดข้อมูล ($n = 1000$)

รูปที่ 1 เป็นรูปตัวแบบจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล ซึ่ง
จำแนกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนที่ 1 ข้อมูลนำเข้า ส่วนที่ 2
ตัวแปรตัดสินใจและตัวแปรตอบสนอง และส่วนที่ 3 ผลลัพธ์ที่
เกิดขึ้นจากการจำลองสถานการณ์

ส่วนที่ 1 ข้อมูลนำเข้าประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยอุปสงค์วัสดุคงคลัง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุปสงค์วัสดุคงคลัง ต้นทุนต่อชิ้นของวัสดุคงคลัง ราคาต่อชิ้น มูลค่าซากต่อชิ้น และอัตราส่วนทดแทน โดยมีรายละเอียดและคำอธิบายแสดงดังตารางที่ 3

[illegible]

รูปที่ 1 : ตัวแบบจำลองสถานการณ์มอดิตคาร์โลบนโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล

ตารางที่ 3 : รายละเอียดและคำอธิบายส่วนที่ 1 ข้อมูลนำเข้า

เซลล์	ค่าแสดง	ฟังก์ชัน	คำอธิบาย
D5:F5	ค่าเฉลี่ยอุปสงค์	N/A	ค่าเฉลี่ยทางสถิติอุปสงค์วัสดุคงคลังแต่ละประเภท
D6:F6	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	N/A	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุปสงค์วัสดุคงคลังแต่ละประเภท
D7:F7	ราคาขาย	N/A	ราคาขายต่อชิ้นของวัสดุคงคลังแต่ละประเภท
D8:F8	ต้นทุน	N/A	ต้นทุนต่อชิ้นของวัสดุคงคลังแต่ละประเภท
D9:F9	มูลค่าซาก	N/A	มูลค่าซากต่อชิ้นของวัสดุคงคลังแต่ละประเภท
D10	$r_{2,1}$	N/A	จำนวนวัสดุคงคลังประเภทที่ 2 ซึ่งถูกใช้ตอบสนองวัสดุคงคลังประเภทที่ 1 จำนวน 1 ชิ้น
D11	$r_{3,1}$	N/A	จำนวนวัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ซึ่งถูกใช้ตอบสนองวัสดุคงคลังประเภทที่ 1 จำนวน 1 ชิ้น
D12	$r_{3,2}$	N/A	จำนวนวัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ซึ่งถูกใช้ตอบสนองวัสดุคงคลังประเภทที่ 2 จำนวน 1 ชิ้น

ส่วนที่ 2 ตัวแปรตัดสินใจและตัวแปรตอบสนองประกอบด้วย ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภท ตัวแปรตอบสนองคือค่า คาดหวังผลกำไรที่ได้จากการบริหารวัสดุคงคลัง ซึ่งได้จากรายรับ รวม (ผลรวมระหว่างรายรับจากการขายวัสดุคงคลัง และรายรับ จากการขายวัสดุคงคลังที่เหลือในราคามูลค่าซาก) ลบรายจ่าย ค่าขอบเขตล่าง (Q_i^L) และค่าขอบเขตบน (Q_i^U) ของวัสดุคงคลัง แต่ละประเภท รายละเอียดและค่าฟังก์ชันการคำนวณของแต่ละ เซลล์แสดงดังตารางที่ 4

ส่วนที่ 3 ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการจำลองสถานการณ์ โดย สดมภ์ B แสดงชุดข้อมูล สดมภ์ C สดมภ์ D และสดมภ์ E แสดง ค่าอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ ซึ่ง ถูกสุ่มจากการแจกแจงแบบปกติที่ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของอุปสงค์วัสดุคงคลังแต่ละประเภทที่กำหนดไว้ ปริมาณวัสดุคงคลังแต่ละประเภทที่ขายราคาปกติ (สดมภ์ F ถึง สดมภ์ H) จะมีค่าเท่ากับอุปสงค์และไม่เกินปริมาณสั่งซื้อ หาก อุปสงค์มีค่าเกินปริมาณสั่งซื้อปริมาณวัสดุคงคลังที่ขายราคาปกติ จะเท่ากับปริมาณสั่งซื้อและเกิดการขาดแคลนวัสดุคงคลัง เมื่อ วัสดุคงคลังแต่ละประเภทตอบสนองอุปสงค์เสร็จแล้ว ในกรณีนี้

วัสดุคงคลังประเภทราคาสูงขาดแคลนจะใช้วัสดุคงคลังประเภท ราคาต่ำกว่าทดแทนได้ในอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งจะทดแทนเมื่อ เป็นไปตามเงื่อนไขการวิเคราะห์ผลประโยชน์ ในกรณีที่มีวัสดุคง คลังประเภทราคาต่ำกว่ามากกว่าหนึ่งประเภทที่สามารถทดแทน วัสดุคงคลังประเภทราคาสูงที่ขาดแคลนหรือวัสดุคงคลังประเภท ราคาต่ำกว่าสามารถทดแทนวัสดุคงคลังประเภทราคาสูงได้ มากกว่าหนึ่งประเภท ระบบจะใช้วัสดุคงคลังประเภทที่ให้ผล กำไรสูงสุดเป็นลำดับแรก แสดงดังสดมภ์ M ถึง สดมภ์ O ตาม ด้วยประเภทที่ให้ผลกำไรรองลงมา แสดงดังสดมภ์ P ถึง สดมภ์ R ตามลำดับ ปริมาณวัสดุคงคลังแต่ละประเภทที่เหลือจากการ ตอบสนองอุปสงค์ และ(ถ้ามี)การทดแทนแสดงดังสดมภ์ S สดมภ์ T และสดมภ์ U โดยปริมาณคงเหลือดังกล่าวจะถูกจำหน่ายใน ราคามูลค่าซาก ผลกำไร (สดมภ์ Y) คำนวณจากผลต่างระหว่าง รายรับรวม และต้นทุนวัสดุคงคลัง (สดมภ์ X) ซึ่งรายรับรวม ประกอบด้วย รายรับขายวัสดุคงคลัง และรายรับขายซาก รายละเอียดและค่าฟังก์ชันการคำนวณค่าของแต่ละเซลล์แสดง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 : รายละเอียดและคำอธิบายส่วนที่ 2 ตัวแปรตัดสินใจและตัวแปรตอบสนอง

เซลล์	ค่าแสดง	ฟังก์ชัน	รายละเอียด
K5	ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังชนิดที่ 1	N/A	ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 1 ที่ให้ค่าคาดหวังของผลกำไรสูงสุด
K6	ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังชนิดที่ 2	N/A	ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 2 ที่ให้ค่าคาดหวังของผลกำไรสูงสุด
K7	ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังชนิดที่ 3	N/A	ปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ที่ให้ค่าคาดหวังของผลกำไรสูงสุด
Q5	ค่าคาดหวังของผลกำไร	N/A	ค่าคาดหวังผลกำไรที่ได้จากการตอบสนองชุดอุปสงค์จำนวน 1000 ชุด
R5	ขอบเขตล่างวัสดุคงคลังชนิดที่ 1	N/A	ค่าขอบเขตล่างปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 1
R6	ขอบเขตล่างวัสดุคงคลังชนิดที่ 2	N/A	ค่าขอบเขตล่างปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 2
R7	ขอบเขตล่างวัสดุคงคลังชนิดที่ 3	N/A	ค่าขอบเขตล่างปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 3
S5	ขอบเขตบนวัสดุคงคลังชนิดที่ 1	=D5+3*D6	ค่าขอบเขตบนปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 1
S6	ขอบเขตบนวัสดุคงคลังชนิดที่ 2	=ROUND((E5+D5)+3*(SQRT (E6*E6+D10*D10*D6*D6)), 0)	ค่าขอบเขตบนปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 2
S7	ขอบเขตบนวัสดุคงคลังชนิดที่ 3	=ROUND((F5+E5+D5)+3*(SQRT(F6*F6+D12*D12*E6*E6+D11*D11*D6*D6)),0)	ค่าขอบเขตบนปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่ 3

ตารางที่ 5 : ค่าของเซลล์ในส่วนการบริหารปริมาณวัสดุคงคลัง และการคำนวณผลกำไรของระบบ

เซลล์	ค่าแสดง	ฟังก์ชัน	คำอธิบาย
B18	ชุดข้อมูล	N/A	ชุดข้อมูลอุปสงค์วัสดุคงคลังแต่ละประเภท
C18	D_1	=ROUND(NORMINV(RAND(),\$D\$5,\$D\$6),0)	ความต้องการวัสดุคงคลังประเภทที่ 1
D18	D_2	=ROUND(NORMINV(RAND(),\$E\$5,\$E\$6),0)	ความต้องการวัสดุคงคลังประเภทที่ 2
E18	D_3	=ROUND(NORMINV(RAND(),\$F\$5,\$F\$6),0)	ความต้องการวัสดุคงคลังประเภทที่ 3
F18	$X_{1,1}$	=MIN(C18,\$K\$4)	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 1 ที่ตอบสนองอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่ 1
G18	$X_{2,2}$	=MIN(D18,\$K\$5)	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 2 ที่ตอบสนองอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่ 2
H18	$X_{3,3}$	=MIN(E18,\$K\$6)	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ที่ตอบสนองอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่ 3
I18	$S_1^{before} / L_1^{before}$	=\$K\$4-C18	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 1 ที่ขาดหรือเหลือก่อนทดแทน
J18	$S_2^{before} / L_2^{before}$	=\$K\$5-D18	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 2 ที่ขาดหรือเหลือก่อนทดแทน
K18	$S_3^{before} / L_3^{before}$	=\$K\$6-E18	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ที่ขาดหรือเหลือก่อนทดแทน
L18	เหตุการณ์	=IF(AND(\$K\$6<\$E18,\$K\$5<\$D18,\$K\$4<\$C18),1,IF(AND(\$K\$5<\$D18,\$K\$4<\$C18),2,IF(AND(\$K\$6<\$E18,\$K\$4<\$C18),3,IF(\$K\$4<\$C18,4,IF(AND(\$K\$6<\$E18,\$K\$5<\$D18),5,IF(\$K\$5<\$D18,6,IF(\$K\$6<\$E18,7,8))))))	รูปแบบของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นก่อนมีการทดแทน (จาก 8 เหตุการณ์ที่ถูกกล่าวไว้ในตอนต้นของส่วนนี้)
M18	ปริมาณทดแทนในลำดับที่หนึ่งของ $X_{2,1}$	=IF(AND(L18=3,\$D\$7-\$D\$10*\$E\$9>0),MAX(MIN(C18-\$K\$4,ROUNDDOWN((\$K\$5-D18)/\$D\$10,0)),0),IF(AND(L18=4,\$D\$7-\$D\$10*\$E\$9>\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9,\$D\$7-\$D\$10*\$E\$9>0),MAX(MIN(C18-\$K\$4,ROUNDDOWN((\$K\$5-D18)/\$D\$10,0)),0),0))	ปริมาณวัสดุคงคลังทดแทนประเภทที่ 1 ที่ได้จากการใช้วัสดุคงคลังประเภทที่ 2 ทดแทน ซึ่งถูกใช้ทดแทนเป็นลำดับที่หนึ่ง
N18	ปริมาณทดแทนในลำดับที่หนึ่งของ $X_{3,1}$	=IF(AND(L18=2,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>\$E\$7-\$D\$12*\$F\$9,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>0),MAX(MIN(C18-\$K\$4,ROUNDDOWN((\$K\$6-E18)/\$D\$11,0)),0),IF(AND(L18=4,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>\$D\$7-\$D\$10*\$E\$9,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>0),MAX(MIN(C18-\$K\$4,ROUNDDOWN((\$K\$6-E18)/\$D\$11,0)),0),0))	ปริมาณวัสดุคงคลังทดแทนประเภทที่ 1 ที่ได้จากการใช้วัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ทดแทน ซึ่งถูกใช้ทดแทนเป็นลำดับที่หนึ่ง
O18	ปริมาณทดแทนในลำดับที่หนึ่งของ $X_{3,2}$	=IF(AND(L18=6,\$E\$7-\$D\$12*\$F\$9>0),MAX(MIN(D18-\$K\$5,ROUNDDOWN((\$K\$6-E18)/\$D\$12,0)),0),IF(AND(L18=2,\$E\$7-\$D\$12*\$F\$9>\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9,\$E\$7-\$D\$12*\$F\$9>0),MAX(MIN(D18-\$K\$5,ROUNDDOWN((\$K\$6-E18)/\$D\$12,0)),0),0))	ปริมาณวัสดุคงคลังทดแทนประเภทที่ 2 ที่ได้จากการใช้วัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ทดแทน ซึ่งถูกใช้ทดแทนเป็นลำดับที่หนึ่ง

ตารางที่ 5 : ค่าของเซลล์ในส่วนการบริหารปริมาณวัสดุคงคลัง และการคำนวณผลกำไรของระบบ (ต่อ)

เซลล์	ค่าแสดง	ฟังก์ชัน	คำอธิบาย
P18	ปริมาณทดแทนในลำดับที่สองของ $X_{2,1}$	=IF(AND(L18=4,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>\$D\$7-\$D\$10*\$E\$9,\$D\$7-\$D\$10*\$E\$9>0),MAX(MIN(C18-\$K\$4-N18,ROUNDDOWN((\$K\$5-D18)/\$D\$10,0)),0),0)	ปริมาณวัสดุคงคลังทดแทนประเภทที่ 1 ที่ได้จากการใช้วัสดุคงคลังประเภทที่ 2 ทดแทน ซึ่งถูกใช้ทดแทนเป็นลำดับที่สอง
Q18	ปริมาณทดแทนในลำดับที่สองของ $X_{3,1}$	=IF(AND(L18=2,\$E\$7-\$D\$12*\$F\$9>\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>0),MAX(MIN(C18-\$K\$4-O18,ROUNDDOWN((\$K\$6-E18)/\$D\$11,0)),0),IF(AND(L18=4,\$D\$7-\$D\$10*\$E\$9>\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>0),MAX(MIN(C18-\$K\$4-M18,ROUNDDOWN((\$K\$6-E18)/\$D\$11,0)),0),0))	ปริมาณวัสดุคงคลังทดแทนประเภทที่ 1 ที่ได้จากการใช้วัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ทดแทน ซึ่งถูกใช้ทดแทนเป็นลำดับที่สอง
R18	ปริมาณทดแทนในลำดับที่สองของ $X_{3,2}$	=IF(AND(L18=2,\$D\$7-\$D\$11*\$F\$9>\$E\$7-\$D\$12*\$F\$9,\$E\$7-\$D\$12*\$F\$9>0),MAX(MIN(D18-\$K\$5-N18,ROUNDDOWN((\$K\$6-E18)/\$D\$12,0)),0),0)	ปริมาณวัสดุคงคลังทดแทนประเภทที่ 2 ที่ได้จากการใช้วัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ทดแทน ซึ่งถูกใช้ทดแทนเป็นลำดับที่สอง
S18	S_1^{after}/L_1^{after}	=MAX(\$K\$4-C18,0)	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 1 ที่ขาดหรือเหลือหลังทดแทน
T18	S_2^{after}/L_2^{after}	=MAX(\$K\$5-G18-(M18*\$D\$10)-(P18*\$D\$10),0)	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 2 ที่ขาดหรือเหลือหลังทดแทน
U18	S_3^{after}/L_3^{after}	=MAX(\$K\$6-H18-(N18*\$D\$11)-(O18*\$D\$12)-(Q18*\$D\$11)-(R18*\$D\$12),0)	ปริมาณวัสดุคงคลังประเภทที่ 3 ที่ขาดหรือเหลือหลังทดแทน
V18	รายรับ	=\$D\$7*(F18+M18+N18+P18+Q18)+\$E\$7*(G18+O18+R18)+\$F\$7*(H18)	รายรับรวมจากการขายวัสดุคงคลัง
W18	มูลค่าซาก	=\$D\$9*S18+\$E\$9*T18+\$F\$9*U18	รายรับรวมจากการขายวัสดุคงคลังที่เหลือในราคามูลค่าซาก
X18	ต้นทุน	=\$D\$8*\$K\$4+\$K\$5*\$E\$8+\$K\$6*\$F\$8	ต้นทุนรวมวัสดุคงคลัง
Y18	ผลกำไร	=V18+W18-X18	ผลต่างระหว่างรายได้รวมกับต้นทุนรวม

3.2) การค้นหาคำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์

พิจารณา n เป็นจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้การสุ่ม ค่าผลกำไรของชุดข้อมูล m แทนด้วย PF_m สมการแสดงค่าคาดหวังผลกำไรของข้อมูล n ข้อมูลแสดงได้ดังสมการที่ 8

$$E(PF) = \frac{\sum_{m=1}^n PF_m}{n} \quad (8)$$

งานวิจัยศึกษาปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภทเพื่อเพิ่มค่าคาดหวังของผลกำไรมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงดังสมการที่ 9

$$Maximize E(PF) = \frac{\sum_{m=1}^n PF_m}{n} \quad (9)$$

เพื่อให้การหาคำตอบที่ดีของตัวแบบคณิตศาสตร์ถูกทำได้ในเวลาที่เหมาะสม งานวิจัยได้กำหนดขอบเขตล่าง (lower bound) และขอบเขตบน (upper bound) ของตัวแปรตัดสินใจปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภท โดยค่าขอบเขตล่างของวัสดุคงคลังทั้งสามประเภทถูกกำหนดเป็นศูนย์ ($Q_1^L = Q_2^L = Q_3^L = 0$)

ทั้งนี้งานวิจัยได้กำหนดค่าขอบเขตบนของปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง (ซึ่งไม่ได้ถูกนำไปทดแทนวัสดุคงคลังประเภทอื่น) ดังสมการที่ 10

$$Q_1^U = \mu_1 + 3\sigma_1 \quad (10)$$

สำหรับวัสดุคงคลังประเภทที่สอง (ซึ่งสามารถนำไปทดแทนวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง) เมื่อกำหนดให้ μ_2' และ σ_2' เป็นค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลรวมอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่สองกับอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งเมื่อเปลี่ยนค่าเป็นอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่สอง จากหลักการที่ถูกแสดงโดย [18] ค่าของ μ_2' และ σ_2' สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 11 และ 12 ทั้งนี้การคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่บนสมมติฐานการเกิดอุปสงค์ของวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่งและสอง เป็นอิสระต่อกัน

$$\mu'_2 = \mu_2 + r_{2,1}\mu_1 \quad (11)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{V(D_2) + r_{2,1}^2 V(D_1)} \quad (12)$$

จากสมการที่ 11 และ 12 งานวิจัยกำหนดค่าขอบเขตบนของปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่สอง ดังสมการที่ 13

$$Q_2^U = \mu_2 + r_{2,1}\mu_1 + 3\sqrt{V(D_2) + r_{2,1}^2 V(D_1)} \quad (13)$$

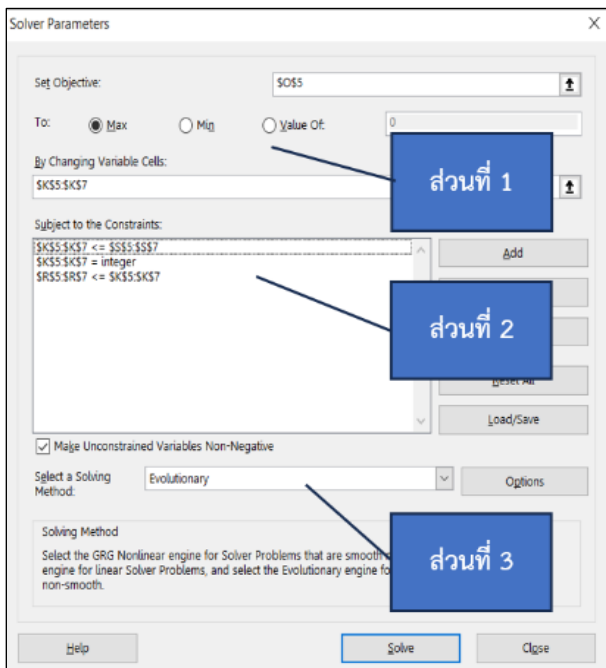
สำหรับวัสดุคงคลังประเภทที่สาม (ซึ่งสามารถนำไปทดแทนวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง และสอง) เมื่อกำหนดให้ μ'_3 และ σ'_3 เป็นค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลรวมอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่สามกับอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง และสองเมื่อเปลี่ยนค่าเป็นอุปสงค์วัสดุคงคลังประเภทที่สาม ค่าของ μ'_3 และ σ'_3 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 14 และ 15 ทั้งนี้การคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่บนสมมติฐานการเกิดอุปสงค์ของวัสดุคงคลังประเภทที่หนึ่ง สอง และสามเป็นอิสระต่อกัน

$$\mu'_3 = \mu_3 + r_{3,2}\mu_2 + r_{3,1}\mu_1 \quad (14)$$

$$\sigma'_3 = \sqrt{V(D_3) + r_{3,2}^2 V(D_2) + r_{3,1}^2 V(D_1)} \quad (15)$$

จากสมการที่ 14 และ 15 งานวิจัยกำหนดค่าขอบเขตบนของปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังประเภทที่สาม ดังสมการที่ 16

$$Q_3^U = \mu_3 + r_{3,2}\mu_2 + r_{3,1}\mu_1 + 3\sqrt{V(D_3) + r_{3,2}^2 V(D_2) + r_{3,1}^2 V(D_1)} \quad (16)$$



รูปที่ 2 : หน้าต่างฟังก์ชันโซลเวอร์ จากโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล

รูปที่ 2 เป็นหน้าต่างฟังก์ชันโซลเวอร์ ซึ่งจำแนกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ประกอบด้วย ตำแหน่งเซลล์เป้าหมาย (set objective) คือเซลล์ O5 ซึ่งเป็นค่าของค่าเฉลี่ยผลกำไร การกำหนดวัตถุประสงค์ให้เป็นการเพิ่มค่า (maximization) ของเซลล์เป้าหมาย และตำแหน่งตัวแปรตัดสินใจได้แก่เซลล์ K5 ถึง K7 ส่วนที่ 2 แสดงเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ โดยจะพิจารณาปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภทเป็นจำนวนเต็ม และป็นค่าที่อยู่ในช่วงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของวัสดุคงคลังประเภทนั้น ส่วนที่ 3 แสดงการเลือกวิธีการค้นหาคำตอบเป็น Evolutionary

4) ผลการศึกษา

เพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการค้นหาคำตอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอ ค่าคาดหวังของผลกำไรที่ได้จากวิธีดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าคาดหวังของผลกำไรจากวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ [1] โดยพิจารณาปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภทเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งไม่คำนึงถึงการทดแทน (อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหางานวิจัย หากการเกิดขึ้นของเหตุการณ์สามารถมีการทดแทนกันได้ ระบบจะมีการทดแทน) ทั้งนี้วิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์คำนวณความน่าจะเป็นของการขาดแคลนวัสดุคงคลังแต่ละชนิดที่เหมาะสม (α_i) และปริมาณสั่งเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละชนิด (Q_i^{BA}) ได้ดังสมการที่ 17 และ 18

$$\alpha_i = \frac{C_i - V_i}{P_i - V_i} \quad (17)$$

$$Q_i^{BA} = \mu_i + \sigma_i Z_{\alpha_i} \quad (18)$$

การกำหนดปัญหาทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพพิจารณาอิทธิพลของสองปัจจัยหลักคือ ปัจจัยมูลค่าซากสองระดับ (ระดับต่ำ: มูลค่าซากมีค่าเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนวัสดุคงคลัง และระดับสูง: มูลค่าซากมีค่าเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนวัสดุคงคลัง) และปัจจัยอัตราส่วนการทดแทนสองระดับ (ระดับต่ำ: $r_{2,1} = 2$ $r_{3,2} = 2$ $r_{3,1} = 4$ และระดับสูง: $r_{2,1} = 2$ $r_{3,2} = 3$ $r_{3,1} = 6$) จากการสร้างปัญหาทดสอบอย่างสุ่มโดยทำซ้ำ 30 ปัญหา ทำให้เกิดปัญหาทดสอบจำนวน $2 \times 2 \times 30 = 120$ ปัญหา ค่าพารามิเตอร์ของปัญหาทดสอบแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 : ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด

พารามิเตอร์	ประเภทของวัสดุคงคลัง		
	1	2	3
ค่าเฉลี่ย	$\mu_1 \sim U[30,50]$	$\mu_2 \sim U[70,130]$	$\mu_3 \sim U[200,300]$
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$\sigma_i \sim U[\frac{\mu_i}{4}, \frac{\mu_i}{3.5}]$	$\sigma_i \sim U[\frac{\mu_i}{4}, \frac{\mu_i}{3.5}]$	$\sigma_i \sim U[\frac{\mu_i}{4}, \frac{\mu_i}{3.5}]$
ราคาขาย	$P_1 \sim U[1.6,1.8]C_1$	$P_2 \sim U[1.4,1.6]C_2$	$P_3 \sim U[1.2,1.4]C_3$
ต้นทุน	$C_1 \sim U[1.2,1.5]C_2$	$C_2 \sim U[1.2,1.5]C_3$	$C_3 \sim U[100,200]$
มูลค่าซาก	$40\% \times C_1$	$40\% \times C_2$	$40\% \times C_3$
	$80\% \times C_1$	$80\% \times C_2$	$80\% \times C_3$
อัตราส่วน	$r_{2,1} = 2, r_{3,2} = 2, r_{3,1} = 4$		
ทดแทน	$r_{2,1} = 2, r_{3,2} = 3, r_{3,1} = 6$		

ผลการเปรียบเทียบค่าคาดหวังของผลกำไรที่ได้จากวิธีการค้นหาคำตอบแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอกับวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ จากการทดสอบแบบจับคู่ (Paired T-Test) แสดงดังรูปที่ 3

Estimation for Paired Difference				
Mean	StDev	SE Mean	95% CI for $\mu_{\text{difference}}$	
98.52	102.97	9.40	(79.91, 117.14)	
$\mu_{\text{difference}}$: mean of (solver&simulation - Benefit Analysis)				
Test				
Null hypothesis		$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$		
Alternative hypothesis		$H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$		
T-Value	P-Value			
10.48	0.000			

รูปที่ 3 : ผลการทดสอบ Paired T-Test ของ PF_{BA} และ PF_{SS} จากโปรแกรม Minitab18

พิจารณารูปที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่าคาดหวังผลกำไรจากวิธีการค้นหาคำตอบแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอมีความแตกต่างจากค่าคาดหวังผลกำไรที่ได้รับจากวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาช่วงความเชื่อของค่าคาดหวังผลกำไรจากวิธีทั้งสอง ซึ่งมีค่าเป็นบวกตลอดช่วง สามารถสรุปได้ว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ วิธีการที่นำเสนอให้ค่าคาดหวังผลกำไรสูงกว่าวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์

เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักระดับราคามูลค่าซากและอัตราส่วนการทดแทน เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent

Deviation: % dev) ของค่าคาดหวังผลกำไรที่ได้จากวิธีทั้งสองถูกนำมาพิจารณาเป็นตัวแปรตอบสนองในการทดสอบ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังกล่าวคำนวณได้ดังสมการที่ 17

$$\% dev = \frac{(PF_{SS} - PF_{BA}) \times 100}{PF_{BA}} \quad (17)$$

ผลการวิเคราะห์อิทธิพลหลักของปัจจัยราคามูลค่าซาก และปัจจัยอัตราส่วนทดแทนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ตามลำดับ

μ_1 : mean of Solvage Value = $40\% \times C$			
μ_2 : mean of Solvage Value = $80\% \times C$			
Difference: $\mu_1 - \mu_2$			
Test		Estimation for Difference	
Null hypothesis	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	95% CI for	
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	Difference	Difference
T-Value	DF	P-Value	0.6142 (0.5229, 0.7055)
13.44	62	0.000	

รูปที่ 4 : ผลการทดสอบ Two-Sample T-Test ของปัจจัยราคามูลค่าซากจากโปรแกรม Minitab18

μ_1 : mean of $r_{2,1} = 2, r_{3,1} = 4, r_{3,2} = 2$			
μ_2 : mean of $r_{2,1} = 2, r_{3,1} = 6, r_{3,2} = 3$			
Difference: $\mu_1 - \mu_2$			
Test		Estimation for Difference	
Null hypothesis	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	95% CI for	
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	Difference	Difference
T-Value	DF	P-Value	0.1885 (0.0482, 0.3289)
2.67	85	0.009	

รูปที่ 5 : ผลการทดสอบ Two-Sample T-Test ของปัจจัยอัตราส่วนการทดแทน จากโปรแกรม Minitab18

พิจารณาอิทธิพลหลัก (main effect) ของปัจจัยมูลค่าซากจากรูปที่ 4 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าคาดหวังผลกำไรทั้งสองระดับของปัจจัยมูลค่าซากมีความแตกต่างกัน ($p\text{-value} = 0.000$) ทั้งนี้ช่วงความเชื่อมั่นผลต่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าคาดหวังผลกำไรปัจจัยราคามูลค่าซากสองระดับมีค่าเท่ากับ (0.5229, 0.7055) ซึ่งมีค่าเป็นบวกตลอดช่วงสามารถสรุปได้ว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยราคามูลค่าซากที่ 40 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนวัสดุคงคลังมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าคาดหวังผลกำไรสูงกว่าปัจจัยราคามูลค่าซากที่ 80 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนวัสดุคงคลัง หรือกล่าวได้ว่า ระบบที่วัสดุคงคลังคงเหลือมีราคามูลค่าซากต่ำซึ่งการทดแทนมีแนวโน้มให้ผลกำไรสูงกว่าการขายวัสดุคงคลังคงเหลือในราคามูลค่าซากวิธีการที่นำเสนอซึ่งมีการพิจารณาการทดแทนในการหาปริมาณเพิ่มเติมที่เหมาะสม จะให้ค่าคาดหวังผลกำไรสูงกว่าวิธีการวิเคราะห์

ผลได้ประโยชน์ซึ่งพิจารณาการคำนวณปริมาณการเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละประเภทเป็นอิสระต่อกัน

พิจารณาอิทธิพลหลัก (main effect) ของปัจจัยอัตราส่วนทดแทน จากรูปที่ 5 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าคาดหวังผลกำไรที่สองระดับปัจจัยอัตราส่วนทดแทนมีค่าแตกต่างกัน ($p\text{-value} = 0.009$) ทั้งนี้ช่วงความเชื่อมั่นผลต่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าคาดหวังผลกำไรปัจจัยอัตราส่วนทดแทนสองระดับมีค่าเท่ากับ (0.0482, 0.3289) ซึ่งมีค่าเป็นบวกตลอดช่วง สามารถสรุปได้ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระบบวัสดุคงคลังที่มีอัตราส่วนทดแทนระดับต่ำมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าคาดหวังผลกำไรสูงกว่าระบบวัสดุคงคลังที่มีอัตราส่วนทดแทนระดับสูง

ผลการทดสอบวิธีการที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 : ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ

การทดสอบ	รูปแบบ	ค่า $p\text{-value}$	95 เปอร์เซ็นต์ช่วงความเชื่อมั่น
ความแตกต่างของผลกำไรระหว่างวิธีการที่นำเสนอ กับวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์	Paired T-Test	0.000	ความแตกต่างผลกำไร (79.91, 117.14)
อิทธิพลปัจจัยหลักมูลค่าซาก	Two-Sample T-Test	0.000	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างผลกำไร (0.5229, 0.7050)
อิทธิพลปัจจัยหลักอัตราส่วนทดแทน	Two-Sample T-Test	0.009	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างผลกำไร (0.0482, 0.3289)

5) สรุปผล

งานวิจัยทำการศึกษาระบบที่มีการสั่งเติมเต็มวัสดุคงคลังครั้งเดียว โดยมีวัสดุคงคลังสามประเภทที่ใช้งานทดแทนกันได้ในอัตราส่วนที่กำหนด ทั้งนี้วัสดุคงคลังที่เหลืออยู่ในระบบสามารถถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุคงคลังที่มีราคาสูงกว่า (หากเกิดการขาดแคลน) หรือขายในราคามูลค่าซาก วิธีการค้นหาคำตอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบจำลองสถานการณ์ถูกนำเสนอในงานวิจัย เพื่อค้นหาปริมาณสั่งซื้อวัสดุคงคลังแต่ละประเภทโดยมี

เป้าหมายคือการเพิ่มผลกำไรรวมของระบบ คำตอบจากวิธีการที่นำเสนอถูกนำไปเปรียบเทียบกับคำตอบจากวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ซึ่งพิจารณาปริมาณสั่งเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละประเภทเป็นอิสระต่อกัน ปัญหาจำนวน 120 ปัญหาถูกสุ่มขึ้นจากค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดเพื่อพิจารณาอิทธิพลปัจจัยหลักสองปัจจัยคือ ราคามูลค่าซากสองระดับ (ระดับต่ำ: มูลค่าซากเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนวัสดุคงคลัง และระดับสูง: มูลค่าซากเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนวัสดุคงคลัง) และอัตราส่วนทดแทนสองระดับ (ระดับต่ำ: $r_{2,1} = 2$ $r_{3,2} = 2$ $r_{3,1} = 4$ และระดับสูง: $r_{2,1} = 2$ $r_{3,2} = 3$ $r_{3,1} = 6$) จากผลการทดสอบพบว่าค่าคาดหวังผลกำไรจากคำตอบของวิธีการที่นำเสนอมีค่ามากกว่าค่าคาดหวังผลกำไรจากคำตอบวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ทั้ง 120 ปัญหาทดสอบ จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลักปัจจัยราคามูลค่าซากพบว่า ในระบบที่วัสดุคงคลังมีมูลค่าซากต่ำ ความแตกต่างระหว่างคำตอบที่ได้จากวิธีการค้นหาคำตอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนตัวแบบการจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอกับคำตอบที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์มีค่าสูงขึ้น

จากลักษณะปัญหางานวิจัยซึ่งการใช้ประโยชน์ของวัสดุคงคลังคงเหลือสามารถพิจารณาได้สองกรณี คือ การขายเป็นมูลค่าซาก และการขายเป็นวัสดุคงคลังทดแทน หากรายรับที่ได้จากการขายวัสดุคงคลังคงเหลือเป็นมูลค่าซาก มีค่าต่ำกว่ารายรับที่ได้จากการขายวัสดุคงคลังคงเหลือเป็นวัสดุคงคลังทดแทน วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยจะให้คำตอบที่มีค่าคาดหวังของผลกำไรสูงกว่าคำตอบจากวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ ในทำนองกลับกัน หากรายรับที่ได้จากการขายวัสดุคงคลังคงเหลือเป็นวัสดุคงคลังทดแทนมีค่าต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับรายรับที่ได้จากการขายวัสดุคงคลังคงเหลือเป็นมูลค่าซาก คำตอบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอจะมีค่าผลกำไร(และปริมาณเติมเต็มวัสดุคงคลังแต่ละประเภท) ใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ผลได้ประโยชน์ เนื่องจากระบบมีแนวโน้มไม่มีการทดแทนวัสดุคงคลัง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

REFERENCES

- [1] W. Supithak, *Inventory Planning (Theory and Simulation)*. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2022.
- [2] F. W. Harris, "How many parts to make at once," *Oper. Res.*, vol. 38, no. 6, pp. 947–950, 1990.
- [3] A. Andriolo, D. Battini, R. W. Grubbström, A. Persona, and F. Sgarbossa, "A century of evolution from Harris's basic lot size model: Survey and research agenda," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 155, pp. 16–38, Sep. 2014.
- [4] S. Agarwal, "Economic order quantity model : A review," *VSRD Int. J. Mech., Civil, Automobile Prod. Eng.*, vol. 4, no. 12, pp. 233–236, Dec. 2014.
- [5] S. M. Lam and D. S. Wong, "A fuzzy mathematical model for the joint economic lot size problem with multiple price breaks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 95, no. 3, pp. 611–622, 1996.
- [6] A. K. Maiti, A. K. Bhunia, and M. Maiti, "An application of real-coded genetic algorithm (RCGA) for mixed integer non-linear programming in two-storage multi-item inventory model with discount policy," *Appl. Math. Comput.*, vol. 183, no. 2, pp. 903–915, 2006.
- [7] S. Panda, S. Saha, and M. Basu, "An EOQ model for perishable products with discounted selling price and stock dependent demand," *Cent. Eur. J. Oper. Res.*, vol. 17, pp. 31–53, 2008.
- [8] P. K. Tripathy, M. Pattnaik, and P. Tripathy, "Optimal promotion and replenishment policies for profit maximization model under lost units," *American J. Oper. Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 260–265, 2012.
- [9] M. K. Salameh, M. Y. Jaber, and N. Noueihed, "Effect of deteriorating items on the instantaneous replenishment model," *Prod. Planning Control*, vol. 10, no. 2, pp. 175–180, 1999.
- [10] M. Pattnaik, "Deteriorated Economic Order Quantity (EOQ) model with variable ordering cost," (in Thai), *Thai. Stat.*, vol. 12, no. 1, pp. 83–95, Jan. 2014.
- [11] H. M. Wagner and T. W. Whitin, "Dynamic version of the economic lot size model," *Manage. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 89–96, 1958.
- [12] E. A. Silver and H. C. Meal, "A heuristic for selecting lot size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment," *Prod. Inventory Manage.*, vol. 14, no. 2, pp. 64–74, 1973.
- [13] R. J. Tersine, "Single order quantity," in *Principles of Inventory and Materials Management*, 4th ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1994, ch 7, pp. 312–335.
- [14] D. Waters, "Models for Uncertain Demand," in *Inventory Control and Management*, 2nd ed. England, U.K.: John Wiley & Sons, 2003, ch 5, pp. 147–192.
- [15] Y. Qin, R. Wang, A. J. Vakharia, Y. Chen, and M. M.H. Seref, "The newsvendor problem: Review and directions for future research," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 213, no. 2 pp. 361–374, 2011.
- [16] N. C. Petruzzi and M. Dada, "Pricing and the newsvendor problem: A review with extensions," *Oper. Res.*, vol. 47, no. 2, pp. 183–194, 1999.
- [17] N. Turken, Y. Tan, A. J. Vakharia, L. Wang, R. Wang, and A. Yenipazarli, "The multi-product newsvendor problem: Review, extensions, and directions for future research," in *Handbook of Newsvendor Problems*, T.-M. Choi, Ed., New York, NY, USA: Springer, 2012, ch. 1, pp. 3–39.
- [18] M. Khouja, A. Mehrez, and G. Rabinowitz, "A two-item newsboy problem with substitutability," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 44, no. 3, pp. 267–275, 1996.

ระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี โดยใช้อัลกอริทึมการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย

อิทธิศักดิ์ ศรีดำ*

*สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์และระบบสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน,
กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : idhisak@pit.ac.th

รับต้นฉบับ : 19 กันยายน 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 14 ตุลาคม 2566; ตอบรับบทความ : 16 ตุลาคม 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 28 มิถุนายน 2567

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซีของนักลงทุนยังคงประสบปัญหาเกิดความเสี่ยงในการล้มละลายจากการลงทุน การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย สร้างระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี และวัดประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขาย การวัดประสิทธิภาพด้านการเงินแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบแบบย้อนหลัง (backward test) ซึ่งเป็นการทดสอบข้อมูลย้อนหลัง โดยกำหนดระยะเวลาในการทดสอบประสิทธิภาพเป็นระยะเวลา 3 เดือน และการทดสอบแบบไปข้างหน้า (forward test) ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้ข้อมูลการซื้อขายจริงเป็นปัจจุบันขณะที่ทดสอบ โดยกำหนดระยะเวลาในการทดสอบประสิทธิภาพเป็นระยะเวลา 3 เดือน รวมระยะเวลาทดสอบทั้งหมด 6 เดือน ผลการศึกษาพบว่า การจำลองการทดสอบทั้งการทดสอบแบบย้อนหลังและการทดสอบแบบไปข้างหน้าสามารถทำกำไรต่อ 3 เดือน ได้ในระดับสูงถึงร้อยละ 130 และ 140 ตามลำดับ และมีค่าความแม่นยำโดยรวมเท่ากับร้อยละ 72.00 และ 80.39 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการลงทุนด้วยระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซีโดยใช้อัลกอริทึมการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายสามารถสร้างผลตอบแทนได้มากกว่านักลงทุนในตลาด

คำสำคัญ: อัลกอริทึมการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย ระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี

The Automatic System for Perpetual Futures Contracts on Cryptocurrency trading Using an Algorithm of Multiple Indicators to Predict the Trading Positions

Idhisak Sridam^{*}

^{}Department of Software Engineering and Information System, Faculty of Science and Technology,
Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

^{*}Corresponding Author. E-mail address: idhisak@pit.ac.th

Received: 19 September 2023; Revised: 14 October 2023; Accepted: 16 October 2023

Published online: 28 June 2024

Abstract

At present, perpetual futures contracts on cryptocurrency trading still face the risk of ruin. Therefore, this research was conducted with the objectives of creating an algorithm of multiple indicators to predict the trading positions, developing the computer program for generating trading strategies, creating the automatic system for cryptocurrency perpetual futures contract trading, and measuring the financial performance of the automatic trading system. The financial performance measurement was divided into two parts: a backward test, which involved evaluating historical data over a 3-month period, and a forward test, which involved testing system using current real trading data during a 3-month period. The total testing duration was 6 months. The results revealed that both the backward and the forward tests achieved a 3-month profitability efficiency of 130% and 140%, respectively. The overall accuracy rates were 72.00% and 80.39%, respectively. It has been shown that investing with the automatic system for perpetual futures contracts on cryptocurrency trading using the algorithm of multiple indicators to predict the trading positions has the potential to generate greater returns than the general traders.

Keywords: Algorithm of multiple indicators to predict the trading positions, Automatic system for perpetual futures contracts on cryptocurrency trading, Cryptocurrency

1) บทนำ

คริปโทเคอร์เรนซี (cryptocurrency) คือ สกุลเงินเข้ารหัส ซึ่งเป็นสินทรัพย์ดิจิทัลที่ไม่สามารถจับต้องได้ ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชน (blockchain technology) ในการบันทึกข้อมูลธุรกรรม (transaction data) ทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยเทคโนโลยีบล็อกเชนเป็นเทคโนโลยีที่ปฏิวัติการบันทึกข้อมูลแบบเดิมจากการอาศัยคนกลางที่มีความน่าเชื่อถือในการบันทึกข้อมูลแต่ละชุดข้อมูลอย่างเป็นอิสระต่อกัน สู่การบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ที่อาศัยตัวกลางที่เป็นเครือข่าย (network system) ที่เชื่อมโยงคอมพิวเตอร์จากผู้คนทั่วโลกในการบันทึกข้อมูล โดยทุกชุดข้อมูลจะถูกสร้างความสัมพันธ์ให้เชื่อมโยงกันด้วยการสร้างลายเซ็นดิจิทัลเหมือนการสร้างห่วงโซ่ที่ผูกทุกชุดข้อมูลเอาไว้อย่างแน่นหนาเพื่อทำให้ชุดข้อมูลเหล่านั้นกลายเป็นชุดข้อมูลที่เชื่อถือได้อย่างสมบูรณ์ [1]

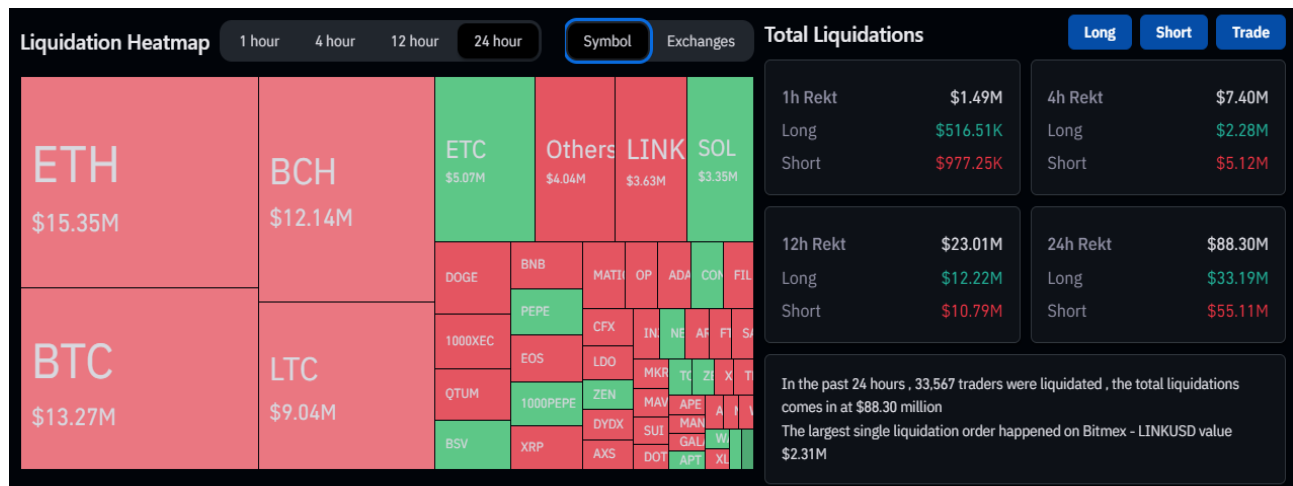
การซื้อขายหรือการเทรด (trade) คริปโทเคอร์เรนซีเป็นการลงทุนทั้งในรูปแบบการลงทุนระยะยาวและการลงทุนในรูปแบบเก็งกำไร ซึ่งการลงทุนทั้งสองรูปแบบมีสภาพคล่องสูง (high liquidity) โดยการลงทุนระยะยาวจะเป็นการลงทุนในตลาดการซื้อขายแบบทันที (SPOT market: SP) [2] และการฝากเพื่อผลตอบแทน (Earn Dividend: ED) [3] ส่วนการลงทุนในรูปแบบเก็งกำไรมีการลงทุนหลายรูปแบบ เช่น ตัวเลือกคริปโท (Crypto Option: CO) [4] การซื้อขายแบบสร้างสภาพคล่อง (Liquidity Farming: LF) [5] การซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยน คริปโทเคอร์เรนซีแบบกำหนดเวลา (Swap Futures Contract: SFC) และการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี (Perpetual Futures Contract: PFC) [6] เป็นต้น

การเทรดแบบ PFC เป็นการลงทุนที่มีข้อดี ดังนี้ 1) การเข้าถึงตลาดแบบหลายคู่สกุล ตัวอย่างกระดานการซื้อขาย (trading board) อย่างเช่น ไบแนนซ์ (Binance Cryptocurrency Exchange: BX) ได้ให้บริการเทรดในหลากหลายคู่สกุลเงินดิจิทัล เช่น บิตคอยน์ (Bitcoin: BTC) อีเธอร์เรียม (Ethereum: ETH) ไบแนนซ์คอยน์ (Binance Coin: BNB) และอื่น ๆ นักลงทุนสามารถเข้าถึงตลาดที่กว้างขึ้นและมีโอกาสในการทำกำไรจากความเคลื่อนไหวของราคาสกุลเงินดิจิทัลต่าง ๆ 2) สามารถทำกำไรจากการเทรดทั้งในทิศทางราคาขาขึ้นและราคาขาลง กล่าวคือ นักลงทุนสามารถทำกำไรจากการซื้อ (long) หรือการขายที่ยังไม่มีครอบครอง (short) ในตลาดคริปโทเคอร์เรนซีได้ 3) ความยืดหยุ่นในการเลือกขนาดการเทรดจะช่วยให้นักลงทุน

สามารถปรับขนาดการเทรดได้ตามความเหมาะสมและความเสี่ยงที่พร้อมรับได้ นักลงทุนสามารถกำหนดการเทรดขนาดเล็กหรือใหญ่ตามต้องการ และ 4) ความรวดเร็วและความน่าเชื่อถือและมีการปรับปรุงระบบอย่างสม่ำเสมอ นักลงทุนสามารถเข้าถึงการซื้อขายได้อย่างรวดเร็วและมีความมั่นใจในความปลอดภัยของทรัพย์สินของตนเองได้ [7]

การลงทุนคริปโทเคอร์เรนซีมีข้อพิจารณาในการลงทุนที่นักลงทุนต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อจะได้ผลตอบแทนจากการลงทุนอย่างต่อเนื่องในระยะยาวโดยไม่เกิดความเสี่ยงในการล้มละลายจากการลงทุน (Risk of Ruin: RoR) ได้แก่ การจัดการความเสี่ยง (risk management) [8] การจัดการเงินลงทุน (money management) [9] รวมถึงการเทรดแบบ PFC ต้องการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการตั้งค่าในการทำธุรกรรมด้วยความระมัดระวัง ซึ่งมีผลต่อการเกิดเหตุการณ์บังคับให้ชำระบัญชี (liquidation) ได้แก่ ปริมาณการซื้อขาย (volume) ขนาดของตำแหน่งราคาที่เปิด (position size) ความคงเหลือ (margin) อัตราทดค่าเงิน (leverage) และตำแหน่งราคาเปิดและปิด (position-long position, short position)

การเกิดกระบวนการที่ตำแหน่งราคาปิดของนักลงทุนถูกปิด (closed position) ออกจากตลาดโดยอัตโนมัติ หรือที่เรียกว่า liquidation เป็นการป้องกันการขาดทุนที่มากเกินไปในบัญชีของนักลงทุนที่ไม่สามารถรองรับการขาดทุนเพิ่มเติม และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ จะถูกบังคับให้ปิดตำแหน่งทันทีเมื่อมูลค่าของตำแหน่งลดลงถึงระดับที่กำหนดไว้ในระบบ (liquidation price) สัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซีที่นักลงทุนถือครองจะถูกขายในตลาดเพื่อชำระหนี้ตามค่า liquidation ที่เกิดขึ้น ถือเป็นเรื่องสำคัญในการซื้อขายเงินทุนเป็นเงินยาวหรือการเทรดในรูปแบบของเงินกู้ ซึ่งนักลงทุนจะต้องรับความเสี่ยงที่จะเกิดความสูญเสียทั้งมูลค่าตั้งต้นและมากกว่ามูลค่าตั้งต้นได้ อีกทั้งยังส่งผลต่อตลาดโดยรวมเนื่องจากการขายที่ต้องทำในกระบวนการ liquidation สามารถส่งผลกระทบต่อราคาของคริปโทเคอร์เรนซีและความเคลื่อนไหวของตลาดได้ [10] จากรูปที่ 1 เป็นรายงานประมาณการความเสียหายจากการ liquidation จากนักลงทุนจำนวน 33,567 ราย ในตลาดคริปโทเคอร์เรนซีทั่วโลก ซึ่งรวมมูลค่าความเสียหายต่อวันถึง 88.3 ล้านเหรียญสหรัฐ (USD) [11] แสดงให้เห็นว่าการ liquidation นักลงทุนต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในการป้องกันความเสี่ยงต่อการสูญเสียเงินลงทุนทั้งหมดได้จากการเทรดแบบ PFC



รูปที่ 1 : ความเสียหายจากการ liquidation (มูลค่าความเสียหายต่อวันเท่ากับ 88.3 ล้านดอลลาร์สหรัฐ)

การป้องกันการ liquidation สามารถทำได้โดยการกำหนดสัดส่วนที่เปรียบเทียบกับระหว่าง “ความเสี่ยง” เป็นจำนวนเงินที่ต้องสูญเสีย กับ “รางวัลตอบแทน” เป็นจำนวนเงินที่จะได้รับที่คุ้มค่าต่อการที่จะเสี่ยงเข้าไปลงทุนในแต่ละครั้งหรือไม่ หรือเรียกอีกอย่างว่า “สัดส่วนรางวัลความเสี่ยง” (Risk Reward Ratio: RRR) ซึ่งเป็นการยอมขาดทุนเป็นจำนวนเงินที่นักลงทุนรับได้ก่อนที่จะมีการ liquidation เกิดขึ้น ดังนั้น ในการเข้าเทรดแต่ละครั้ง นักลงทุนจะต้องกำหนดจุดของการขาดทุน (Stop Loss: SL) ที่เป็นไปได้ ในขณะที่จะต้องกำหนดเป้าหมายการทำกำไร (Take Profit: TP) ตามเป้าหมายราคาที่เหมาะสม ผลของการกำหนด RRR ไว้ล่วงหน้าจะทำให้ให้นักลงทุนสามารถลงทุนได้อย่างเป็นระบบ [12]

นอกจากนี้ ในปัจจุบันนักลงทุนได้มีการใช้หลักการพยากรณ์อนุกรมเวลาด้วยการพัฒนาตัวแบบการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning model) มาใช้ทำนายการลงลงทุนในหลากหลายผลิตภัณฑ์การเงินและการลงทุน โดยเฉพาะการนำมาใช้ในการลงทุนเกี่ยวกับคริปโทเคอร์เรนซี เช่น การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Neural Networks: DNN) ตัวแบบทำนายด้วยหน่วยความจำระยะสั้น-ระยะยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) หน่วยโครงข่ายประตูกลับ (Gated Recurrent Unit: GRU) โครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการชั่วคราว (Temporal Convolutional Network: TCN) ตัวแบบทำนายที่ปราศจากหน่วยความจำ (Memory-Free Prediction Models: MFP) การสุ่มแบบป่า (Random Forest: RF) การจัดประเภทแบบเกรเดียนต์ขยายกำลัง (Gradient

Boosting Classifier: GBC) ตัวแบบการถดถอยลอจิสติก (Logistic Regression Mode: LRM) เป็นต้น [13] ซึ่งอาศัยการทำนายข้อมูลแนวโน้มทิศทางของราคาในลักษณะข้อมูลอนุกรมเวลา (time series data) [14] ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ ของข้อมูลทางด้านราคาคริปโทเคอร์เรนซีได้ถูกบันทึกโดยผู้ให้บริการแพลตฟอร์ม TradingView.com ซึ่งเป็นข้อมูลการเงิน (financial data platform) ที่มีประสิทธิภาพสูง [15] ซึ่งการนำ machine learning model มาใช้ลงทุนเกี่ยวกับคริปโทเคอร์เรนซีในปัจจุบันยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร [16] เนื่องจากนักลงทุนยังคงเกิดเหตุการณ์ liquidation ขึ้นเป็นจำนวนมาก (รูปที่ 1) เนื่องจากขั้นตอนกระบวนการเรียนรู้เครื่องจักรให้เกิดความแม่นยำในการทำนายต้องอาศัยข้อมูลราคาซื้อขายในระดับราคาปัจจุบัน (real time data) ซึ่งการใช้ real time data จะทำให้เกิดการวาดซ้ำของกราฟแสดงผลราคาที่ผิดเพี้ยน (repainting) คือ การแสดงค่าสัญญาณการซื้อขายไม่ตรงกับความเป็นจริงที่ต้องการจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงสัญญาณตลอดเวลา [17] แต่ถ้าขั้นตอนกระบวนการเรียนรู้เครื่องจักร ไม่ใช้ real time data ก็จะทำให้ความแม่นยำในการทำนายลดลง ดังนั้น การทำนายจุดซื้อขายด้วยตัวชี้วัดที่หลากหลายอาจจะให้ความแม่นยำมากกว่า machine learning model

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาข้างต้น สรุปได้ว่าในปัจจุบันการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี (Perpetual Futures Contract: PFC) ของนักลงทุนยังคงประสบปัญหาเกิดความเสี่ยงในการล้มละลายจากการลงทุน (risk of ruin) เนื่องมาจากการ liquidation โดยสาเหตุหลักมาจาก

การกำหนดค่าตัวแปรในการลงทุนไม่เหมาะสม ได้แก่ สัดส่วนรางวัลความเสี่ยง (Risk Reward Ratio: RRR) การจัดการความเสี่ยง (risk management) การจัดการเงินลงทุน (money management) ปริมาณการซื้อขาย (volume) ขนาดของตำแหน่งราคาที่เปิด (position size) อัตราทดค่าเงิน (leverage) ตำแหน่งราคาเปิดและปิด (position-long position, short position) และค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างราคาเปิดและปิดที่ต้องการกับราคาเปิดและปิดที่ได้จริง (slippage)

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชี้วัดที่หลากหลาย
2. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย
3. เพื่อพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี
4. เพื่อวัดประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขาย

3) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1) ตัวชี้วัดทางเทคนิค (Technical Indicator)

การกำหนดตำแหน่งราคาเปิดและปิด (position) ทั้งทิศทางราคาขาขึ้น (long position) และทิศทางราคาขาลง (short position) เป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างผลกำไรระยะยาว การกำหนด position ที่แม่นยำจะช่วยให้นักลงทุนได้รับผลตอบแทนจากการลงทุนที่ดีในระยะยาว และมีผลต่อการได้อัตราการชนะ (win rate) ที่มีประสิทธิภาพ [18] และสามารถทำได้โดยการทำนายทิศทางของราคา (price direction) ของตลาดด้วยตัวชี้วัดทางเทคนิค (technical indicator) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มตัวชี้วัด ได้แก่

3.1.1) ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบโมเมนตัม (Momentum Indicator) เป็นตัวชี้วัดที่แสดงความแตกต่างระหว่างราคาปิดของแท่งเทียนปัจจุบันเปรียบเทียบกับราคาปิดลำดับที่ N ของแท่งเทียนก่อนหน้าที่ผ่านมาแล้ว ซึ่งจะอ้างอิงถึงราคาที่เคลื่อนไหวอย่างต่อเนื่องจนสามารถแสดงเป็นแนวโน้มได้อย่างชัดเจน โดยแสดงถึงแนวโน้มขาขึ้น (bullish) เมื่อราคาขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือแสดงถึงแนวโน้มขาลง (bearish) เมื่อราคาลงอย่างต่อเนื่อง [19] ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบโมเมนตัมที่ได้รับความนิยมจากนักลงทุน

ในปัจจุบัน เช่น ดัชนีความแข็งแกร่งของตลาด (Relative Strength Index: RSI) [20] ดัชนีสุ่มการแกว่งไหว (Stochastic Momentum Index: SMI) [21] ตัวชี้วัดช่วงเปอร์เซ็นต์ของวิลเลียมส์ (Williams Percent Range Indicator: Williams %R) [22] ตัวชี้วัดการแกว่งไหวแบบเยี่ยมยอด (Awesome Oscillator: AO) [23] ดัชนีความแรงของสมรรถนะ (True Strength Index: TSI) [24] และดัชนีกระแสเงิน (Money Flow Index: MFI) [25] เป็นต้น

3.1.2) ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบความผันผวน (Volatility Indicator) เป็นตัวชี้วัดที่จะประเมินราคาด้วยการวัดค่าความผันผวนของราคาในตลาด ซึ่งแนวโน้มขาขึ้นที่แข็งแกร่งจะชี้ถึงการลดลงของความผันผวน ในขณะที่แนวโน้มขาลงที่แข็งแกร่งจะชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของความผันผวน แนวโน้มของการที่จะเกิดจุดกลับตัวของราคานั้นก็จะเกิดขึ้นเมื่อความผันผวนเพิ่มขึ้น ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบความผันผวนที่ได้รับความนิยมจากนักลงทุนในปัจจุบัน เช่น ตัวชี้วัดช่วงจริงเฉลี่ย (Average True Range Indicator: ATR) [26]

3.1.3) ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบแนวโน้ม (Trend Indicator) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้วัดทิศทางหรือแนวโน้มความเคลื่อนไหวของราคาสินทรัพย์ต่าง ๆ ในตลาด ซึ่งตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบแนวโน้มที่ได้รับความนิยม เช่น ตัวชี้วัดค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ชี้วัดการกลับตัวของราคา (Moving Average Convergence Divergence: MACD) [27] ดัชนีค่าเฉลี่ยทิศทางของราคา (Average Directional Movement Index: ADX) [28] และตัวชี้วัดค่าเฉลี่ยเลขชี้กำลังสามเท่า (Triple Exponential Average: TEMA) [29] เป็นต้น

3.1.4) ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบปริมาณ (Volume Indicator) เป็นตัวชี้วัดอัตราการซื้อขายในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งนักลงทุนที่ใช้ตัวชี้วัดประเภทนี้จะมีความเชื่อว่าตัวชี้วัดสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการลงทุน เช่น ดัชนีแรง (Force Index: FI) [30] และตัวชี้วัดสถานการณ์ของปริมาณ (Volume Profile Indicator: VP) [31] เป็นต้น

โดยตัวชี้วัดทางเทคนิคเหล่านี้ได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงข้อมูลในอดีตของราคาและปริมาณการเทรดสินทรัพย์หรือการจับคู่ราคาของคริปโทเคอร์เรนซินั้น ๆ ในตลาดเพื่อคาดการณ์การเคลื่อนไหวของราคาในอนาคต [16], [18]

4) วิธีการทดลอง

4.1) วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) แบ่งการดำเนินการวิจัยเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

4.1.1) การสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย ใช้ TradingView application ในส่วนของกราฟราคาแบบเรียลไทม์ (real time chart) และตัวชี้วัดสำเร็จรูป (indicator application) ร่วมกับการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสนับสนุนนักลงทุนด้วยเครื่องมือการซื้อขาย ได้แก่ กราฟราคาแบบเรียลไทม์ ตัวชี้วัดสำเร็จรูป การทดสอบกลยุทธ์การซื้อขายย้อนหลัง (backward trading strategy testing) และพื้นที่แลกเปลี่ยนความคิดเห็น (social features) ที่นักลงทุนและนักวิเคราะห์สามารถแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับการลงทุนในสินทรัพย์ได้อย่างเปิดกว้าง [15] โดยอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายเป็นอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายที่ถูกสร้างขึ้นใหม่โดยผู้วิจัยเอง

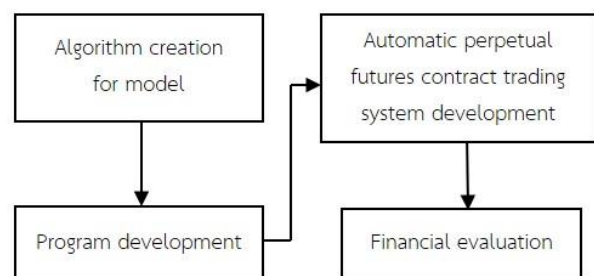
4.1.2) การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย ใช้ Pine Script editor application ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย ซึ่งเป็นเครื่องมือแก้ไขพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางการเงินด้วยภาษาโปรแกรม เป็นเครื่องมือหมวดหนึ่งของ TradingView application ใช้ในการสร้างภาษาสคริปต์ (script language) สำหรับการวิเคราะห์ สร้างกราฟราคา สร้างโปรแกรมซื้อขายอัตโนมัติติดตามความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสกุลเงินต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่ต้องการ และพัฒนาตัวชี้วัดและเทคนิคที่ซับซ้อน [32]

4.1.3) การพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี ใช้ TradingView alert application เกี่ยวกับสัญญาณข้อความ (signal notification) ร่วมกับการพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี เป็นเครื่องมือหมวดหนึ่งของ TradingView application ใช้ในการสร้างกำหนดการแจ้งเตือนล่วงหน้าเมื่อทราบเหตุการณ์ราคาที่กำหนดไว้ในกราฟราคาแบบเรียลไทม์ โดยถ้าหากเกิดเหตุการณ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในการตั้งค่า (alert setting) ระบบจะส่งการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ผ่านช่องทางที่กำหนดไว้ เช่น อีเมล (email) แอปพลิเคชันไลน์ (LINE)

สัญญาณข้อความ (signal notification) เป็นต้น เพื่อแจ้งเตือนให้ผู้ใช้ทราบเกี่ยวกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในตลาดได้ทันทั่วทั้ง และนักลงทุนสามารถตรวจสอบสถานะตลาดและกระบวนการซื้อขายได้สะดวกและรวดเร็ว ทำให้สามารถทำกำไรหรือหลีกเลี่ยงความเสี่ยง [33]

นอกจากนี้ ยังมีการนำ Finandy application ซึ่งเป็นการใช้งานเทคโนโลยีทางการเงิน (finandy) ผ่านทาง API (Application Programming Interface) ที่มีความสามารถในการเชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง application ที่แตกต่างกันในการซื้อขายทางการเงิน เช่น หุ้น ตราสารอนุพันธ์ เงินสด สกุลเงิน หรือสินทรัพย์ดิจิทัลได้ โดยเชื่อมโยงกับ TradingView alert application [34] และนำ Binance API application ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้เชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง application หรือโปรแกรมต่าง ๆ กับแพลตฟอร์มการซื้อขายสกุลเงินดิจิทัล Binance ผ่านทาง API ของแพลตฟอร์ม Binance การใช้งาน Binance API application ช่วยพัฒนาความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลตลาดและทำการซื้อขายสกุลเงินดิจิทัลในรูปแบบที่เป็นไปตามเงื่อนไขและการควบคุมของผู้พัฒนาได้ โดยสามารถเชื่อมโยงกับ Finandy application ได้ [35]

4.1.4) การวัดประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี มีการนำ TradingView application มาใช้ในส่วนของการทดสอบกลยุทธ์การซื้อขายย้อนหลัง (backward test) ร่วมกับการวัดประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี (forward test)



รูปที่ 2 : วิธีดำเนินงานวิจัย

4.2) ตัวชี้วัดที่ใช้ในการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชี้วัดที่หลากหลาย

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชี้วัดที่หลากหลาย ประกอบด้วย 7 ตัวชี้วัด โดยประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดที่ทำหน้าที่แตกต่างกันมาพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชี้วัดที่หลากหลาย 4 กลุ่มตัวชี้วัด ได้แก่ ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบโมเมนตัม ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบความผันผวน ตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบแนวโน้ม และตัวชี้วัดทางเทคนิคแบบปริมาณ ซึ่งจะใช้ในการตัดสินใจร่วมกันกำหนดจุดทำนายจุดซื้อขาย จากการทดสอบแบบย้อนหลัง (backward test) บนกรอบเวลา 15 นาที ภายในระยะเวลา 3 เดือน พบว่า ตัวชี้วัดทั้งหมด 7 ตัว ความสามารถทำนายแนวโน้มราคาถูกต้อง (Win ratio : %win) $\geq 40\%$ ต่อเดือน ซึ่งเพียงพอต่อการทำกำไรได้ในระยะยาว แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : ตัวชี้วัดที่ใช้ในการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชี้วัดที่หลากหลาย

ชื่อตัวชี้วัด	ชื่อย่อ	ประเภทตัวชี้วัด	หน้าที่
Force index	FI	volume indicator	entry position
Moving average convergence divergence	MACD	trend indicator	entry position
Relative strength index	RSI	momentum indicator	entry position
Volatility indicator	VT	volatility indicator	entry position
Commodity channel index	CCI	trend indicator	entry position
Stochastic oscillator	STO	momentum indicator	entry position
Average true range	ATR	volatility indicator	stop loss position

จากตารางที่ 1 กลุ่มตัวชี้วัดทั้งหมด 7 ตัว จะทำหน้าที่ใน 2 ลักษณะ ได้แก่ entry position และ stop loss position ตัวชี้วัดที่ช่วยกันทำหน้าที่ entry position ได้แก่ FI, MACD, RSI, VT, CCI และ STO สำหรับตัวชี้วัดที่ทำหน้าที่ stop loss position คือ ATR

หน้าที่ entry position สามารถพิจารณาสัญญาณการซื้อขายได้จาก 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ปริมาณการซื้อขาย (volume) 2) แนวโน้มราคา (trend) และ 3) ความผันผวนของราคาซื้อขาย (volatility) กล่าวคือ เมื่อปริมาณการซื้อขายที่มากกว่าปกติเป็นสัญญาณของการเกิดแนวโน้มความต้องการซื้อหรือขายของตลาดที่มีมากขึ้นหรือลดลงจากปกติ [31] และแนวโน้มราคาขึ้นหรือลงที่ผิดปกติเป็นสัญญาณของการเกิดแนวโน้มความต้องการซื้อหรือขายของตลาดที่มีมากขึ้นหรือลดลง [36] รวมถึงความผันผวนของราคาซื้อหรือราคาขายที่ไม่ปกติเป็นสัญญาณของการเกิดแนวโน้มความต้องการซื้อหรือขายของตลาดที่มีมากขึ้นหรือลดลง [37] อย่างไรก็ตาม การพิจารณาสัญญาณการซื้อขายจะต้องพิจารณาทั้ง 3 ปัจจัยร่วมกัน ถึงแม้ว่าตัวชี้วัดแต่ละตัวจะมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูง แต่ก็ยังมีจุดอ่อนอยู่ถ้านำตัวชี้วัดแต่ละตัวไปใช้งานโดยลำพัง ตัวอย่างเช่น ตลาดในภาพรวมไม่ได้ต้องการซื้อขาย ในขณะที่มีปริมาณการซื้อขายเพิ่มมากขึ้น แต่ราคาซื้อขายอาจไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากนักลงทุนรายใหญ่ขายสินทรัพย์ออกมาจำนวนมากเพื่อทำกำไรในราคาที่นักลงทุนรายนั้นพอใจ จึงทำให้ราคาไม่สูงขึ้นจริง หรือใช้กลยุทธ์วางกับดักคุณค่า (value trap) คือการกำหนดแนวโน้มราคาหรือความผันผวนของราคาแบบหลอก ๆ โดยกำหนดให้ราคาสูงหรือต่ำกว่าปกติ แต่ปริมาณการซื้อขายที่ไม่เกิดขึ้นจริง [38] เป็นต้น

นอกจากนี้ การพิจารณาปัจจัยด้านโมเมนตัม (momentum) ซึ่งใช้สำหรับตรวจจับอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือความเร็วของการเคลื่อนไหวของราคาสินทรัพย์ที่สนใจ เพื่อให้ทราบว่าภาวะตลาดมีการซื้อมากเกินไป (overbought) หรือมีการขายมากเกินไป (oversold) หรือไม่ [39]

ดังนั้น การใช้ตัวชี้วัดทั้งหมด 7 ตัว การทำนายจุดซื้อขายเป็นการเฝ้าติดตามเพื่อหาโอกาสที่เหมาะสมในการลงทุนที่จะทำให้นักลงทุนสามารถทำกำไรได้ต้องอยู่ในสภาวะตลาดที่มีปริมาณการซื้อขายที่เหมาะสม แนวโน้มราคาเป็นไปในทิศทางที่ถูกต้อง (ปริมาณซื้อมากกว่าขาย ราคาควรที่จะเพิ่มขึ้นในทางกลับกัน ปริมาณซื้อน้อยกว่าขาย ราคาควรที่จะลดลง) และความผันผวนของราคาควรจะไม่ปกติถ้าเกิดภาวะราคาที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง และการกำหนด stop loss เป็นการป้องกันการล้มละลายจากการลงทุนด้วย

4.3) การกำหนดค่าตัวแปรในการลงทุนที่เหมาะสมที่สุด

4.3.1) ตัวแปรพื้นฐาน ประกอบไปด้วยตัวแปรที่เป็นค่าคงที่ จำนวน 3 ตัวแปร ดังนี้

1) สกุลเงินที่ใช้ลงทุน (currency) ได้แก่ USDT โดย Tether (USDT) เป็นคริปโทเคอร์เรนซีที่เรียกว่า เงินที่มั่นคง (stable coin) เนื่องจากมูลค่าของ USDT เทียบเท่าของสกุลเงินดอลลาร์สหรัฐ [40]

2) สินทรัพย์หรือสกุลเงินที่ได้ลงทุน (asset) ได้แก่ ETH โดย Ethereum (ETH) เป็นหนึ่งในสกุลเงินดิจิทัลที่มีความนิยมและได้รับความสนใจมากที่สุดในช่วงกว้างของตลาดสกุลเงินดิจิทัลในปัจจุบัน และมีความผันผวนต่ำกว่า Bitcoin (BTC) [40]

3) กรอบเวลา (Time Frame: TF) ได้แก่ TF 15 นาที ซึ่งเป็นกรอบเวลาที่สามารถทำ backward test ข้อมูลย้อนหลังได้ประมาณ 3 เดือน

4.3.2) ตัวแปรสัดส่วนรางวัลความเสี่ยง การจัดการความเสี่ยง และการจัดการเงินลงทุน การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ค่าตัวแปรสัดส่วนรางวัลความเสี่ยง (Risk Reward Ratio : RR) ในอัตรา 1 : 2 เท่า (ค่า RR = 2 โดย Risk = 1, Reward = 2) หรือเรียกอีกอย่างว่ามี payoff ratio = 2 [41] ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการลงทุนในตลาดคริปโทเคอร์เรนซี [42] แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3

การจัดการความเสี่ยงโดยไม่เกิดความเสี่ยงในการล้มละลายจากการลงทุนจากตารางความน่าจะเป็นในการล้มละลาย (probability of ruin table) [42] โดยมีตัวแปรสำคัญที่ต้องนำมาใช้กับตาราง ดังนี้ %win = 40% และ RR = 2 เมื่อนำไป

เปิด probability of ruin table ควรจะต้องมีอัตราส่วนปริมาณซื้อที่จะเสี่ยงได้ในแต่ละครั้ง (capital risk exposure ratio: %CR) $\leq 1\%$ (คำนวณได้จากตารางจะเท่ากับ 0.608%) จึงจะทำให้การลงทุนไม่ล้มละลาย

การจัดการเงินลงทุน คือ จำนวนเงินการลงทุนต่อระยะเวลาการลงทุน (Portfolio Size : PFS) ซึ่งขึ้นอยู่กับ %win ว่าใช้ฐานระยะเวลาการลงทุนเท่าไร ในกรณีนี้ %win = 40% ต่อเดือน ดังนั้น จำนวนเงินการลงทุนต่อระยะเวลาการลงทุน 1 เดือนเช่นกัน โดยค่า PFS ได้จากสมการที่ (1)

$$PFS = \frac{5RP}{Reward(\%win) - Risk(1 - \%win)} \quad (1)$$

เมื่อ RP = รายได้ที่ต้องการต่อเดือน

ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการรายได้ 1,000 USDT (1,000 ดอลลาร์สหรัฐ) จะได้ portfolio size ดังนี้

$$PFS = \frac{5 \times 1000}{2(0.40) - 1(1 - 0.40)} \quad (2)$$

$$PFS = \frac{5000}{0.80 - 0.60} \quad (3)$$

ดังนั้น portfolio size = 25,000 USDT

อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนด portfolio size = 1,000 USDT ต่อเดือน ตามงบประมาณ (budget) ที่กำหนดไว้เท่ากับ 100 USDT เท่านั้น



รูปที่ 3 : ตัวอย่างการใช้ RR = 1 : 2 เท่า สำหรับ Long position

4.3.3) ตำแหน่งราคาเปิดและปิด และปริมาณการซื้อขายต่อครั้ง การกำหนดตำแหน่งราคาเปิด (entry position) ได้จากผลการคำนวณของอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย (รูปที่ 3)

สำหรับการกำหนดตำแหน่งราคาปิดมี 2 ลักษณะ ได้แก่

1) ตำแหน่งตัดขาดทุน อ้างอิงได้จากจุด ATR stop loss ที่ได้จากการคำนวณของอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย (รูปที่ 3)

2) ตำแหน่งทำกำไรจากการคำนวณที่อ้างอิงจากค่า risk reward ratio (รูปที่ 3)

ส่วนปริมาณการซื้อขายต่อครั้ง กำหนดให้เท่ากับ 10 USDT (1 USDT x leverage) ต่อครั้ง ($PFS \times \%CR = 1000 \times 1\%$)

4.3.4) อัตราทดค่าเงิน อัตราทดค่าเงิน (leverage) เป็นการทดค่า portfolio size ให้ได้จำนวนที่ต้องการ จากการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนด portfolio size = 1,000 USDT ต่อเดือน ตามงบประมาณ (budget) ที่กำหนดไว้เท่ากับ 100 USDT เท่านั้น จากงบประมาณ 100 USDT เพื่อที่จะได้ leverage = 10 (portfolio size/ budget) ค่าตัวแปรในการลงทุนที่เหมาะสมที่สุด สรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ค่าตัวแปรในการลงทุนที่เหมาะสมที่สุด

parameters	value/ reference
currency	USDT
asset	ETH
Time frame	15 minutes
reward ratio	2
risk ratio	1
%win	40%
capital risk exposure	1 USDT
portfolio size	1,000 USDT
leverage	10
stop loss position	algorithm
entry position	algorithm
take profit position	algorithm

5) ผลการศึกษา

5.1) ผลการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย

ผลการศึกษาพบว่า อัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นใหม่ ถูกนำไปใช้

อ้างอิงในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขายในครั้งนี้ โดยกระบวนการอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย ประกอบด้วย 9 ขั้นตอน ดังรูปที่ 4

ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนเริ่มการทำงานจะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนในการตรวจสอบว่าขณะนี้ปัจจุบันได้มีการ open position (long หรือ short ก็ได้) แล้วหรือไม่ ถ้าใช่ (Yes) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าไม่ใช่ (No) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนในการตรวจสอบว่า indicators ทั้ง 6 ตัว (FI, MACD, RSI, VT, CCI, STO) มีการทำนายราคาขึ้น (up) หรือราคาลง (down) หรือไม่ ถ้าใช่ (Yes) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้าไม่ใช่ (No) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 1 เป็นการเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนในการ open position (long หรือ short ก็ได้) และจะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง

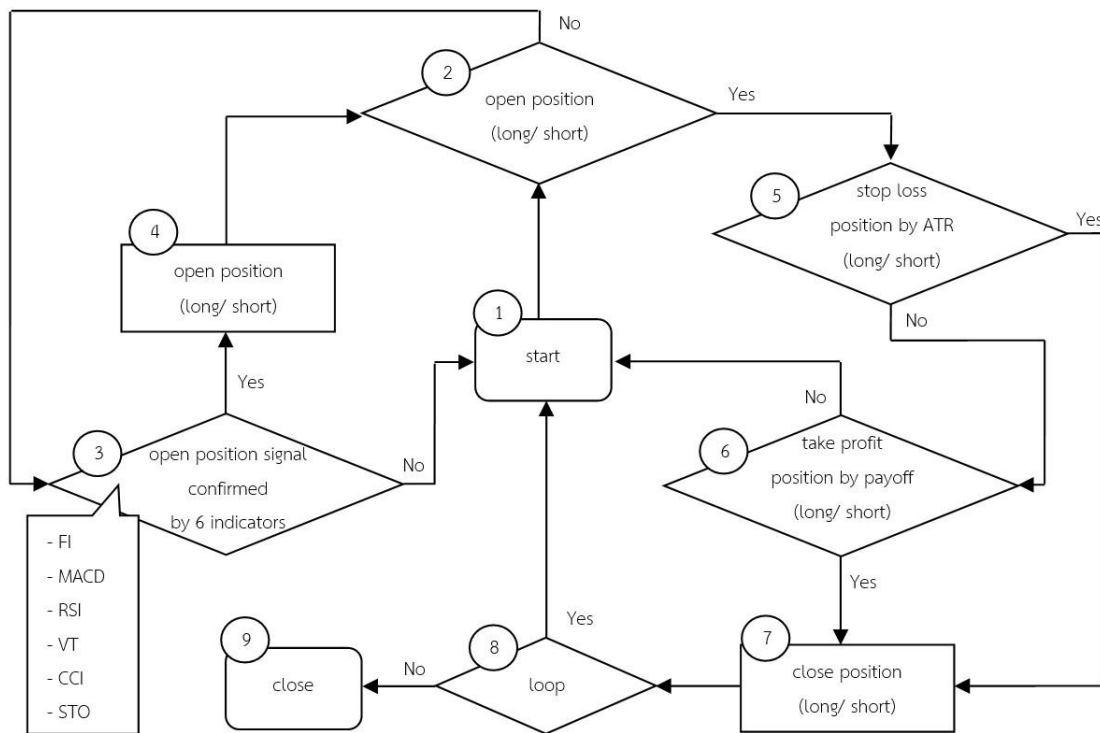
ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนในการ stop loss เมื่อ ATR indicator ยืนยันว่าราคาถึงค่าที่กำหนดแล้วหรือไม่ ถ้าใช่ (Yes) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 7 แต่ถ้าไม่ใช่ (No) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนในการ take profit เมื่ออัลกอริทึมยืนยันว่าราคาถึงค่าที่กำหนดจากการคำนวณของค่า payoff ที่กำหนดแล้วหรือไม่ ถ้าใช่ (Yes) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 7 แต่ถ้าไม่ใช่ (No) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 1 เป็นการเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง

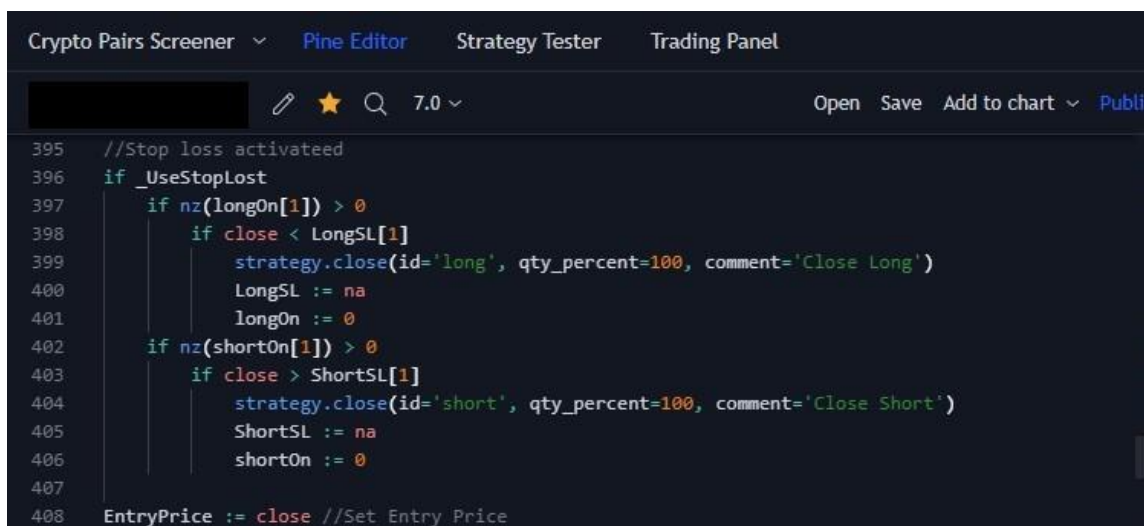
ขั้นตอนที่ 7 เป็นขั้นตอนในการ close position (long หรือ short ก็ได้) และจะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 เป็นขั้นตอนที่ user ตั้งค่าให้ loop หรือไม่ ถ้าไม่ใช่ (No) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 9 แต่ถ้าใช่ (Yes) จะกระตุ้นการทำงานของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 1 เป็นการเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 9 เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่ทำหน้าที่หยุด (close) การทำงานของอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย



รูปที่ 4 : กระบวนการอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลาย



```

395 //Stop loss activateed
396 if _UseStopLoss
397     if nz(longOn[1]) > 0
398         if close < LongSL[1]
399             strategy.close(id='long', qty_percent=100, comment='Close Long')
400             LongSL := na
401             longOn := 0
402     if nz(shortOn[1]) > 0
403         if close > ShortSL[1]
404             strategy.close(id='short', qty_percent=100, comment='Close Short')
405             ShortSL := na
406             shortOn := 0
407
408 EntryPrice := close //Set Entry Price
  
```

รูปที่ 5 : ตัวอย่างแสดงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขายด้วย Pine scrip editor application

5.2) ผลการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย

ผลการศึกษาพบว่า การนำผลการพัฒนาอัลกอริทึมการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายมาใช้อ้างอิงเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขายด้วย Pine scrip editor application และเมื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขายเสร็จสิ้นแล้ว Pine scrip editor

application จะผนวกโปรแกรมร่วมกับ Trading-View application เพื่อใช้ในการกำหนดค่าใน Trading-View alert application ที่เป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี แสดงตัวอย่างการเขียนโปรแกรม ดังรูปที่ 5 และตัวอย่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย ดังรูปที่ 6



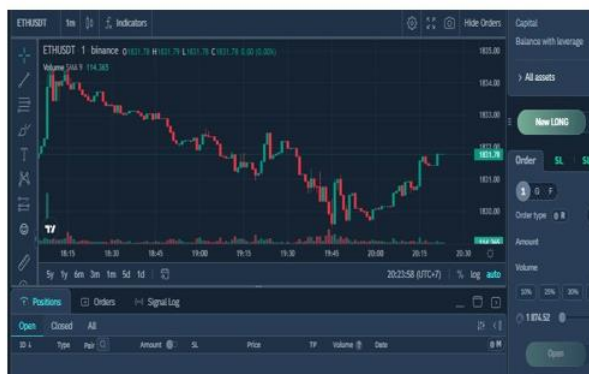
รูปที่ 6 : ตัวอย่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย

TradingView application



TradingView alert application

Finandy application



Binance API application



รูปที่ 7 : ระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี

5.3) ผลการพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี

ผลการพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี เป็นการประยุกต์เชื่อมโยง

เครื่องมือต่าง ๆ ให้สามารถทำงานร่วมกันดังรูปที่ 7 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) TradingView application (โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขายด้วยอัลกอริทึมสำหรับการทำนาย

จุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายได้ผนวกโปรแกรมร่วมกับ TradingView application) เชื่อมโยงไปยัง TradingView alert application

2) TradingView alert application ได้กำหนด code ให้ส่งสัญญาณไปยัง Finandy application ได้โดยวิธีการเฉพาะทางของระบบ Finandy [43]

3) Finandy application ได้กำหนดตัวแปรต่าง ๆ เพื่อเชื่อมโยงไปยัง Binance API application ได้โดยวิธีการเฉพาะทางของระบบ Finandy [44]

5.4) ผลการวัดประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขาย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวัดประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซีโดยใช้อัลกอริทึมการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายด้วยการวัดประสิทธิภาพด้านการเงิน โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบแบบย้อนหลัง (backward test) ซึ่งเป็นการทดสอบข้อมูลย้อนหลัง โดยกำหนดระยะเวลาในการทดสอบประสิทธิภาพเป็นระยะเวลา 3 เดือน และการทดสอบแบบไปข้างหน้า (forward test) ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้ข้อมูลการซื้อขายจริงเป็นปัจจุบันขณะที่ทดสอบ โดยกำหนดระยะเวลาในการทดสอบประสิทธิภาพเป็นระยะเวลา 3 เดือน รวมระยะเวลาทดสอบทั้งหมด 6 เดือน

5.4.1) การทดสอบแบบย้อนหลัง การทดสอบแบบย้อนหลังด้วยงบประมาณ 100 USDT ใช้ระยะเวลา 3 เดือน ด้วยการวัดผลโดยการจำลองการซื้อขาย (position) ได้แก่ confusion matrix, accuracy, precision, recall, F-measure, จำนวนครั้งของการซื้อขายที่ชนะ และผลกำไรขาดทุน

ผลการวัดผลด้วย confusion matrix พบว่า ข้อมูลจำนวนการซื้อขายทั้งหมดเท่ากับ 50 ครั้ง เป็นการทำนายทิศทางของราคาได้ถูกต้องจำนวน 36 ครั้ง ซึ่งไม่ได้พิจารณาเกี่ยวกับแพ้หรือชนะในการซื้อขาย โดยเป็นการทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทางขาขึ้น (up) จำนวน 16 ครั้ง และเป็นการทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทางขาลง (down) จำนวน 20 ครั้ง ดังรูปที่ 8

Output	Down (0)	20	7
	Up (1)	7	16
		Down (0)	Up (1)
		Target	

รูปที่ 8 : confusion matrix แสดงผลการทดสอบแบบย้อนหลัง

ตารางที่ 3 : ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำนายของอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายของการทดสอบแบบย้อนหลัง

activity	accuracy (%)	precision (%)	recall (%)	F-measure (%)
up (1)	72	69.57	59.26	80
down (0)		74.07	86.96	64
average		71.82	73.11	72

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำนายของอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติชีวิตที่หลากหลายพบว่า ความแม่นยำโดยรวม (accuracy) เท่ากับร้อยละ 72 ความเที่ยงตรง (precision) ของการทำนายราคาถูกต้องโดยมีทิศทางขาขึ้น เท่ากับร้อยละ 69.57 และความเที่ยงตรงของการทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทางขาลงเท่ากับร้อยละ 74.07 การทดสอบความครอบคลุม (recall) ของการทำนายที่ดีที่สุดคือการทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทางขาลงเท่ากับร้อยละ 86.96

ตารางที่ 4 : ผลการวัดประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซีของการทดสอบแบบย้อนหลัง

period	total trades	win	%win (%)	budget (USDT)	profit/ Loss	equity (USDT)
month 1	15	7	46.67	100	60	160
month 2	17	6	35.29	100	10	170
month 3	18	8	44.44	100	60	230
total	50	21	42.00	100	130	230

จากตารางที่ 4 พบว่า จำนวนที่ชนะการซื้อขาย เท่ากับ 21 ครั้ง และได้กำไรสะสม 3 เดือน เท่ากับ 130% (130 USDT)

5.4.2) การทดสอบแบบไปข้างหน้า การทดสอบแบบไปข้างหน้าด้วยงบประมาณ 100 USDT ใช้ระยะเวลา 3 เดือน ด้วยการวัดผลการจำลองการซื้อขาย (position) ได้แก่ confusion matrix, accuracy, precision, recall, F-measure, จำนวนครั้งของการซื้อขายที่ชนะ และผลกำไรขาดทุน

ผลการวัดผลด้วย confusion matrix พบว่า ข้อมูลจำนวน การซื้อขายทั้งหมดเท่ากับ 51 ครั้ง เป็นการทำนายทิศทางของ ราคาได้ถูกต้องจำนวน 41 ครั้ง ซึ่งไม่ได้พิจารณาเกี่ยวกับแพ้หรือ ชนะในการซื้อขาย โดยเป็นการทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทาง ขาขึ้น (up) จำนวน 19 ครั้ง และเป็นการทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทางขาลง (down) จำนวน 22 ครั้ง ดังรูปที่ 9

Output	Down (0)	22	4
	Up (1)	6	19
		Down (0)	Up (1)
		Target	

รูปที่ 9 : confusion matrix แสดงผลการทดสอบแบบไปข้างหน้า

ตารางที่ 5 : ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำนายของอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติซัฟต์ที่หลากหลายของการทดสอบแบบไป ข้างหน้า

activity	accuracy (%)	precision (%)	recall (%)	F-measure (%)
up (1)	80.39	82.61	95.65	86.27
down (0)		78.57	67.86	74.51
average		80.59	81.75	80.39

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำนายของ อัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติซัฟต์ที่หลากหลาย พบว่า ความแม่นยำโดยรวม (accuracy) เท่ากับร้อยละ 80.39 ความเที่ยงตรง (precision) ของการทำนายราคาถูกต้อง โดยมี ทิศทางขาขึ้นเท่ากับร้อยละ 82.61 และความเที่ยงตรงของการ ทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทางขาลงเท่ากับร้อยละ 78.57 การ ทดสอบความครอบคลุม (recall) ของการทำนายที่ดีที่สุดคือ การทำนายราคาถูกต้อง โดยมีทิศทางขาขึ้นเท่ากับร้อยละ 95.65

จากตารางที่ 6 พบว่า จำนวนที่ชนะการซื้อขายเท่ากับ 22 ครั้ง และทำกำไรสะสม 3 เดือน เท่ากับ 140% (140 USDT)

ตารางที่ 6 : ผลการวัดประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการ ซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซีของการทดสอบแบบไปข้างหน้า

period	total trades	win	%win (%)	budget (USDT)	profit/ loss	equity (USDT)
month 1	17	7	41.18	100	40	140
month 2	20	9	45.00	100	70	210
month 3	15	6	40.00	100	30	240
Total	52	22	42.31	100	140	240

6) สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาเกี่ยวกับระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญา แลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซีโดยใช้อัลกอริทึมการทำนายจุดซื้อ ขายเชิงมิติซัฟต์ที่หลากหลาย โดยการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การสร้างอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อ ขายเชิงมิติซัฟต์ที่หลากหลาย การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับสร้างกลยุทธ์การซื้อขาย การพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อ การซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี และการวัด ประสิทธิภาพด้านการเงินของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขาย

ผลการวัดประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขาย สัญญาแลกเปลี่ยนคริปโทเคอร์เรนซี โดยใช้อัลกอริทึมการทำนาย จุดซื้อขายเชิงมิติซัฟต์ที่หลากหลายด้วยการวัดประสิทธิภาพด้าน การเงิน โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบแบบย้อนหลัง (backward test) ซึ่งเป็นการทดสอบข้อมูลย้อนหลัง โดยกำหนด ระยะเวลาในการทดสอบประสิทธิภาพเป็นระยะเวลา 3 เดือน และการทดสอบแบบไปข้างหน้า (forward test) ซึ่งเป็นการ ทดสอบโดยใช้ข้อมูลการซื้อขายจริงเป็นปัจจุบันขณะที่ ทดสอบ โดยกำหนดระยะเวลาในการทดสอบประสิทธิภาพเป็น ระยะเวลา 3 เดือน รวมระยะเวลาทดสอบทั้งหมด 6 เดือน

ผลการจำลองการทดสอบทั้งการทดสอบแบบย้อนหลัง และ การทดสอบแบบไปข้างหน้าสามารถทำกำไรต่อ 3 เดือน ได้ใน ระดับสูงถึงร้อยละ 130 และ 140 ตามลำดับ และมีค่าความ แม่นยำโดยรวมร้อยละ 72.00 และ 80.39 ตามลำดับ เมื่อเทียบ กับการลงทุนในทรัพย์สินต่าง ๆ ของนักลงทุนในตลาดแล้ว การลงทุนด้วยระบบอัตโนมัติเพื่อการซื้อขายสัญญาแลกเปลี่ยน คริปโทเคอร์เรนซีโดยใช้อัลกอริทึมการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติ ซัฟต์ที่หลากหลาย สามารถสร้างผลตอบแทนได้มากกว่านักลงทุน ในตลาด ซึ่งนักลงทุนในตลาดจะทำกำไรได้ประมาณร้อยละ 20-35 ต่อปี

7) ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาในอนาคต

1. ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอัลกอริทึมสำหรับการทำนายจุดซื้อขายเชิงมิติที่วัดที่หลากหลายด้วยการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสม ซึ่งค่าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อาจจะยังไม่ใช่ว่าดีที่สุด ดังนั้น ในการศึกษาในอนาคตควรใช้การคิดค้นอัลกอริทึมแบบฮิวริสติก สำหรับการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมมากที่สุด

2. ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้รอบเวลา 15 นาที สำหรับนักลงทุนระยะเวลา 15 นาที อาจจะไม่เพียงพอในการเตรียมข้อมูล ดังนั้น นักลงทุนหรือผู้ที่สนใจสามารถปรับใช้รอบเวลาในช่วงต่าง ๆ ได้ เช่น 30 นาที 1 ชั่วโมง หรือ 4 ชั่วโมง เป็นต้น

3. ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ข้อมูลราคาของ ETH เพียงทรัพย์สินเดียว ดังนั้น ควรจะใช้ข้อมูลราคาของสินทรัพย์อื่น ๆ ด้วย

4. ในการศึกษาครั้งนี้ ได้กำหนดค่า payoff ratio เท่ากับ 2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบฯ พบว่า ความแม่นยำ (accuracy) โดยรวมของ backward test เท่ากับ 72% และ forward test เท่ากับ 80.39% แต่ความสามารถทำนายแนวโน้มราคาถูกต้อง (%win) ของ backward test เท่ากับ 42% และ forward test เท่ากับ 40% ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ค่า payoff ratio เท่ากับ 2 เป็นค่าที่สูงเกินไป ทำให้ %win ไม่สอดคล้องกับค่าความแม่นยำ (accuracy) ดังนั้น ควรมีการทดสอบโดยใช้ค่า payoff ratio เท่ากับ 1.5

REFERENCES

- [1] M. Z. Khan, Y. Ali, H. B. Sultan, M. Hasan, and S. Baloch, "Future of currency: A comparison between traditional, digital fiat and cryptocurrency exchange mediums," *Int. J. Blockchains Cryptocurrencies*, vol. 1, no. 2, pp. 206–224, 2020.
- [2] Binance Academy. "What is a spot market and how to do spot trading." ACADEMY.BINANCE.com. <https://academy.binance.com/en/articles/what-is-a-spot-market-and-how-to-do-spot-trading> (accessed May 29, 2023).
- [3] Binance. "How to earn rewards on your crypto holdings." BINANCE.com. <https://www.binance.com/en/blog/earn/how-to-earn-rewards-on-your-crypto-holdings-421499824684902189> (accessed May 29, 2023).
- [4] CoinCodex. "Binance options-Why you should trade options on binance and how to get started." BINANCE.com. <https://www.binance.com/en/feed/post/131473> (accessed May 29, 2023).
- [5] MooneySeeds. "What is binance liquidity farming?." BINANCE.com. <https://www.binance.com/en/square/post/563779> (accessed May 29, 2023).
- [6] Binance. "Crypto futures and options: what are the similarities and differences?." BINANCE.com. <https://www.binance.com/en/blog/futures/crypto-futures-and-options-what-are-the-similarities-and-differences-421499824684902074> (accessed May 29, 2023).
- [7] Binance. "10 Reasons why you should trade on binance futures." BINANCE.com. <https://www.binance.com/en/blog/futures/10-reasons-why-you-should-trade-on-binance-futures-421499824684903288> (accessed May 29, 2023).
- [8] Y. Liu and A. Tsyvinski, "Risks and returns of cryptocurrency," *Rev. Financ. Stud.*, vol. 34, no. 6, pp. 2689–2727, Jun. 2021.
- [9] S. Brookson, *Mastering Financial Management: Demystify Finance and Transform Your Financial Skills of Management*. London, U.K.: Thorogood, 1998.
- [10] K. Qin, L. Zhou, P. Gamito, P. Jovanovic, and A. Gervais, "An empirical study of DeFi liquidations: Incentives, risks, and instabilities," in *Proc. 21st ACM Internet Meas. Conf.*, New York, NY, USA, Nov. 2021, pp. 336–350.
- [11] CoinGlass. "Liquidation Data." COINGLASS.com. <https://www.coinglass.com/LiquidationData> (accessed Jul. 1, 2023).
- [12] P. Maguire, P. Moser, J. McDonnell, R. Kelly, S. Fuller, and R. Maguire, "A probabilistic risk-to-reward measure for evaluating the performance of financial securities," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Intell. Financial Eng. and Economics*, Singapore, Singapore, Apr. 2013, pp. 102–109.
- [13] P. Jaquart, S. Kopke, and C. Weinhardt, "Machine learning for cryptocurrency market prediction and trading," *J. Finance Data Sci.*, vol. 8, no. 12, pp. 331–352, 2022.
- [14] G. Bontempi, S. B. Taieb, and Y. A. Le-Borgne, "Machine Learning Strategies for Time Series Forecasting," in *Business Intelligence: Second European Summer School*, M. A., Aufaure, and E. Zimányi, Eds., Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

- [15] T. Rossolimos. *How to guide : trading chart platform*. (2020). Accessed: Jun. 8, 2023. [Online]. Available: <https://timonandmati.com/wp-content/uploads/2022/03/QuickTradeGuideMetaTrader5ByTimonAndMATITrader-1.pdf>
- [16] Y. Zhai, A. Hsu, and S. Halgamuge, "Combining news and technical indicators in daily stock price trends prediction," in *Proc. 4th Int. Symp. Neural Netw.*, Nanjing, China, 2007, pp. 1087–1096.
- [17] TradingView. *Pine Script Repainting*, 5 ed. (2020) Accessed: Jun. 8, 2023. [Online]. Available: <https://www.tradingview.com/pine-script-docs/en/v5/concepts/Repainting.html>
- [18] Y. Shynkevich, T. M. McGinnity, S. Coleman, Y. Li, and A. Belatreche, "Forecasting stock price directional movements using technical indicators: Investigating window size effects on one-step-ahead forecasting," in *Proc. 2014 IEEE Conf. Comput. Intell. Financial Eng. and Economics*, London, U.K., Mar. 2014, pp. 341–348.
- [19] M. H. Pee, "Trend detection index," *Tech. Anal. Stocks Commodities*, vol. 19, no. 11, pp. 54–61, Oct. 2001.
- [20] T. T. L. Chong and W. K. Ng, "Technical analysis and the London stock exchange: Testing the MACD and RSI rules using the FT30," *Appl. Economics Lett.*, vol. 15, no. 14, pp. 1111–1114, 2008.
- [21] A. Aydin and S. Yüksel, "An algorithmic trading application in crypto exchange," *Int. Academic Social Resour. J.*, vol. 6, no. 29, pp. 1269–1273, 2021.
- [22] J. Sharmila Vaiz and M. Ramaswami, "Forecasting stock trend using technical indicators with R," *Int. J. Comput. Intell. Inform.*, vol. 6, no. 3, pp. 206–219, 2016.
- [23] S. Mishra and J. Raut, "Optimizing performance of algorithmic trading using Heikin-Ashi and awesome oscillator techniques," *Int. Adv. Res. J. Sci., Eng. Technol.*, vol. 10, no. 5, pp. 831–835, 2023.
- [24] W. S. Hassn and A. T. Mohammed, "Managing trading decisions using the true strength index –An applied study," *Int. J. Res. Social Sci. Humanities*, vol. 12, no. 1, pp. 168–186, 2022.
- [25] L. C. M. Phuong, "Investor sentiment by money flow index and stock return," *Int. J. Financial Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 33–42, 2021.
- [26] P. Gao, R. Zhang, and X. Yang, "The application of stock index price prediction with neural network," *Math. Comput. Appl.*, vol. 25, no. 3, p. 53, 2020.
- [27] H. Pabuccu, S. Ongan, and A. Ongan, "Forecasting the movements of Bitcoin prices: An application of machine learning algorithms," *Quantitative Finance Economics*, vol. 4, no. 4, pp. 679–692, 2020.
- [28] G. Jangkobpattana, "The profitability of bitcoin (BTC) trading strategies using technical indicator (ADX+DMI) compare with buy and hold strategy," (in Thai), M.S. thesis, College Manage., Mahidol Univ., 2022.
- [29] D. S. S. Sahid and F. Zulkarnain, "Expert advisor in foreign exchange using triple moving average crossover method," *Int. J. Res. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 61–66, 2022.
- [30] P. Ładyzynski, K. Zbikowski, and P. Grzegorzewski, "Stock trading with random forests, trend detection tests and force index volume indicators," in *Proc. Int. Conf. Artif. Intell. Soft Comput.*, Zakopane, Poland, Jun. 2013, pp. 441–452.
- [31] J. Chutka and F. Rebetak, "Analysis of trading volume and its use in prediction future price movements in the process of maximizing trading earnings," in *Proc. 20th Int. Sci. Conf. Globalization and its Socio-Economic Consequences*, Zilina, Slovakia, 2020, pp 1–7.
- [32] TradingView. *Pine Script Introduction*, 5 ed. (2020) Accessed: Jun. 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.tradingview.com/pine-script-docs/en/v5/Introduction.html>
- [33] J. Melunsky. "How to automate any trading scenario using TradingView alerts and Capitalise.ai." CAPITALISE.ai. <https://capitalise.ai/how-to-automate-any-trading-scenario-using-tradingview-alerts-and-capitalise-ai/>_(accessed Jun. 29, 2023).
- [34] *Trade via API*. (2022). Finandy. Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: <https://docs.finandy.com/exchange/binance/free>
- [35] Binance. "Application Programming Interface (API)." ACADEMY.BINANCE.com. <https://academy.binance.com/en/glossary/application-programming-interface> (accessed Jun. 29, 2023).
- [36] A. K. Das *et al.*, "A deep network-based trade and trend analysis system to observe entry and exit points in the Forex market," *Mathematics*, vol. 10, no. 19, p. 3632, 2022, doi: 10.3390/math10193632.

- [37] L. Liu and Z. Pan, "Forecasting stock market volatility: The role of technical variables," *Econ. Modelling*, vol. 84, pp. 55–65, 2020. doi: 10.1016/j.econmod.2019.03.007.
- [38] A. Sather. "What is the Value Trap Indicator? Formula Explained." EINVESTINGFORBEGINNERS.com. <https://investingforbeginners.com/about-us/value-trap-indicator/> (accessed Jul. 15, 2023).
- [39] W. Nayam and Y. Limpiyakorn, "XGBoost for classifying Ethereum short-term return based on technical factor," in *Proc. 9th Int. Conf. Comput. Technol. Appl.*, Vienna, Australia, May 2023, pp. 30–36.
- [40] K. Tretina and P. McGimpsey, "Top 10 cryptocurrencies of August 2023." FORBES.com. <https://www.forbes.com/advisor/au/investing/cryptocurrency/top-10-cryptocurrencies/> (accessed Jul 9, 2023)
- [41] J. B. Nauzer, "Appreciating the risk of ruin," *Tech. Anal. Stock Commodities*, vol. 10, no. 12, pp. 525–528, 1992.
- [42] Bybit. "How to use the risk/reward (RR) ratio for crypto trading." LEARN.BYBIT.com. <https://learn.bybit.com/indicators/how-to-use-risk-reward-ratio-for-crypto-trading> (accessed Jun. 5, 2023)
- [43] Finandy. *TradingView Signals*, Accessed: Jul. 2, 2023. [Online]. Available: <https://docs.finandy.com/algo-trading/signals>
- [44] Finandy. *Binance (via API-key)*, Accessed: Jul. 2, 2023. [Online]. Available: <https://docs.finandy.com/exchange/binance>.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น บทความที่น่าสนใจจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามรูปแบบที่กำหนด และพร้อมที่จะนำไปตีพิมพ์ได้ทันที การเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร มีรายละเอียดดังนี้

1. หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์

1.1 เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ หรือไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือรายงานการสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการใดมาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ หากตรวจสอบพบว่ามีการตีพิมพ์ซ้ำซ้อน ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.2 เป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ มีความสมบูรณ์ของเนื้อหา และมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ

1.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะต้องผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewer) อย่างน้อย 2 ท่าน ต่อบทความ ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิอาจให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือปรับปรุงบทความให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.4 กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ตามที่เห็นสมควร

1.5 บทความ ข้อความ ภาพประกอบ และตารางประกอบ ที่ตีพิมพ์ลงวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่ส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.6 ต้องเป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ลอกเลียน หรือคัดลอกข้อความของผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

1.7 หากเป็นงานแปลหรือเรียบเรียงจากภาษาต่างประเทศ ต้องมีหลักฐานการอนุญาตให้ตีพิมพ์เป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์

1.8 ต้องมีการอ้างอิงที่ถูกต้อง เหมาะสมก่อนการตีพิมพ์ ซึ่งเป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน

1.9 บทความที่ส่งถึงกองบรรณาธิการ ขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่ส่งคืนผู้เขียน

2. รูปแบบการกลั่นกรองบทความก่อนลงตีพิมพ์ (Peer-review)

ในการประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิเป็นการประเมินแบบ Double-blind peer review คือ ผู้ทรงคุณวุฒิไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้เขียนบทความ และผู้เขียนบทความไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้ทรงคุณวุฒิ

3. ประเภทของบทความที่รับพิจารณาลงตีพิมพ์

นิพนธ์ต้นฉบับต้องเป็นบทความวิจัย ประกอบด้วย บทคัดย่อ บทนำ วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัยและอภิปรายผล สรุปผล และเอกสารอ้างอิง*

หมายเหตุ : บทความภาษาไทยต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้หน้าบทคัดย่อภาษาไทยอยู่ก่อนหน้าบทคัดย่อภาษาอังกฤษ สำหรับบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

* เอกสารอ้างอิง เป็นการบอกรายการแหล่งอ้างอิงที่มีการอ้างอิงในเนื้อหาของงานเขียน

4. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ได้คำนึงถึงจริยธรรมในการตีพิมพ์บทความ โดยจริยธรรมและบทบาทหน้าที่ของผู้เกี่ยวข้อง มีดังนี้

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผู้เขียนต้องเขียนบทความให้เป็นไปตามรูปแบบที่วารสารกำหนดไว้ในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน
2. หากมีการนำข้อมูลของผู้อื่นหรือข้อมูลของผู้เขียนที่เคยตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่นมาใช้ ผู้เขียนต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลนั้น โดยไม่ทำให้ผู้อื่นเข้าใจผิดว่าข้อมูลนั้นเป็นผลงานใหม่ของผู้เขียน
3. ผู้เขียนต้องไม่ดัดแปลงหรือบิดเบือนข้อมูล
4. ผู้เขียนต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัย (ถ้ามี)
5. ผู้เขียนต้องเปิดเผยข้อมูลเกี่ยวกับผลประโยชน์ทับซ้อนอย่างชัดเจน (ถ้ามี)

จริยธรรมและหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการต้องดำเนินการเผยแพร่วารสารให้ตรงตามเวลา
2. บรรณาธิการต้องคัดเลือกบทความ โดยพิจารณาจากคุณภาพและความสอดคล้องของเนื้อหาบทความกับขอบเขตของวารสาร
3. บรรณาธิการต้องดำเนินการประเมินบทความอย่างเป็นธรรม ไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความโดยใช้อคติ
4. บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้เขียนบทความ และผู้ประเมินบทความแก่บุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้อง
5. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน และผู้ประเมินบทความ
6. บรรณาธิการต้องใช้โปรแกรมในการตรวจสอบการคัดลอกผลงาน เพื่อป้องกันการตีพิมพ์ผลงานซึ่งคัดลอกมาจากผลงานผู้อื่น หากพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่น บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการพิจารณาบทความทันที และติดต่อผู้เขียนเพื่อขอคำชี้แจง

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ

1. ผู้ประเมินบทความ ควรพิจารณาตอบรับการประเมินเฉพาะบทความที่สอดคล้องกับความเชี่ยวชาญของตนเองเท่านั้น เพื่อให้บทความที่ตีพิมพ์มีคุณภาพ
2. ผู้ประเมินบทความควรประเมินบทความให้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อไม่ให้บทความที่ผ่านการพิจารณาตีพิมพ์ล่าช้า
3. ผู้ประเมินควรประเมินบทความโดยให้ข้อเสนอแนะตามหลักวิชาการเท่านั้น ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีเหตุผลหรือไม่มีข้อมูลรองรับ
4. ผู้ประเมินควรปฏิเสธการประเมินบทความ หากเห็นว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน
5. ผู้ประเมินต้องไม่เปิดเผยเนื้อหาภายในบทความให้ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องทราบ
6. หากผู้ประเมินเห็นว่ามีความเห็นอื่นที่ผู้เขียนไม่ได้กล่าวอ้างถึง แต่เป็นบทความที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับบทความ ผู้ประเมินควรแจ้งให้ผู้เขียนกล่าวอ้างถึงบทความนั้น

5. ข้อกำหนดการจัดพิมพ์ต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนต้องจัดพิมพ์บทความตามข้อกำหนดเพื่อให้มีรูปแบบการตีพิมพ์เป็นมาตรฐานแบบเดียวกัน ดังนี้

5.1 ขนาดของกระดาษ ให้ใช้ขนาด A4

5.2 กรอบของข้อความ ระยะห่างของขอบกระดาษ

ด้านบน 2.5 ซม. (0.98")

ด้านล่าง 2 ซม. (0.79")

ด้านซ้าย 2 ซม. (0.79")

ด้านขวา 2 ซม. (0.79")

5.3 ระยะห่างระหว่างบรรทัด หนึ่งช่วงบรรทัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Single)

5.4 ตัวอักษร รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ TH Sarabun New

5.5 รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความ กำหนดดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ขนาด 22 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง

ชื่อผู้เขียน (Author) ขนาด 16 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง ไม่ต้องใส่คำนำหน้า

สังกัด (Affiliation) ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดกึ่งกลาง

E-mail ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding Author) ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

บทคัดย่อ (Abstract) จัดรูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 1 คอลัมน์ ชื่อหัวข้อ ขนาด 14 **ตัวหนาและเอน** กำหนดกึ่งกลาง ข้อความในบทคัดย่อ ขนาด 14 ตัวธรรมดา

คำสำคัญ (Keywords) ให้ใส่คำสำคัญ 3–5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ใต้บทคัดย่อ เว้น 1 บรรทัดด้วยขนาด 12 คำสำคัญขนาด 14 **ตัวหนาและเอน** กำหนดชิดซ้าย ข้อความในคำสำคัญ ขนาด 14 ตัวธรรมดา

รูปแบบการพิมพ์เนื้อหาของบทความ

- รูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ กว้าง 8.2 ซม. (3.23") ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.61 ซม. (0.24")
- หัวข้อหลัก ประกอบด้วย บทนำ (INTRODUCTION) วัตถุประสงค์ของการวิจัย (OBJECTIVES) วิธีดำเนินการวิจัย (METHODS) ผลการวิจัยและอภิปรายผล (RESULTS AND DISCUSSION) สรุปผล (CONCLUSIONS) เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ขนาด 14 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และมีเลขกำกับ เช่น 1) บทนำ หรือ I. INTRODUCTION เป็นต้น
- หัวข้อรอง ระดับที่ 1 ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดชิดซ้าย เมื่อขึ้นหัวข้อระดับเดียวกันหรือมากกว่าในลำดับถัดไป ให้เคาะเว้น 1 บรรทัดหลังจบเนื้อหา
- หัวข้อรอง ระดับที่ 2 ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดชิดซ้ายและเลื่อนเข้ามา 0.5 ซม.
- เนื้อเรื่อง ขนาด 14 ตัวธรรมดา
- ชื่อตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อเหนือตาราง
- หัวข้อในตาราง ขนาด 12 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง เนื้อหาในตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา
- ชื่อภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อใต้ภาพ
- เนื้อหาในภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

5.6 เอกสารอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหาบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข ตามมาตรฐานสากล โดยใช้หมายเลขในเครื่องหมายก้ามปู [] และเรียงลำดับการอ้างอิงตามเนื้อหา โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1], [3]–[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม ตัวอย่างเช่น by Brown [4], [5]; as mentioned earlier [2], [4]–[7], [9]; Smith [4] and Brown and Jones [5]; Wood *et al.* [7]
2. รูปแบบของชื่อหัวข้อใช้รูปแบบตัวอักษร TH Sarabun New ขนาด 14 ตัวธรรมดา ในเนื้อหาขนาด 12 ตัวธรรมดา
3. การอ้างอิงท้ายบทความ จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง และใช้การอ้างอิงตามรูปแบบการอ้างอิง IEEE V 11.12.2018 ซึ่งผู้เขียนสามารถศึกษาวิธีการเขียนเอกสารอ้างอิงตามรูปแบบที่กำหนดได้ที่เว็บไซต์ <https://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf> โดยจะต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความอ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง
4. กรณีที่เอกสารที่นำมาอ้างอิงเขียนเป็นภาษาไทยให้เติมคำว่า “(in Thai)” เข้าไปในเอกสารอ้างอิง ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างรูปแบบการเขียนและการแปลเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ

ตัวอย่างที่ 1 การอ้างอิงจากหนังสือ(Books)

Basic Format:

- [Number] J. K. Author, *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year.
- [Number] J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

Examples:

- [1] V. Rijiravanich, *Work Study: Principles and Case Studies*, 4th ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2005.
วันชัย ริจิรวณิช, *การศึกษาการทำงาน: หลักการและกรณีศึกษา*, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [2] L. Edelstein-Keshet, *Mathematical Models in Biology*. New York, NY, USA: Random House, 1998.
- [3] K. J. Roodbergen, “Storage assignment for order picking in multiple-block warehouses,” in *Warehousing in the Global Supply Chain: Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems*. London, U.K.: Springer, 2012, pp. 139–155.

ตัวอย่างที่ 2 การอ้างอิงจากวารสาร (Periodicals)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year.

[Number] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year, doi: xxx.

Examples:

[4] N. Dechampai and K. Sethanan, "An application of lean manufacturing system in the textile of lean manufacturing system in the textile and garment industry case study: Wacoal Kabinburi Co., Ltd," (in Thai), *MBA-KKU J.*, vol. 7, no. 2, pp. 13-27, 2014.

นิวัฒน์ เดชอำไพ และกาญจนา เศรษฐนันท์, "การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตชุดชั้นในสตรีโดยประยุกต์ใช้แนวคิดการผลิตแบบลีน," *วารสารวิทยาลัยบัณฑิตศึกษากิจการมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 13-27, 2557.

[5] S.-F. Wang, H.-P. Chen, Y. Ku, and M.-X. Zhong, "Voltage-mode multifunction biquad filter and its application as fully-uncoupled quadrature oscillator based on current-feedback operational amplifiers," *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6681, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20226681.

[6] M. Dwiyaniti *et al.*, "Extremely high surface area of activated carbon originated from sugarcane bagasse," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 909, no. 1, 2020, pp. 1-8.

[7] M. Yoshiki, Y. Fujita, A. Kawamura, and H. Arai, "Instability of plates with holes (1st report)," (in Japanese), *J. Zosen Kiokai*, vol. 1967, no. 122, pp. 137-145, 1967.

[8] F. de Oliveira Santini, "Clockwise versus counterclockwise turning bias: Moderation effects of foot traffic and cognitive experience on visual attention," *J. Retail. Consum. Serv.*, vol. 67, 2022, Art. no. 102965.

ตัวอย่างที่ 3 การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis / Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State (only U.S.), year.

Examples:

[9] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

[10] Y. Sornsa and P. Wanrerak, "Buckling of rectangular plates with a central square hole," (in Thai), B.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2007.

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

ตัวอย่างที่ 4 การอ้างอิงจากการประชุมทางวิชาการ (Conferences and Conference Proceedings)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Title of paper," in *Abbrev. Name of Conf.*, City, State (only U.S.), Country, Month year, pp. xxx–xxx.

Examples:

- [11] N. Kriengkarakot, P. Kriengkarakot, S. Duan, P. Thung, and W. Piromsuk, "Repair work reduction in sewing process of the apparel factory," (in Thai), in *Proc. 10th Ubon Ratchathani Univ. Nat. Res. Conf.*, Ubon Ratchathani, Thailand, Jul. 2016, pp. 87–96.

นุชสรา เกรียงกรกฎ, ปรีชา เกรียงกรกฎ, สกาวเดือน พรหมทุ่ง และวิจิตรา ภิรมย์สุข, "งานวิจัยการลดชิ้นส่วนงานซ่อมในขั้นตอนการเย็บของโรงงานผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป," *การประชุมวิชาการระดับชาติ มอว. วิจัยครั้งที่ 10*, อุบลราชธานี, ประเทศไทย, 7-8 กรกฎาคม, 2559, หน้า 87–96.

- [12] J. Lingad, S. Karimi, and J. Yin, "Location extraction from disaster-related microblogs," in *Proc. 22nd Int. Conf. World Wide Web*, Rio de Janeiro, Brazil, May 2013, pp. 1017–1020.

ตัวอย่างที่ 5 การอ้างอิงเว็บไซต์

- [13] B. Suttamanatwong. "Minimum Wage Rate 2022." (in Thai), MOL.go.th. <https://www.mol.go.th/อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ> (accessed Dec. 31, 2022).

- [14] Greenpeace Thailand. "The different air quality measurement standards." (in Thai), GREENPEACE.org. <https://www.greenpeace.org/thailandexplore/protect/cleanair/air-standard/> (accessed Nov. 23, 2022).

6. วิธีการจัดส่งบทความ

ผู้เขียนส่งบทความออนไลน์ได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal>

ทุกบทความที่ส่งเข้ามาจะมีการตรวจพิจารณาเบื้องต้นโดยกองบรรณาธิการก่อน เมื่อบทความผ่านการพิจารณาเบื้องต้นผู้เขียนจึงจะสามารถชำระเงินได้ หลังจากที่คุณชำระเงินเรียบร้อยแล้ว ทางกองบรรณาธิการจะดำเนินการส่งบทความเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความและแจ้งผลการพิจารณาให้ผู้เขียนบทความทราบ สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแล้วจะได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

“สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร”

คณะวิศวกรรมศาสตร์

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ (Automotive Engineering, B.Eng. : AE)
- หลักสูตรวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบลีน (Robotics and Lean Automation Engineering, B.Eng. : RE)
- หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ (Computer Engineering and Artificial Intelligence, B.Eng. : CE)
- หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Engineering, B.Eng. : IE)
- หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering, B.Eng. : EE)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม (Engineering Technology, M.Eng. : MET)

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, B.Sc. : IT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีมัลติมีเดีย (Multimedia Technology, B.Sc. : MT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศทางธุรกิจ (Business Information Technology, B.Sc. : BI)
- หลักสูตรเทคโนโลยีดิจิทัลทางสื่อสารมวลชน (Digital Technology in Mass Communication, B.Sc. : DC)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, M.Sc. : MIT)

คณะบริหารธุรกิจ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม (Management of Technology and Innovation, B.B.A. : MI)
- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, B.B.A. : BJ)
- หลักสูตรการจัดการธุรกิจระหว่างประเทศ (International Business Management, B.B.A. : IB)
- หลักสูตรการบัญชี (Accountancy, B.Acc. : AC)
- หลักสูตรการจัดการทรัพยากรมนุษย์แบบญี่ปุ่น (Japanese Human Resources Management, B.B.A. : HR)
- หลักสูตรการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน (Logistics and Supply Chain Management, B.B.A. : LM)
- หลักสูตรการตลาดดิจิทัล (Digital Marketing, B.B.A. : DM)
- หลักสูตรการจัดการการท่องเที่ยวและการบริการเชิงนวัตกรรม (Innovative Tourism and Hospitality Management, B.B.A. : TH)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, M.B.A. : MBJ)
- หลักสูตรนวัตกรรมจัดการธุรกิจและอุตสาหกรรม (Innovation of Business and Industrial Management, M.B.A. : MBI)
 - กลุ่มวิชา การวางแผนกลยุทธ์สำหรับผู้ประกอบการ (Strategic Planning and Management Entrepreneur : SME)
 - กลุ่มวิชา การจัดการระบบการผลิต และโลจิสติกส์แบบลีน (Lean Manufacturing System and Logistics Management : LMS)

Thai-Nichi International College (TNIC)

Bachelor's Degree Programs

- Digital Engineering (DGE)
- Data Science and Analytics (DSA)
- Global Business Management (GBM)
- Japanese for International Business (JIB)

Thai-Nichi Institute of Technology

1771/1 Pattanakarn Road, Suanluang, Bangkok 10250, Thailand

Tel: 0-2763-2600 Fax: 0-2763-2700

Website: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal> E-mail : JEDT@tni.ac.th