

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

Thai-Nichi Institute of Technology

Vol.11 No.1

January - June 2023



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2566

ISSN 2774-0617 (Online)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2566 Vol. 11 No. 1 January - June 2023

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 เทคโนโลยีวัสดุศาสตร์ 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 อีระมันคง | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 4. ศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ ชาญนันท | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 5. ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 6. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 7. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรเดช เสี่ยงศักดิ์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ | สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อัครเสน | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |

คณะกรรมการดำเนินงาน

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ | 8. นางสาวจุฑามาศ ประสพสันต์ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รชตะ รุ่งตระกูลชัย | 9. นางสาวสุพิศ บายคายคม |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ | 10. นางสาวจรรย์ นารินนท |
| 4. ดร.ประมุข บุญเสียง | 11. นายอศิรา พรหมสุทธิ |
| 5. ดร.ศรายุทธ นนท์ศิริ | 12. นางสาวพิมพ์รต พิพัฒน์กุล |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมราวดี ทัพพน | 13. นางสาวอาริสสา จิระเวชถาวร |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณณทัต จอมจักร์ | |

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

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

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

E-mail : JEDT@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน

กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

บทบรรณาธิการ

การดำเนินการของวารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT) ได้เข้าสู่ปีที่ 11 แล้ว ทางกองบรรณาธิการมีความยินดีอย่างยิ่งที่วารสารได้รับความสนใจและการยอมรับจากนักวิจัย อาจารย์ และนักศึกษา ส่งผลงานมารับการพิจารณาจำนวนมากอย่างต่อเนื่อง ด้วยระบบการประเมินบทความที่ได้มาตรฐานสากลจากผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะทาง ทำให้บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร JEDT เป็นที่ยอมรับทั้งด้านคุณภาพและด้านเนื้อหาของการวิจัย

นโยบายของวารสารยังคงเดิมที่รับบทความที่เป็นทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ภายใต้การรับรองของ TCI (Thai-Journal Citation Index Centre) จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยนานาชาติมากขึ้นเป็นลำดับ นอกจากนั้นผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้ เป็นที่ยอมรับของสถาบันการศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่สามารถนำไปใช้ประกอบการสำเร็จการศึกษา หรือ ใช้ในการขอตำแหน่งทางวิชาการได้

ทางกองบรรณาธิการหวังว่า บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่าน ในการอ้างอิงเพื่อการวิจัยและพัฒนาต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์
บรรณาธิการ

Editorial Message

The Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT) has entered its eleventh year. I am very pleased that the journal has attracted attention and recognition from many researchers, professors and students who have continued to submit their articles for consideration. All submitted articles are reviewed and evaluated by qualified experts to meet national and international standards so that articles published in the JEDT are recognized both in terms of quality and content of the research.

The policy of the journal remains the same for accepting articles in both Thai and English languages under the accreditation of TCI (Thai-Journal Citation Index Centre). Therefore, JEDT is also received increasing attention from international researchers. Moreover, the accepted articles that be published in this journal can be used for graduation and/or can be used to apply for academic position.

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 Algorithm for Solving the Detour Hinge Vertex Problem on Circular-arc Graphs
Yoko Nakajima, Shoma Nameki, Tomonari Izumi, Hirotoshi Honma
- 8 Alzheimer's Disease Classification from MRI Using Deep Learning
Thongchai Photosathian, Thitiporn Suttikul, Worapong Tangsritat
- 16 Application of Binary Whale Optimization Algorithm for Solving Imbalanced Data Problems
Jakkrit Polrob, Benjawan Rodjanadid, Jessada Tanthanuch, Eckart Schulz
- 30 Development of Cyber Threat Model in the Royal Thai Air Force Using Machine Learning
Sappanyou Chukaew, Prasong Praneetpolgrang, Payap Sirinam
- 43 Development of Mask Classification and Wearing Detection Program with Image Processing Technology
Worawit Fankam-ai, Suphachai Wongnaphawiset, Sahawut Kitiya, Nongnuch Ketui
- 54 Plant Layout and Design of Fabrication Laboratory Using Systematic Layout Planning and Process Layout
Krit Chantarasamai, On-Uma Lasunon, Wiroj Tassana
- 69 Prioritizing Overcoming Organizational Barriers to Implementing Electronic Document Management Systems: Case Study of an Autonomous University
Maliwan Phuttara
- 88 Sensitivity Analysis of Suspension Parameters of the Critical Velocity of a Railway Bogie on a Tangent Track Using Standardized Regression Coefficients
Thanaporn Talingthaisong, Sedthawatt Sucharitpwatskul, Anchalee Manonukul, Panya Kansuwan

- 99 Sizing of PV/T Module and Its Cool Water Tank for PV/T-boosted Heat Pump Water Heating:
A Case Study of Thailand

Korakote Utama, Nat Vorayos, Tanongkiat Kiatsiriroat, Thoranis Deethayat

- 112 Study of the Coating Thicknesses Effect to the Length of the Indication via Magnetic Particle
Testing

Parvinee Angboonta, Paisan Thongson, Prajak Angboonta

Algorithm for Solving the Detour Hinge Vertex Problem on Circular-arc Graphs

Yoko Nakajima¹ Shoma Nameki² Tomonari Izumi³ Hirotoshi Honma^{4*}

^{1,2,3,4*}Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Kushiro College, Japan

²Department of Electronics and Information Engineering, Hokkaido University, Japan

*Corresponding Author. E-mail address: honma@kushiro-ct.ac.jp

Received: 2 February 2023; Revised: 23 March 2023; Accepted: 28 April 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

Consider a simple undirected graph $G = (V, E)$ with vertex set V and edge set E . Let $G - u$ be a subgraph induced by the vertex set $V - u$. The distance $d_G(x, y)$ is defined as the length of the shortest path between vertices x and y in G . The vertex $u \in V$ is a hinge vertex if there are two vertices $x, y \in V - u$ such that $d_{G-u}(x, y) > d_G(x, y)$. Let U be a set consisting of all hinge vertices of G . The neighborhood of u , denoted by $N(u)$, is the set of all vertices adjacent to u . We define the detour degree of u as $\det(u) = \max\{d_{G-u}(x, y) - 2 \mid d_{G-u}(x, y) > d_G(x, y), x, y \in N(u)\}$ for $u \in U$. The detour hinge vertex problem aims to determine the hinge vertex u that maximizes $\det(u)$ in G . In this study, we proposed an efficient algorithm for solving the detour hinge vertex problem on circular-arc graphs that runs in $O(n^2)$ time, where n is the number of vertices in the graph.

Keywords: Circular-arc graphs, Design and analysis of algorithms, Detour hinge vertex problem, Intersection graphs

I. INTRODUCTION

Consider a simple undirected graph $G = (V, E)$ with vertex set V and edge set E . In this study, n is the number of vertices in the graph. Let $G - u$ be a subgraph induced by the vertex set $V - u$. The distance $d_G(x, y)$ is defined as the length (that is, the number of edges) of the shortest path between vertices x and y in G . Chang et al. [1] defined $u \in V$ as a *hinge vertex* if there are two vertices $x, y \in V - u$ such that $d_{G-u}(x, y) > d_G(x, y)$.

Finding all hinge vertices of a given graph is called *the hinge vertex problem*. This problem has applications regarding the improvement of the stability and robustness of communication network systems [2]. If a terminal in a network corresponding to a hinge vertex stalls, the number of hops between a pair of terminals will increase, resulting in the decreasing efficiency of the communication across the network. The set of hinge vertices in a graph can be used to identify critical nodes, which can be useful in constructing communication network systems with high stability.

Let U be a set consisting of all hinge vertices of G . The *neighborhood* of u , denoted by $N(u)$, is the set of all vertices adjacent to u . Honma et al. [3] defined the *detour degree* of u as $\det(u) = \max\{d_{G-u}(x, y) - 2 \mid d_{G-u}(x, y) > d_G(x, y), x, y \in N(u)\}$ for $u \in U$. That is, $\det(u)$ indicates the degree to which a path between x and y becomes longer upon removal of a hinge vertex u from G . The *detour hinge vertex problem* aims to determine the hinge vertex u that maximizes $\det(u)$ in G . Solving this problem can promote practical applications such as network stabilization at a limited cost [2].

An *articulation vertex* is a special case of a hinge vertex; its removal changes the finite distance between any pair of non-adjacent vertices x, y to infinity. Every articulation vertex has a maximum detour degree. In

this study, we assume that a *circular-arc graph* does not include any articulation vertices, that is, the graph is biconnected.

Despite the existence of polynomial-time algorithms for these problems, there are many problems that are very computationally intensive for large graphs. So far, we have restricted graphs to a class of intersection graphs, and have researched and developed optimal or efficient algorithms for them.

In this study, we proposed an efficient algorithm for solving the detour hinge vertex problem on circular-arc graphs. Circular-arc graphs are used to model problems in periodic resource allocation found in the field of operations research. They have applications in various fields such as genetic research, traffic control, computer compiler design, and statistics [4]. An $O(n + m)$ time algorithm has been used to recognize a circular-arc graph [5]; these graphs have also been extensively discussed in existing literature [6]. Circular-arc graphs belong to the superclass of interval graphs, and have a wider range of practical applications. This study attempts to arrange an algorithm applicable to circular-arc graphs without increasing the time complexity, based on the algorithm for the detour hinge vertex problem that has been developed for interval graphs. Therefore, this study is an interesting theme from the point of view of computational complexity theory in the field of graph theory, and is significant both in terms of practical applications and advances in computational theory.

The remainder of this paper is organized as follows. In Section 2, we discuss previous research related to hinge vertex problems on intersection graphs. Section 3 presents some definitions of circular-arc models and graphs and the notations used. Section 4 describes the lemmas useful for constructing the algorithm for solving the detour hinge vertex problem. Section 5 describes the steps and complexity of the proposed algorithm

used for solving this problem. Finally, Section 6 concludes the paper.

II. PREVIOUS WORKS

Lemma 1, proposed by Chang et al. [1], characterizes the hinge vertices of a simple graph G . Using Lemma 1, the problem of finding all hinge vertices in a simple graph can be solved in $O(n^3)$ time.

Lemma 1 ([1]): For a simple graph G , vertex u is a hinge vertex of G if and only if there exist two non-adjacent vertices x, y such that u is the only vertex adjacent to both x and y in G .

Several studies on hinge vertices have been conducted in recent years. Ho et al. [7] presented an $O(n)$ time algorithm to find all hinge vertices in *permutation graphs*; some minor errors in their approach have been corrected [8]. Hsu et al. [9] presented an $O(n)$ time algorithm for solving this problem on *interval graphs*. Honma and Masuyama [10] developed an $O(n)$ time algorithm for solving it on circular-arc graphs. The class of *trapezoid graphs* contains both interval and permutation graphs. Bera et al. [11] developed an $O(n \log n)$ time algorithm for solving the problem on such graphs. Recently, Honma and Nakajima [12] presented an $O(n^2)$ algorithm for solving it in circular trapezoid graphs, a superclass of trapezoid graphs.

For the detour hinge vertex problem, Honma and Nakajima presented an $O(n^2)$ time algorithm for solving it in interval graphs [3] and permutation graphs [13]. Recently, they also constructed an $O(n^2)$ time algorithm for solving the problem of finding the maximum influential hinge vertices in interval graphs [14].

III. DEFINITIONS

Here, we introduced the terms and notations used in the paper.

A. Circular-arc Model and Graph

First, we shall define the *circular-arc model* before defining the circular-arc graph. Consider a unit circle C and a family A of n arcs $A_1, A_2, \dots, A_n$ along the circumference of C . Each arc A_i has two endpoints, namely the *left endpoint* a_i and *right endpoint* b_i , and $A_i = [a_i, b_i]$. The left endpoint a_i (resp., right endpoint b_i) is the last point of A_i that is encountered when walking counterclockwise along A_i (resp., clockwise). Without loss of generality, the coordinates of all the left and right endpoints are distinct and are assigned clockwise positions with consecutive integer values $1, 2, \dots, 2n$. The arc numbers i, j are assigned to each arc in the increasing order of the right endpoints b_i 's, i.e., $A_i < A_j$ if $b_i < b_j$. Note that an arc A_i with $a_i > b_i$ is called a *feedback arc*. All these geometric representations comprise the definition of a *circular-arc model*. Figure 1(a) illustrates a circular-arc model M , which consists of 12 arcs (A_1 and A_2 are feedback arcs). Table 1 lists the details of M .

This model is considered *proper* if any two arcs do not cover the entire circumference C . In this study, since we only considered proper circular-arc models and graphs, the word “proper” shall be omitted henceforth.

A graph $G = (V, E)$ is called a circular-arc graph if there exists a family of arcs $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ such that there is a one-to-one correspondence between vertex $i \in V$ and the arc $A_i \in A$ such that an edge $(i, j) \in E$ if and only if A_i intersects with A_j in M . Figure 1(b) illustrates the circular-arc graph G corresponding to M shown in Fig. 1(a). In this example, the hinge vertices of G are vertices v_1, v_2, v_5 , and v_{11} . The detour degree of each hinge vertex is $\text{det}(v_1) = \text{det}(v_2) = 2$, $\text{det}(v_{11}) = 1$, and $\text{det}(v_5) = 3$. If hinge vertex v_5 is removed from G , the distance between vertices v_3 and v_7 lengthens from 2 to 5. Thus, the

detour degree of vertex v_5 is $\mathbf{det}(v_5) = 3$; vertex v_5 is the maximum detour hinge vertex in G .

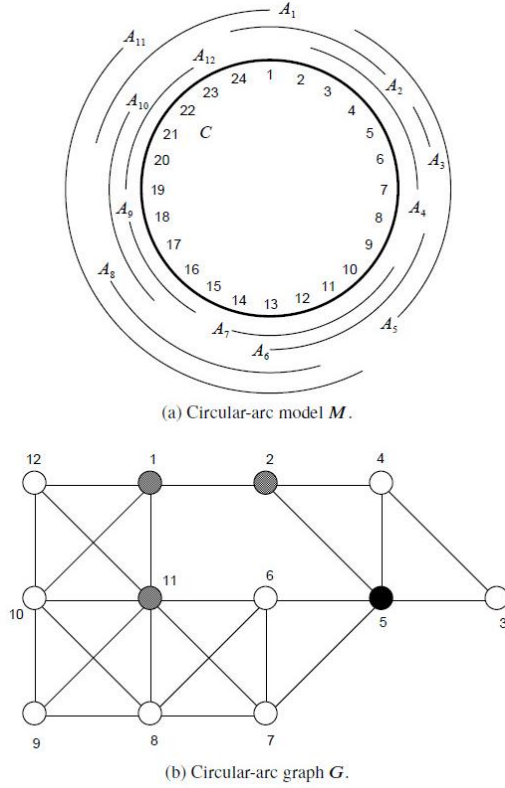


Figure 1: Circular-arc Model and Graph

Table 1: Details of Circular-arc Model M

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a_i	20	24	5	2	3	8	9	12	15	16	11	19
b_i	1	4	6	7	10	13	14	17	18	21	22	23

B. Extended Circular-arc Model

Next, we shall introduce an *extended circular-arc model (EM)* constructed from M . First, M is cut at points between 1 and $2n$. Then, it is unrolled onto the real horizontal line. Each arc $A_i = [a_i, b_i]$ in M is also

changed to interval I_i . Hereafter, for clarity, the arcs in M and EM are denoted as A_i and I_i , respectively. For each I_i , $1 \leq i \leq n$, copies I_{i+n} and I_{i-n} are created by shifting $2n$ to the right and left, respectively. This process can be executed in $O(n)$ time [10]. Figure 2 illustrates the EM constructed from M shown in Fig. 1. For simplicity, we use “arc,” “interval,” and “vertex” are used interchangeably if no confusion arises.

The neighborhood of vertex i is the set of all the vertices adjacent to i , and it is denoted by $N(i)$. Moreover, a neighbourhood in which i itself is included, called the *closed neighbourhood* and denoted by $N[i]$. For an interval I_i , $1 \leq i \leq n$, in EM , we define $l_a(i) = k$, where $a_k = \min\{a_j \mid j \in N[i]\}$ and $r_b(i) = k$, where $b_k = \max\{b_j \mid j \in N[i]\}$. Table 2 lists the details of EM illustrated in Fig. 2.

C. Shortest Circular Circuit

The *shortest circular circuit (SCC)* is a set of the smallest number of arcs covering the entire circumference C in M . In Fig. 1, the sample of SCC is $\langle A_1, A_2, A_5, A_7, A_{11}, A_1 \rangle$.

Let U be a set that consists of all hinge vertices of the circular-arc graph G . Set U is classified into U_1 and U_2 according to the following conditions: $U_1 = \{u \mid u \in SCC, u \in U\}$ and $U_2 = \{u \mid u \notin SCC, u \in U\}$. Regarding the example shown in Fig. 2, SCC is $\langle v_1, v_2, v_5, v_7, v_{11}, v_1 \rangle$ and a hinge vertex set $U = \{v_1, v_2, v_5, v_{11}\}$; $U_1 = \{v_1, v_2, v_5, v_{11}\}$; and $U_2 = \emptyset$.

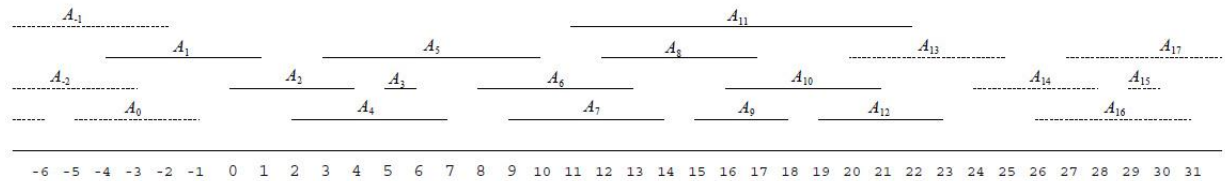


Figure 2: Extended Circular-arc Model EM

Table 2: Details of arrays $N(i)$, $l_q(i)$, and $r_b(i)$

i	...	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...
a_i	...	-4	0	5	2	3	8	9	12	15	16	11	19	...
b_i	...	1	4	6	7	10	13	14	17	18	21	22	23	...
$N(i)$	...	{2, 10, 11, 12}	{1, 4, 5}	{2, 3, 4, 6, 7}			{5, 6, 8, 11}			{1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12}				...
$l_a(i)$	...	-1	1	4	2	2	5	5	6	11	11	6	11	...
$r_b(i)$	...	2	5	5	5	7	11	11	11	11	13	13	13	...

IV. PROPERTIES OF HINGE VERTICES OF CIRCULAR-ARC GRAPH

We have described some lemmas that are useful for constructing the algorithm for solving the detour hinge vertex problem on a circular-arc graph G .

Lemma 2([10]): Let M be a circular-arc model and $G = (V, E)$ be a circular-arc graph with u, x, y ($x < y$) $\in V$ corresponding to M . Let EM be an extended circular-arc model constructed from M . A vertex u is a hinge vertex for x and y of G if and only if at least one of the following conditions holds in EM .

1. I_x does not intersect I_y , $I_{r_b(x)}$ does not intersect I_y , and I_u is the only interval intersecting both I_x and I_y .
2. I_y does not intersect I_{x+n} , $I_{r_b(y)}$ does not intersect I_{x+n} , and I_u is the only interval intersecting both I_y and I_{x+n} .

Lemma 2 was proposed by Honma et al. [10]. Using this lemma, all the hinge vertices in a circular-arc graph can be obtained in $\mathcal{O}(n)$ time.

Lemma 3: Let SCC be the shortest circular circuit of a circular-arc graph G . Then, any vertex in G is adjacent to at most three vertices in SCC .

(Proof) Consider the shortest circular circuit $SCC = \langle v_1, v_2, v_3, v_4, \dots, v_l, v_1 \rangle$ of length l .

Suppose that vertex v' , which is not included in SCC , is adjacent to four vertices v_1, v_2, v_3 , and v_4 in SCC . Here, there are cycles $\langle v', v_4, \dots, v_l, v_1, v' \rangle$ of length $l - 1$ (Fig. 3). This contradicts the assumption that SCC is the shortest circular cycle.

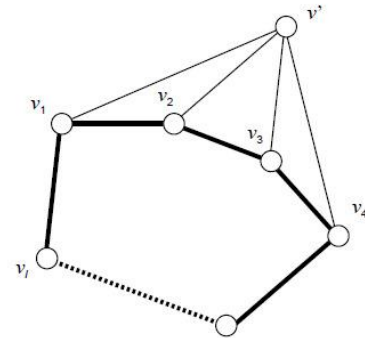


Figure 3: Illustration of Lemma 3.

Lemma 4: Let SCC be the shortest circular circuit of a circular-arc graph G . If vertex u is a hinge vertex of G , and it is not in SCC , then the detour degree of u is 1. In other word, $det(u) = 1$ for $u \notin U_2$.

(Proof) Since vertex u is a hinge vertex of G , according to Lemma 2, there exist intervals I_x , I_y , and I_u in EM such that I_x does not intersect I_y , and I_u is the only interval intersecting both I_x and I_y (Fig. 4). For simplicity, we assume that $x = l_a(u)$ and $y = r_b(u)$. Based on this assumption, since u is not in SCC , there is a need for two intervals v_1 and v_2 that intersect each other (v_1 covers x and u , v_2 covers y and u). In this case, the shortest path between v_x and v_y in a graph $G - u$ is $\langle v_x, v_1, v_2, v_y, v_x \rangle$. Then, $d_{G-u}(v_x, v_y) = 3$; $det(u) = 1$.

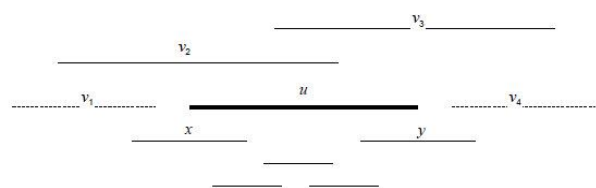


Figure 4: Illustration of Lemma 4

Hsu et al. [9] presented Lemma 5. By using this lemma, the shortest length between two vertices in a circular-arc graph G can be obtained in $O(n)$ time.

Lemma 5[9]: Let M be a circular-arc model and G be a circular-arc graph corresponding to M . Any shortest length query between two vertices in G can be answered in $O(1)$ time (it requires a preprocessing that runs in $O(n)$ time using $O(n)$ space data structure).

V. ALGORITHM AND ANALYSIS

In this section, we present the algorithm for solving the detour hinge vertex problem on a circular-arc graph; an outline of this algorithm is provided below.

First, we obtained a hinge vertex set U by applying the algorithm introduced by Honma et al. [10]. Next, we compute the shortest circular circuit SCC of G and construct $U_1 = \{u \mid u \in SCC, u \in U\}$ and $U_2 = \{u \mid u \notin SCC, u \in U\}$. From Lemma 4, $det(u) = 1$ for $u \notin U_2$. We obtained $det(u)$ for $u \in U_1$ by computing $d_{G-u}(x, y) - 2$ for all pairs $x, y \in N(u)$ adjacent to u . Finally, we obtained u as the maximum detour hinge vertex such that $det(u)$ has maximum value for $u \in U$.

Algorithm 1: MDHV algorithm

Input: Arcs $A_i = [a_i, b_i]$ of a circular-arc model M .

Output: Maximum detour hinge vertices of a circular-arc graph G .

(Step 1) /* Preparation */

- 1: Construct an EM from M ;
- 2: Find the hinge vertex set U of G by applying Honma's algorithm [10];
- 3: Find a shortest circular circuit (SCC) of G ;
- 4: Divide all hinge vertex set U to U_1 and U_2 ;

(Step 2) /* Obtain $det(u)$ for $u \in U_2$ */

for $u \in U_2$ **do**
 $det(u) := 1$;
end

(Step 3) /* Obtain $det(u)$ for $u \in U_1$ */

for $x, y \in N(u), u \in U_1$ **do**
 $det(u) := \max\{d_{G-u}(x, y) - 2\}$;
end

(Step 4) /* Obtain maximum detour hinge vertex */
The maximum detour hinge vertex is k such that
 $d(k) = \max\{d(u) \mid u \in U\}$;

We described the MDHV algorithm and the analysis of the complexity in each step. The inputs to the MDHV algorithm are the left and right endpoints of the

circular-arc model M ; the output is a vertex number with the maximum detour degree.

Step 1 is the preprocessing step. EM is constructed from input M , and all the hinge vertices of the circular-arc graph G are obtained using the algorithm proposed by Honma et al. [10]. Next, SCC of G is computed, and the hinge vertex sets U_1 and U_2 are constructed. All these processes can be executed in $O(n)$ time.

In Step 2, $det(u)$ is obtained for $u \in U_2$. From Lemma 4, $det(u) = 1$ for $u \in U_2$. This step can be completed in $O(n)$ time.

In Step 3, $\max\{d_{G-u}(x, y) \mid x, y \in N(u)\}$ is computed for $u \in U_1$ to obtain the detour degree $det(u)$. According to Lemma 3, any vertex in G is adjacent to at most three vertices in SCC . This implies that the sum of the degrees of $v_i \in SCC$ needs to be less than $3n$, i.e., $\sum_{i \in SCC} \rho(v_i) \leq 3n$, where $\rho(v)$ denotes the degree of vertex v . Therefore, $O(n^2)$ time is required to compute $\max\{d_{G-u}(x, y) \mid x, y \in N(u)\}$.

Step 4 can be run in $O(n)$ time. Based on these steps, we introduced the following theorem:

Theorem 1: Let G be a circular-arc graph corresponding to a circular-arc model M . The proposed algorithm solves the detour hinge vertex problem on G in $O(n^2)$ time when the input is a set of arcs of M where the arcs are sorted with respect to the right endpoints.

In the following, we discuss the efficiency and contribution of the MDHV algorithm developed in this study.

The MDHV algorithm first computes all hinge vertices of a given circular-arc graph. for a given circular-arc graph. This process can execute in $O(n^3)$ time using the properties of Lemma 1 in a naive way, but can complete in $O(n)$ time by applying our algorithm [10]. Next, we compute the detour degree for each hinge vertex extracted, which requires $O(n^3)$ time in the naive method.

We focused on shortest circular circuits included in circular-arc graphs and showed their useful features in Lemmas 2 and 3. The MDHV algorithm efficiently derives the detour degree of each hinge vertex in $O(n^2)$ time by applying Lemma 2 and 3, and the shortest path algorithm on the circular-arc graph [9].

VI. CONCLUSION

In this study, we proposed an MDHV algorithm for solving the detour hinge vertex problem on a circular-arc graph in $O(n^2)$ time. The algorithm uses the algorithm proposed by Honma et al. to find the hinge vertices and that proposed by Hsu et al. to determine the shortest path across a circular-arc graph. We have also developed an algorithm [3] that solves the same problem in $O(n^2)$ time for interval graphs, which are subclasses of circular-arc graphs. We showed that it can be realized for circular-arc graphs of a class larger than interval graphs without increasing the time complexity. For this reason, we think this study is also worthy. In future studies, we shall consider reducing the complexity of the algorithm and extending the results to other graphs.

ACKNOWLEDGEMENT

We express many thanks to anonymous referees for their valuable advices on the theory of our attacks and their helpful editorial comments. This work was partially supported by JSPS KAKENHI Grant Number 19K11834 and 20K11093, and Cooperative Education/Research Project between Toyohashi University of Technology and National Institute of Technology.

REFERENCES

- [1] J. M. Chang, C. C. Hsu, Y. L. Wang, and T. Y. Ho, "Finding the set of all hinge vertices for strongly chordal graphs in linear time," *Inf. Sci.*, vol. 99, no. 3-4, pp. 173-182, 1997.
- [2] H. Honma and S. Masuyama, "A parallel algorithm for finding all hinge vertices of an interval graph," *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, vol. E84-D, no. 3, pp. 419-423, 2001.
- [3] H. Honma, Y. Nakajima, Y. Igarashi, and S. Masuyama, "Algorithm for finding maximum detour hinge vertices of interval graphs," *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.*, vol. E97-A, no. 6, pp. 1365-1369, 2014.
- [4] M. Pal, "Intersection graphs: An introduction," *Annals Pure Appl. Math. (APAM)*, vol. 4, no. 1, pp. 43-91, 2013.
- [5] R. M. McConnell, "Linear-time recognition of circular-arc graphs," *Algorithmica*, vol. 37, pp. 93-147, 2003.
- [6] M. C. Golumbic, *Algorithmic Graph Theory and Perfect Graphs*. New York, NY, USA: Academic Press, 1980.
- [7] T. Y. Ho, Y. L. Wang, and M. T. Juan, "A linear time algorithm for finding all hinge vertices of a permutation graph," *Inf. Process. Lett.*, vol. 59, no. 2, pp. 103-107, 1996.
- [8] H. Honma, K. Abe, and S. Masuyama, "Erratum and addendum to a linear time algorithm for finding all hinge vertices of a permutation graph," *Inf. Process. Lett.*, vol. 111, no. 18, pp. 891-894, 2011.
- [9] F. R. Hsu, M. K. Shan, H. S. Chao, and R. C. Lee, "Some optimal parallel algorithms on interval and circular-arc graphs," *J. Inf. Sci. Eng.*, vol. 21, pp. 627-642, 2005.
- [10] H. Honma and S. Masuyama, "An optimal parallel algorithm for finding all hinge vertices of a circular-arc graph," *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput.*, vol. E91.A, no. 1, pp. 383-391, 2008.
- [11] D. Bera, M. Pal, and T. K. Pal, "An efficient algorithm for finding all hinge vertices on trapezoid graphs," *Theory Comput. Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 17-27, 2003.
- [12] H. Honma, Y. Nakajima, and S. Masuyama, "An algorithm for hinge vertex problem on circular trapezoid graphs," *J. Inf. Process.*, vol. 25, pp. 945-948, 2017.
- [13] H. Honma, Y. Nakajima, Y. Igarashi, and S. Masuyama, "Algorithm for identifying the maximum detour hinge vertices of a permutation graph," *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput.*, vol. E98-A, no. 6, pp. 1161-1167, 2015.
- [14] H. Honma, Y. Nakajima, and S. Masuyama, "An algorithm for the influential hinge vertex problem on interval graphs," *J. Inf. Process.*, vol. 28, pp. 1047-1051, 2020.

การจำแนกโรคอัลไซเมอร์จากภาพเอ็มอาร์ไอโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก

ธงชัย พจน์เสถียร¹ จูติพร สุทธิกุล² วรพงศ์ ตั้งศิริรัตน์^{3*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการวัดคุมและอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง, ระยอง, ประเทศไทย

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมกระบวนการเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง, ระยอง, ประเทศไทย

^{3*}ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : worapong.ta@kmitl.ac.th

รับต้นฉบับ : 24 ธันวาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข : 25 มกราคม 2566; ตอบรับบทความ : 28 กุมภาพันธ์ 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

เนื่องจากประชากรมีอายุที่ยืนยาวมากขึ้นทำให้ปัจจุบันประเทศไทยได้เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ และในปี พ.ศ. 2563 พบว่ามีจำนวนประชากรที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปทั้งหมด 11.627 ล้านคนคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 17.57 ของประชากรทั้งหมดในประเทศไทย และจะมีประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปในอัตราส่วนร้อยละ 28 ของประชากรทั้งหมดในประเทศไทยภายในปี พ.ศ. 2573 โดยปกติร่างกายของทุกคนจะเสื่อมลงตามอายุที่มากขึ้นและหนึ่งในอาการป่วยที่มีอัตราการเกิดมากขึ้น คือ อาการสมองเสื่อม โดยเฉพาะโรคอัลไซเมอร์ ยิ่งอายุมากขึ้นก็จะพบผู้ป่วยด้วยโรคนี้เพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนเกือบสองเท่าในทุก 5 ปี โดยโรคนี้ไม่สามารถป้องกันและไม่สามารถรักษาให้หายขาดได้ แต่ถ้าสามารถตรวจเจอโรคอัลไซเมอร์ได้ก่อนก็จะยังมีโอกาสรักษาให้อาการดีขึ้นหรือเสื่อมช้าลง งานวิจัยนี้เป็นการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบลึกมาพัฒนาเพื่อทำการจำแนกโรคอัลไซเมอร์โดยใช้ข้อมูลรูปภาพจากเครื่องตรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเอ็มอาร์ไอ และวิธีการเตรียมข้อมูลอย่างง่าย ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยรูปเอ็มอาร์ไอของสมองปกติจำนวน 2,560 รูป และรูปเอ็มอาร์ไอของสมองที่เป็นโรคอัลไซเมอร์จำนวน 2,561 รูป รวมรูปเอ็มอาร์ไอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมดจำนวน 5,121 รูป ผลการวิจัยพบว่ามีค่าความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 97.56 ความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 98.22 ค่าความระลึกเท่ากับร้อยละ 96.89 และค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 97.54

คำสำคัญ : โรคอัลไซเมอร์ โครงข่ายประสาทเทียมแบบลึก ผู้สูงอายุ เครื่องตรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Alzheimer's Disease Classification from MRI Using Deep Learning

Thongchai Photsathian¹ Thitiporn Suttikul² Worapong Tangsirat^{3*}

¹*Division of Instrumentation and Automation Engineering Technology, Faculty of Engineering and Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (Rayong Campus), Rayong, Thailand*

²*Division of Chemical Process Engineering Technology, Faculty of Engineering and Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok (Rayong Campus), Rayong, Thailand*

^{3*}*Department of Instrumentation and Control Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: worapong.ta@kmitl.ac.th

Received: 24 December 2022; Revised: 25 January 2023; Accepted: 28 February 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

Thailand has entered an aging society as a result of its population's longevity; in 2020, there were 11.627 million persons in Thailand who were 60 or older, or 17.57 percent of the country's overall population. By 2030, Thailand will have a population that is 60 years of age or older, making up approximately 28% of the total population. Everyone's body naturally deteriorates with age, and dementia, particularly Alzheimer's disease, is one of the more common conditions. The number of individuals who have this disease increases with age, increasing by around double every five years. Both treatment and prevention are not possible for this illness. Early detection of Alzheimer's disease increases the likelihood that symptoms can be treated to improve or delay further decline. In this study, simple data preparation techniques and magnetic resonance imaging (MRI) data were used to categorize Alzheimer's disease using deep neural network (DNN). The 5,121 total images used in this study were composed of 2,560 MRI images for the normal case and 2,561 MRI images for the Alzheimer case. According to the data analysis, this model has an accuracy of 97.56%, a precision of 98.22%, a recall of 96.89%, and an F1Score of 97.54%.

Keywords: Alzheimer's disease, Deep neural network, Elderly, MRI

1) บทนำ

โรคอัลไซเมอร์เป็นหนึ่งในอาการสมองเสื่อม (dementia) ชนิดหนึ่งที่พบได้บ่อยในผู้สูงอายุโรคนี้เกิดจากการตายของเซลล์สมองจนเกิดภาวะสมองเสื่อม ผู้ป่วยจะไม่สามารถตัดสินใจแยกถูกผิดได้ ไม่สามารถควบคุมอารมณ์ ความทรงจำสูญเสีย สุดท้ายจะไม่สามารถใช้ชีวิตประจำวันได้ตามปกติ [1]–[5] แม้กระทั่งการกินอาหาร การเข้าห้องน้ำ โรคนี้ยังไม่สามารถรักษาให้หายขาดและได้มีการประมาณการจากองค์การอนามัยโลก (WHO) ว่าภายในปี ค.ศ. 2030 จะมีผู้สูงอายุในโลกที่เป็นผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์จะมีมากถึง 75 ล้านคน [6], [7]

จากข้อมูลของหน่วยงานราชการไทยที่ชื่อว่ากรมกิจการผู้สูงอายุ (Department of Older Persons: DOP) ได้จัดทำข้อมูลประชากรในประเทศไทยเมื่อปี ค.ศ. 2020 พบว่ามีจำนวนผู้สูงอายุทั้งหมด 11.627 ล้านคน คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 17.57 ของประชากรทั้งหมดในประเทศไทย [1] จึงทำให้คาดการณ์ได้ว่าอาจจะมีผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมในประเทศไทยสูงถึง 1 ล้านคน จะเห็นว่าจำนวนผู้ป่วยจะเพิ่มสูงมากขึ้นตามจำนวนประชากรผู้สูงอายุและประเทศไทยจะเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์ (complete aged society) ภายในปี ค.ศ. 2022 และประเทศไทยจะเข้าสู่การเป็นสังคมผู้สูงวัยระดับสุดยอด (super-aged society) ภายในปี ค.ศ. 2032 คือมีประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปในอัตราส่วนร้อยละ 28 แสดงว่าประชากรทุก 100 คน เราจะพบจำนวนผู้สูงอายุ 28 คน ของจำนวนประชากรทั้งหมด [3], [8] จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้เกิดแนวคิดที่จะพัฒนาโมเดลสำหรับการคัดแยกผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์จากรูปที่ได้จากเครื่องตรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ เอ็มอาร์ไอ (Magnetic Resonance Imaging: MRI) โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) เพื่อเป็นเครื่องมือในการตรวจคัดกรองเบื้องต้นก่อนส่งไปให้แพทย์ทำการวินิจฉัยต่อไป

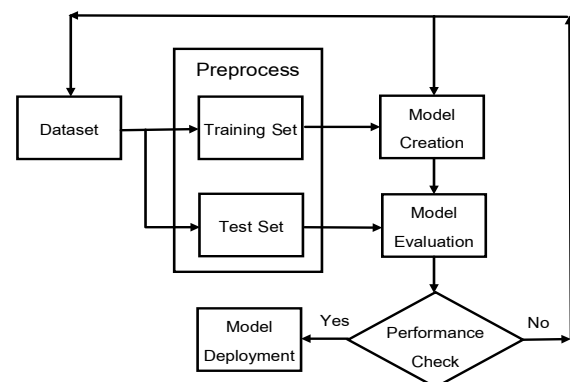
ก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจโรคอัลไซเมอร์แต่ละงานต่างใช้ข้อมูลแตกต่างกัน [9]–[15] แต่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฐานข้อมูลรูปภาพของเครื่องเอ็มอาร์ไอจากเว็บไซต์ www.kaggle.com/datasets/tourist55/alzheimers-data-set-4-class-of-images นอกจากนี้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้ข้อมูลเดียวกันนี้ในการสร้างโมเดลที่ใช้ทำนายโรคอัลไซเมอร์ [16] แต่พบว่ามีค่าความถูกต้องเพียง 70.30% เท่านั้น

2) การดำเนินงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองตามผังงาน (flow chart) ดังรูปที่ 1 โดยจะนำข้อมูลตั้งต้น (dataset) มาทำการเตรียมข้อมูลเบื้องต้น (pre-process) หลังจากนั้นจะนำข้อมูลทั้งหมดมาแบ่งออกเป็นสองชุด โดยทำการแบ่งโดยใช้อัตราส่วน 80 ต่อ 20 คือข้อมูลชุดสอน (training set) มีอัตราส่วนเท่ากับ 80% และข้อมูลชุดทดสอบ (test set) มีอัตราส่วนเท่ากับ 20% หลังจากนั้นจะนำข้อมูลชุดสอนไปสร้างโมเดล (model creation) และนำโมเดลที่ได้ไปประเมินประสิทธิภาพ (model evaluation) และทดสอบโมเดลที่ได้กับข้อมูลชุดทดสอบว่ามีประสิทธิภาพเป็นไปตามที่ได้ออกแบบหรือยัง ถ้ายังไม่ได้ให้กลับไปปรับแต่งโมเดลในส่วนของการสร้างโมเดลใหม่ หรือกลับไปเริ่มทำในส่วนของการข้อมูลตั้งต้น แต่ถ้าประสิทธิภาพของโมเดลเป็นไปตามที่ได้ออกแบบให้นำโมเดลไปใช้งานได้ (model deployment) และรายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนจะมีดังนี้

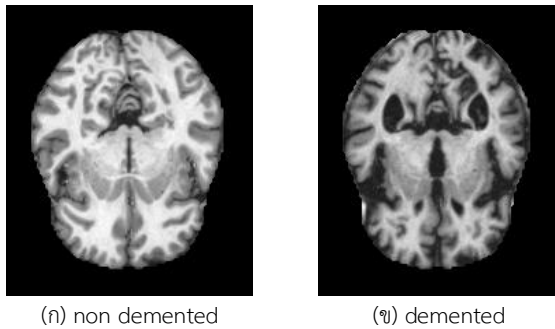
2.1) ข้อมูลจากเครื่องตรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เครื่องตรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเอ็มอาร์ไอ คือเทคนิคการสร้างภาพด้วยคลื่นแม่เหล็ก ใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจหาความผิดปกติของร่างกาย การตรวจร่างกายโดยใช้คลื่นสนามแม่เหล็กความเข้มสูง ในการสร้างภาพเสมือนจริงของอวัยวะภายในต่าง ๆ ของร่างกาย โดยเฉพาะ สมอง หัวใจ เส้นประสาทในร่างกาย และส่วนที่เป็นโรคมะเร็งได้ เครื่องตรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถให้ภาพที่แยกความแตกต่างระหว่างเนื้อเยื่อต่าง ๆ (soft tissues) ทำให้มีความถูกต้องแม่นยำในการวินิจฉัยโรคมายิ่งขึ้น อีกทั้งสามารถทำการตรวจได้แบบ 3 มิติ ภาพที่ได้จึงชัดเจน ทำให้แพทย์สามารถตรวจวินิจฉัยความผิดปกติในร่างกายได้อย่างแม่นยำละเอียดกว่าเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography: CT)



รูปที่ 1 : ขั้นตอนการทดลอง

รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายของสมองจากเครื่องเอ็มอาร์ไอที่ใช้ในการทดลองนี้ ประกอบไปด้วยภาพถ่ายของสมองกรณีไม่มีอาการป่วยของโรคอัลไซเมอร์ (non demented) ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) และภาพถ่ายของสมองกรณีมีอาการป่วยของโรคอัลไซเมอร์ (demented) ดังรูปที่ 2(ข)



(ก) non demented

(ข) demented

รูปที่ 2 : ภาพถ่ายสมองที่ได้จากเครื่องเอ็มอาร์ไอ

2.2) การเตรียมข้อมูล

ในขั้นตอนนี้จะทำการประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นก่อนเข้าสู่การสร้างโมเดลโดยจะทำการแปลงข้อมูลจากข้อมูลที่เป็นรูปภาพไปเป็นไฟล์ตาราง (.CSV) แสดงดังรูปที่ 3 โดยได้ทำการแปลงข้อมูลทั้งหมดใน dataset จำนวน 5121 รูป แต่ละรูปมีขนาด 176×208 pixel ทำการแปลงโดยนำจุด pixel แต่ละจุดมาเรียงต่อกัน 1 จุดต่อ 1 ช่อง ตามแนวนอนจะได้ทั้งหมด 36,608 ช่อง และจะนำผลที่ได้ไปเป็นผลเฉลยของแต่ละรูปมาบวกต่อท้ายอีกหนึ่งช่อง จะได้เป็นตารางแนวนอนจำนวน 36,609 ช่อง จากนั้นกลับไปนำรูปที่ 2 มาเรียงต่อกันแบบเดิมในแถวใหม่จนครบ 5,121 รูป จะได้ตารางขนาด 5,121 แถว $\times$ 36,609 หลัก โดยนำค่าที่ได้มาบวกจะเป็นข้อมูลผลการตรวจโรคอัลไซเมอร์ ถ้าผลลัพธ์เท่ากับ 1 นั่นคือเป็นโรคอัลไซเมอร์ และในทางกลับกันถ้าผลลัพธ์เท่ากับ 0 แสดงว่า ไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์

โดยข้อมูลในแนวนอนตั้งแต่ pixel 0 จนถึง pixel 36607 จะให้เป็นตัวแปร $\times 0$ ถึง $\times 36607$ และผลลัพธ์จะกำหนดให้เป็นตัวแปร Y จากนั้นทำการตรวจสอบการขาดหายไปของข้อมูล (missing value) และเช็คข้อมูลที่มีค่าผิดปกติไปจากปกติ (check outlier) ในการทดลองนี้ได้ใช้ข้อมูลรูปภาพทั้งหมดจากเครื่องเอ็มอาร์ไอจำนวน 5,121 รูป ดังตารางที่ 1 และได้ทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็นสองกลุ่ม คือ

กลุ่มแรก คือ กลุ่มข้อมูลรูปเอ็มอาร์ไอของสมองปกติจำนวน 2,560 รูป และได้แบ่งข้อมูลในกลุ่มนี้เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูลชุดสอนจำนวน 2,052 รูป และข้อมูลชุดทดสอบจำนวน 508 รูป

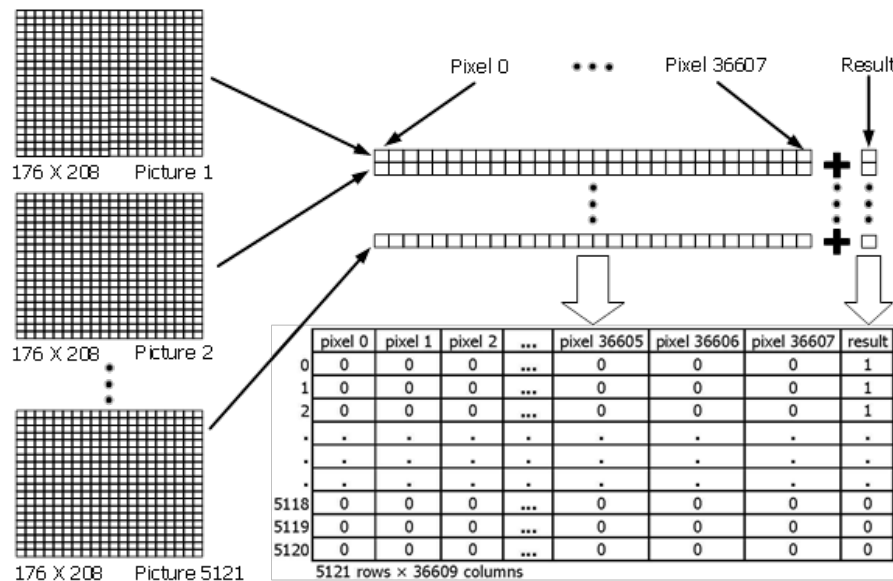
กลุ่มที่สอง คือ กลุ่มข้อมูลรูปเอ็มอาร์ไอของสมองที่เป็นโรคอัลไซเมอร์ ซึ่งจะเป็นการรวมรูปสมองจากเครื่องเอ็มอาร์ไอที่เป็นโรคอัลไซเมอร์ทั้งหมดรวมเป็นจำนวน 2561 รูป และได้แบ่งข้อมูลในกลุ่มนี้เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูลชุดสอนจำนวน 2,044 รูป และข้อมูลชุดทดสอบจำนวน 517 รูป

ตารางที่ 1 : จำนวนข้อมูลที่ใช้ทั้งหมด

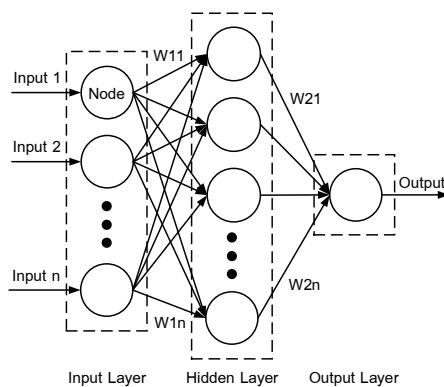
Dataset	เป็นโรคอัลไซเมอร์	ไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์	Total
Training set	2044	2052	4096
Test set	517	508	1025
Total	2561	2560	5121

2.3) การสร้างโมเดล

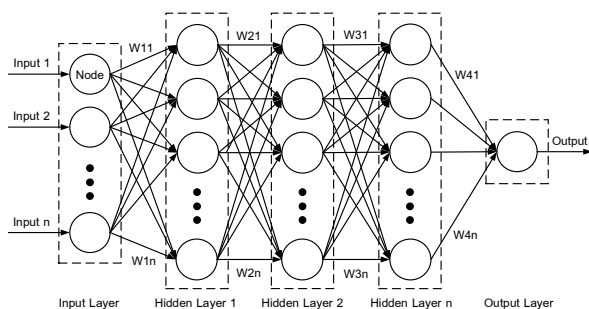
ในส่วนนี้จะเป็นการนำข้อมูลชุดสอนทั้งหมดที่ได้จากกระบวนการก่อนหน้ามาสร้างโมเดล และทำการฝึกสอน (training) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบลึก (Deep Neural Network: DNN) ใช้สำหรับการจำแนกประเภทของข้อมูล (binary classification) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยโมเดลนี้มีพื้นฐานมาจากการนำโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ ดังนี้ ชั้นอินพุต (input layer) ชั้นซ่อน (hidden layer) และชั้นเอาต์พุต (output layer) โดยแต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยโหนด (node) ต่าง ๆ ในที่นี้แสดงเป็นวงกลม โดยโหนดในชั้นอินพุตจะรับข้อมูลเข้ามา และจะส่งข้อมูลต่อไปยังโหนดในชั้นซ่อน โดยโหนดในชั้นอินพุตจะเชื่อมต่อกับโหนดในชั้นซ่อนด้วยเส้นตรงที่เรียกว่า W_{11} จนถึง W_{1n} และโหนดในชั้นซ่อนจะเชื่อมต่อไปยังโหนดในชั้นเอาต์พุตด้วยเส้นตรงเรียกว่า W_{21} จนถึง W_{2n} โดยแต่ละโหนดจะเชื่อมต่อกันแบบสมบูรณ์ (fully connected) และในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียมแบบลึกดังรูปที่ 5 จะประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ เหมือนกับโครงข่ายประสาทเทียม ต่างกันตรงที่โครงข่ายประสาทเทียมแบบลึก จะมีการเพิ่มชั้นซ่อนให้มากกว่าหนึ่งชั้น เพื่อลดเวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ให้น้อยลง โดยยังมีความสามารถในการพยากรณ์ที่ซับซ้อนได้แบบเดิม



รูปที่ 3 : การแปลงข้อมูลจากรูปภาพไปเป็นไฟล์ตาราง



รูปที่ 4 : โครงข่ายประสาทเทียม (ANN)



รูปที่ 5 : โครงข่ายประสาทเทียมแบบลึก (DNN)

2.4) การประเมินประสิทธิภาพของโมเดล

ขั้นตอนนี้จะเป็นการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลที่ใช้จำแนกประเภทของข้อมูลว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด โดยนำข้อมูลชุดทดสอบ มาทดสอบกับโมเดลที่ได้สร้างไว้ โดยวิธีที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลดังนี้

2.4.1) แผนภูมิความร่อนเมทริกซ์สับสน

แผนภูมิความร่อนเมทริกซ์สับสน (confusion matrix) คือ ตารางที่ใช้วัดความสามารถในการพยากรณ์ของโมเดลเทียบกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงแสดงดังรูปที่ 6 โดยมีตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

- True Positive (TP) คือ โมเดลทำนายว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์จริง และในความเป็นจริงก็เป็นโรคอัลไซเมอร์
- True Negative (TN) คือ โมเดลทำนายว่าไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์ และในความเป็นจริงก็ไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์
- False Positive (FP) คือ โมเดลทำนายว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ แต่ในความเป็นจริงกลับไม่ได้เป็นโรคอัลไซเมอร์
- False Negative (FN) คือ โมเดลทำนายว่าไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์ แต่ในความเป็นจริงกลับเป็นโรคอัลไซเมอร์

	Predicted Positive (1)	Predicted Negative (0)
Actually Positive (1)	True Positive (TP)	False Positive (FP)
Actually Negative (0)	False Negative (FN)	True Negative (TN)

รูปที่ 6 : แผนภูมิความร่อนเมทริกซ์สับสน

2.4.2) ค่าความถูกต้อง

ค่าความถูกต้อง (accuracy) คือ อัตราส่วนของโมเดลที่พยากรณ์ได้อย่างถูกต้องเทียบกับข้อมูลทั้งหมด ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{Accuracy} = \left[\frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่ TP คือ โมเดลทำนายว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ได้ถูกต้อง

TN คือ โมเดลทำนายว่าไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์ได้ถูกต้อง

FP คือ ไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์แต่โมเดลทำนายว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์

FN คือ เป็นโรคอัลไซเมอร์แต่โมเดลทำนายว่าไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์

2.4.3) ความแม่นยำ

ความแม่นยำ (precision) คืออัตราส่วนของโมเดลพยากรณ์ว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ได้อย่างถูกต้อง เทียบกับข้อมูลที่มีโมเดลพยากรณ์ว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ทั้งหมด ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{Precision} = \left[\frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ TP คือ โมเดลพยากรณ์ว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ได้อย่างถูกต้อง

FP คือ ไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์แต่โมเดลทำนายว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์

2.4.4) ค่าความระลึก

ค่าความระลึก (recall) คืออัตราส่วนของข้อมูลที่มีโมเดลพยากรณ์ว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ได้อย่างถูกต้อง เทียบกับข้อมูลทั้งหมดที่เป็นโรคอัลไซเมอร์ แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Recall} = \left[\frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \right] \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ TP คือ โมเดลพยากรณ์ว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ได้อย่างถูกต้อง

FN คือ โมเดลพยากรณ์ผิดว่าไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์

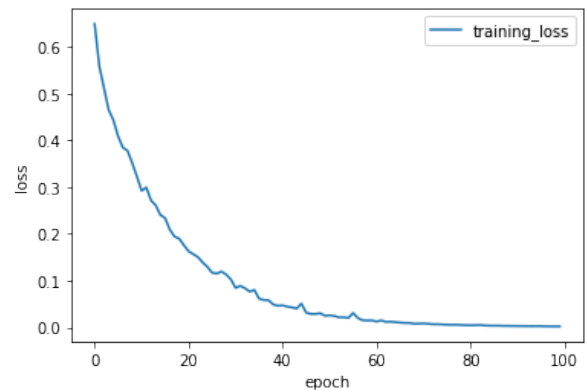
2.4.5) ค่าเฉลี่ย

ค่าเฉลี่ย (F1Score) คือ การหาค่าเฉลี่ยของโมเดลที่ใช้พยากรณ์ โดยให้ความสำคัญมากกับข้อมูลที่มีค่าน้อย และให้ความสำคัญน้อยกับข้อมูลที่มีค่ามาก (harmonic mean) แสดงดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

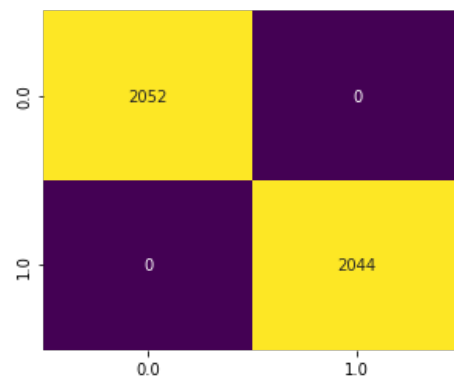
$$\text{F1Score} = 2 \times \left[\frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \right] \times 100\% \quad (4)$$

2.5) การนำโมเดลไปใช้งาน

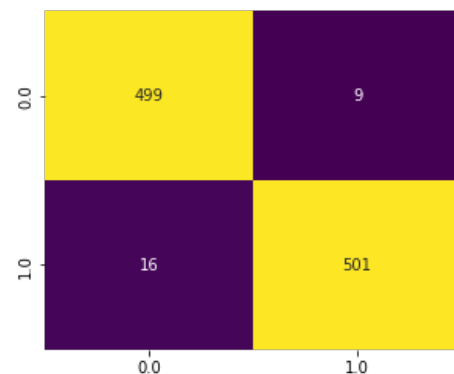
หลังจากได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลแล้วถ้าได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการจะสามารถนำโมเดลที่ได้สร้างไปใช้งานต่อได้ แต่ถ้าทำการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลแล้ว แต่ยังไม่ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการให้กลับไปเตรียมข้อมูลใหม่หรือกลับไปสร้างโมเดลใหม่จนได้ประสิทธิภาพตามต้องการ



รูปที่ 7 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสูญเสียเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้สอน



รูปที่ 8 : แผนภูมิความร้อนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้อมูลชุดสอน



รูปที่ 9 : แผนภูมิความร้อนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้อมูลชุดทดสอบ

3) ผลการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้ภาษาไพทอนทำงานบน Google Colab โดยใช้ไลบรารี Scikit-learn ในการสร้างโมเดล เนื่องจากสามารถใช้ได้ฟรีและไม่มีค่าใช้จ่าย โดยกำหนดให้ชั้นอินพุตมีจำนวนโหนดเท่ากับตัวแปรที่ป้อนเข้า และชั้นเอาต์พุตมีจำนวนโหนดเท่ากับตัวแปรผลลัพธ์ มีชั้นซ่อนทั้งหมดสามชั้น เพราะเหมาะกับปัญหาที่มีความซับซ้อน [17] ตามหลักการทั่วไป (rule of thumb) จำนวนโหนดที่ชั้นซ่อนไม่ควรเกินสองเท่า ของจำนวนโหนดที่ชั้นอินพุต [18] ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ชั้นซ่อนชั้นที่หนึ่ง 50 โหนด ชั้นซ่อนชั้นที่สองมี 15 โหนด และชั้นซ่อนชั้นที่สามมี 15 โหนด ใช้รีลู (ReLU) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (activation function) ตั้งค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate) เป็น 0.00015 กับกำหนดจำนวนรอบสำหรับการฝึกสอน (Epoch) จำนวน 100 รอบ โดยสองค่านี้ได้มาจากการใช้วิธีลองผิดลองถูกจากการทดลอง (trial and error) ประกอบกับการดูจากฟังก์ชันการสูญเสีย (loss function) และกำหนดขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการปรับค่าน้ำหนัก (batch size) ให้มีขนาดข้อมูลเท่ากับ 64 เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมากซึ่งค่าปกติสำหรับข้อมูลที่มีจำนวนไม่มาก (ประมาณ 1000) จะใช้ค่าการปรับน้ำหนักอยู่ที่ 32 [18], [19]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งโปรแกรมออกเป็น 2 โปรแกรมคือ โปรแกรมที่ 1 ใช้สำหรับการอ่านข้อมูลรูปภาพเข้ามาที่ละรูป เพื่อทำการแปลงจากรูปภาพไปเป็นตารางจนครบทั้งหมดแล้วเก็บข้อมูลที่แปลงได้เป็นไฟล์ตาราง (CSV) ส่วนโปรแกรมที่ 2 ใช้สำหรับการอ่านไฟล์ที่ได้จากโปรแกรมที่ 1 แล้วเข้าสู่ขั้นตอนในการสร้างโมเดลและทดสอบการทำงาน การแบ่งโปรแกรมแบบนี้มีข้อดีคือ ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการปรับค่าตัวแปรเสริมที่เป็นตัวกำหนดค่าการทำงานต่าง ๆ (hyper-parameter) เพราะทุกครั้งที่มีการปรับค่าตัวแปรเสริมก็ไม่ต้องไปเริ่มแปลงข้อมูลใหม่ สามารถเรียกใช้ข้อมูลที่แปลงมาแล้วจากโปรแกรมที่ 1 ได้เลยทำให้ลดเวลาในการประมวลผลได้

รูปที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสูญเสีย (loss function) เทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในการฝึกสอนจากรูปจะเห็นว่ากราฟการสูญเสียจะลดลงเรื่อย ๆ จนความชันแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งหมายความว่าจำนวนรอบในการสอนที่กำหนดไว้มีความเหมาะสมแล้วไม่มีความจำเป็นที่จะเพิ่มจำนวนรอบที่ใช้ในการฝึกสอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และการสูญเสียเข้าใกล้ศูนย์

รูปที่ 8 แสดงแผนภูมิความร้อนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้อมูลชุดสอนแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ได้สร้างขึ้นมาสามารถที่จะจำแนกประเภทของข้อมูลรูปภาพที่เป็นโรคอัลไซเมอร์ และไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์ได้อย่างถูกต้องทั้งหมด

รูปที่ 9 แสดงแผนภูมิความร้อนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้อมูลชุดทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ได้สร้างขึ้นมาสามารถจำแนกประเภทของข้อมูลรูปภาพที่ไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์ได้ถูกต้องจำนวน 499 รูป จากรูปภาพทั้งหมดจำนวน 508 รูป และสามารถที่จะจำแนกประเภทของข้อมูลรูปภาพที่เป็นโรคอัลไซเมอร์ได้ถูกต้องจำนวน 501 รูป จากทั้งหมด 517 รูป เมื่อนำข้อมูลแผนภูมิความร้อนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้อมูลชุดทดสอบคำนวณตามสมการ (1) ถึง (4) พบว่าจะได้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 97.56% ความแม่นยำเท่ากับ 98.22% ค่าความระลึกเท่ากับ 96.89% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.54%

4) สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบลึกมาประยุกต์ในการจำแนกประเภทของข้อมูลว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์หรือไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์ โดยได้ใช้เทคนิคการแบ่งโปรแกรมออกเป็น 2 โปรแกรม โดยโปรแกรมที่ 1 ทำการแปลงข้อมูลจากรูปภาพไปเป็นตารางที่ละเอียดจนครบทั้งหมดและเก็บเป็นไฟล์ โปรแกรมที่ 2 จะอ่านไฟล์ที่ได้จากโปรแกรมที่ 1 ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมแบบลึกและประเมินประสิทธิภาพของโมเดล การทำแบบนี้จะทำให้ทุกครั้งที่ทำการปรับค่าตัวแปรเสริมและเริ่มฝึกสอนใหม่จะใช้เวลาไม่นาน ในงานนี้ใช้เวลาในการฝึกสอน 3 นาที 51 วินาที ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจตรงตามที่ได้ออกแบบโดยมีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 97.56% จากแผนภูมิความร้อนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของข้อมูลชุดสอน และข้อมูลชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับจะเห็นว่าโมเดลที่ได้จากการทดลองนี้ทำงานได้ดีสามารถทำนายได้ถูกต้องแม่นยำกับข้อมูลชุดสอน แต่กับข้อมูลชุดทดสอบยังมีข้อผิดพลาดที่จะต้องแก้ไขในอนาคต

แนวทางในการพัฒนาโมเดลที่ใช้ในการตรวจโรคอัลไซเมอร์สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) เข้ามาประยุกต์ในการพัฒนาโมเดล และในชุดข้อมูลถ้ามีประวัติของผู้ป่วยเช่น อายุ เพศ จำนวนผู้ป่วย เป็นต้น จะเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะข้อมูลเหล่านี้มีผลต่อการนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจของแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ ใน

อนาคตเมื่อการพัฒนาโมเดลได้ประสิทธิภาพตามต้องการแล้วสามารถนำโมเดลที่ได้ไปใช้เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำงานร่วมกับแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจวินิจฉัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

REFERENCES

- [1] S. Trakulsithichoke, "Prevention of Dementia in older persons," (in Thai), *J. Nursing and Health Care*, vol. 36, no. 4, pp. 6–14, 2018.
- [2] S. Mangmee and S. Monkong, "Relationships between mutuality, preparedness, and predictability to care, and caregiver role strain from caregiving activities for older people with Dementia," (in Thai), *J. Thailand Nursing and Midwifery Council*, vol. 36, no. 3, pp. 151–164, 2021.
- [3] S. Pomudomthap, C. Somthawinongsai, and P. Piphitpakdee, "The application development of Dementia / Alzheimer patients in daily life," (in Thai), *J. Manage. Sci., Ubon Ratchathani Univ.*, vol. 11, no. 1, pp. 60–85, 2022.
- [4] L. Inklab, "Understanding & approaching the Alzheimer patients," (in Thai), *Christian Univ. Thailand J.*, vol. 20, no. 3, pp. 439–447, 2014.
- [5] W. Kongin, O. Thammson, S. Thipsrinuan, and S. Kaewborisuth, "How can we help an Alzheimer's patient and caregivers?," (in Thai), *The Thai J. Nursing Council*, vol. 15, no. 3, pp. 65–77, 2001.
- [6] P. Anundilokrit, "Dementia," (in Thai), *Regional Health Promotion Center 9 J.*, vol. 15, no. 37, pp. 392–398, 2021.
- [7] M. Prince, M. Guerchet, and M. Prina, "Policy brief for heads of government: The global impact of dementia 2013–2050," Alzheimer's Disease International (ADI), London, U.K., Dec. 1, 2013, [Online]. Available: <https://www.alzint.org/u/2020/08/GlobalImpactDementia2013.pdf>
- [8] P. Prasartkul and N. Satchanawakul, "The essential of ageing in place in Thailand," (in Thai), *Thammasat Rev.*, vol. 40, no. 2, pp. 1–23, 2021.
- [9] C. Kavitha, V. Mani, S. R. Srividhya, O. I. Khalaf, and C. A. Tavera Romero, "Early-stage Alzheimer's disease prediction using machine learning models," *Frontiers in Public Health*, vol. 10, Mar. 2022, Art. no. 853294.
- [10] C. Pamarapa, T. Ekjeen, W. Shoombuatong, and Y. Vichianin, "Alzheimer's disease classification and prediction using T1-weighted MR brain imaging based on SVM algorithm," *The Thai J. Radiological Technol.*, vol. 46, no. 1, pp. 69–79, 2021.
- [11] I. Beheshti, H. Demirel, and H. Matsuda, "Classification of Alzheimer's disease and prediction of mild cognitive impairment-to-Alzheimer's conversion from structural magnetic resource imaging using feature ranking and a genetic algorithm," *Comput. Biol. Med.*, vol. 83, pp. 109–119, Apr. 2017.
- [12] A. Farooq, S. Anwar, M. Awais, and S. Rehman, "A deep CNN based multi-class classification of Alzheimer's disease using MRI," in *Proc. IEEE Int. Conf. Imaging Syst. and Techniques (IST)*, Beijing, China, Oct. 2017, pp. 1–6.
- [13] S. Liu et al. "Generalizable deep learning model for early Alzheimer's disease detection from structural MRIs," *Sci. Rep.*, vol. 12, pp. 17106–17118, Oct. 2022.
- [14] S. S. Kundaram and K. C. Pathak, "Deep learning-based Alzheimer disease detection," in *Proc. 4th Int. Conf. Microelectronics, Comput. and Commun. Syst.*, Ranchi, India, May 2019, pp. 587–597.
- [15] R. Maskeliunas, R. Damasevicius, and T. Krilavicius, "Analysis of features of Alzheimer's disease: detection of early stage from functional brain changes in magnetic resonance images using a finetuned ResNet18 network," *Diagnostics*, vol. 11, no. 6, pp. 1071, Jun. 2021.
- [16] E. Mgddadi, A. Al-Aiad, M. S. Al-Ayyad, and A. Darabseh, "Prediction Alzheimer's disease from MRI images using deep learning," in *Proc. 12th Int. Conf. Inform. and Commun. Syst. (ICICS)*, Valencia, Spain, May 2021, pp. 120–125.
- [17] J. Heaton. "The number of hidden layers." HEATON RESEARCH.com. <https://www.heatonresearch.com/2017/06/01/hidden-layers.html> (accessed Jan. 19, 2023).
- [18] S. Srithongchai, "A PM2.5 prediction model using LSTM neural network in Bangkok area," *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2022.
- [19] Y. Bengio, "Practical Recommendations for Gradient-Based Training of Deep Architectures," in *Neural Networks: Tricks of the Trade*, G. Montavon, G. B. Orr, and K.-R. Müller, Eds. Berlin, Germany: Springer, 2012, pp. 437–478.

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโบนาริวัฟ สำหรับแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุล

จักรกฤษณ์ พลรบ^{1*} เบญจวรรณ โรจนดิษฐ์² เจษฎา ตัณฑนุช³ Eckart Schulz⁴

^{1*,2,3,4} สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : jakkrit.polrob@gmail.com

รับต้นฉบับ : 7 มกราคม 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 1 กุมภาพันธ์ 2566; ตอรับบทความ : 28 กุมภาพันธ์ 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างขั้นตอนวิธีการสุ่มตัวอย่างลดแบบใหม่ โดยใช้แนวคิดของขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโบนาริวัฟร่วมกับเทคนิคเคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุล ซึ่งขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะกำหนดค่าพารามิเตอร์เคเท่ากับหนึ่ง ทั้งนี้ได้เลือกชุดข้อมูลทดสอบจำนวน 12 ชุดจาก KEEL และ imbalanced-learn ซึ่งชุดข้อมูลจะมีอัตราส่วนความไม่สมดุลอยู่ในช่วง 1.82 ถึง 42.01 เพื่อใช้ในการประเมินขั้นตอนวิธีใหม่เปรียบเทียบกับวิธีการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลด้วยวิธีการลดจำนวนตัวอย่างข้อมูล 3 ขั้นตอนวิธี ได้แก่ การลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม คลัสเตอร์เซนทรอยด์ และเนียร์มีสงานวิจัยนี้เริ่มจากการนำชุดข้อมูลมาแบ่งเป็นสองชุด คือ ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับชุดข้อมูลฝึกสอนคลาสข้อมูลกลุ่มน้อยจะใช้ข้อมูลชุดเดิม ในขณะที่คลาสข้อมูลกลุ่มมากจะถูกวิเคราะห์เพื่อดึงชุดข้อมูลย่อยที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ และประเมินประสิทธิภาพด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน จากผลการวิจัยพบว่าขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอมีประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมสูงที่สุด เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการสุ่มตัวอย่างลดทั้งสามที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งมีผลการวัดประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยดังนี้ Accuracy = 0.8596, F1 score = 0.6255, G-mean = 0.8941, AUROC = 0.9363, AUPRC = 0.6978, Sensitivity = 0.9444, Precision = 0.5271, MCC = 0.6204, และ Kappa = 0.5695

คำสำคัญ : ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโบนาริวัฟ ปัญหาข้อมูลไม่สมดุล เคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ขั้นตอนวิธีการสุ่มตัวอย่างลด

Application of Binary Whale Optimization Algorithm for Solving Imbalanced Data Problems

Jakkrit Polrob^{1*} Benjawan Rodjanadid² Jessada Tanthanuch³ Eckart Schulz⁴

^{1*,2,3,4}*School of Mathematics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: jakkrit.polrob@gmail.com

Received: 7 January 2023; Revised: 1 February 2023; Accepted: 28 February 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

This research is aimed at developing a novel undersampling algorithm by combining the ideas of the whale and binary whale optimization algorithms with K- nearest neighbor classification, in order to solve imbalanced data problems. Twelve datasets of varying imbalance ratios ranging from 1.82 to 42.01 were selected from the Knowledge Extraction based on Evolutionary Learning (KEEL) repository and also the imbalanced-learn repository, to be used in the evaluation of the novel algorithm. This research work started by splitting each dataset into two parts, the training set and the testing set. Whereas the minority class of each training set remained untouched, its majority class was processed by the proposed algorithm with the parameter in K-nearest neighbor classification fixed to $K = 1$, to obtain an optimal representative subset of the majority class. Then a support vector machine classifier was trained with the new and reduced training set for performance assessment. It was found that the proposed algorithm had best overall performance when compared with another three undersampling methods, namely random undersampling, cluster centroid, and near-miss algorithms, showing average efficiency measurement results as follows: Accuracy = 0.8596, F1 score = 0.6255, G-mean = 0.8941, AUROC = 0.9363, AUPRC = 0.6978, Sensitivity = 0.9444, Precision = 0.5271, MCC = 0.6204, and Kappa = 0.5695.

Keywords: Binary whale optimization algorithm, Imbalanced data problem, K-nearest neighbor, Support vector machine, Undersampling algorithm

1) บทนำ

ข้อมูลไม่สมดุลบนปัญหาการจำแนกข้อมูล (classification) นั้น หมายถึงความไม่เท่ากันของจำนวนกลุ่มตัวอย่างในแต่ละคลาส (class) ซึ่งสถานการณ์เช่นนี้มักพบบ่อยในหลายสายงาน เช่น การวินิจฉัยเพื่อจำแนกประเภทผู้ป่วยโรคมะเร็ง เมื่อจำนวนของผู้ป่วยมีจำนวนน้อยกว่าผู้ที่ไม่ป่วยมาก [1] การตรวจจบบั๊กการเงินที่ผิดปกติ เมื่อจำนวนผู้ทุจริตมีจำนวนน้อยกว่าผู้ที่ไม่ทุจริต [2] การจำแนกประเภทผู้ป่วยโรคเบาหวาน เมื่อจำนวนข้อมูลที่มีพบกว่าผู้ที่ไม่ป่วยมีจำนวนน้อยกว่าผู้ที่ไม่ป่วยอย่างเห็นได้ชัด [3] และ อีกในหลาย ๆ สายงานที่มักจะพบเจอกับปัญหาข้อมูลไม่สมดุล หนึ่งในปัญหาที่มักพบสำหรับปัญหาการจำแนกประเภทเมื่อข้อมูลเกิดความไม่สมดุลขึ้น คือ ถ้านำข้อมูลไม่สมดุลไปสร้างตัวแบบโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) โดยตรงจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความไม่ถูกต้องและมีความเอนเอียง (bias) ในการทำนายผล ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเรียนรู้ของเครื่องมักจะถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อน (error) ดังนั้น ตัวแบบที่ได้จะทำการทำนายผลลัพธ์ไปทางคลาสกลุ่มมาก (majority class) โดยจะไม่เน้นการทำนายไปที่คลาสกลุ่มน้อย (minority class)

เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง (resampling technique) เป็นเทคนิคที่สามารถแก้ปัญหาของข้อมูลที่ไม่สมดุลได้ และเมื่อข้อมูลมีการปรับให้มีความสมดุลแล้วก็จะสามารถนำข้อมูลเข้าสู่การสร้างตัวแบบโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เทคนิคการสุ่มตัวอย่างสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีหลัก ๆ คือ วิธีการสุ่มตัวอย่างลด (undersampling methods) วิธีการสุ่มตัวอย่างเพิ่ม (oversampling methods) และ วิธีการแบบผสม (hybrid methods) [4] ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีวิธีการสุ่มตัวอย่างหลายแบบโดยหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพคือการสุ่มตัวอย่างลด วิธีนี้จะช่วยลดจำนวนข้อมูลของคลาสกลุ่มมากลงมาให้มีขนาดเท่ากับจำนวนข้อมูลของคลาสกลุ่มน้อย ถึงแม้ว่าวิธีการสุ่มตัวอย่างลดอาจจะทำให้สูญเสียข้อมูลที่มีความสำคัญไป แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะช่วยลดเวลาในการประมวลผลเพื่อสร้างตัวแบบของการเรียนรู้ของเครื่อง และสามารถลดปัญหาการเกิดปัญหาเกินพอดี (overfitting) ในการสร้างตัวแบบได้

ในปัจจุบันมีการใช้ขั้นตอนวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ (nature-inspired algorithms) กับปัญหาข้อมูลไม่สมดุล ยกตัวอย่างเช่น ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงมด (ant colony optimization algorithms) ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการ

(evolutionary algorithms) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithms) และขั้นตอนวิธีการปรับสมดุลกลุ่มปรับตัว (adaptive swarm balancing algorithms) โดยในปี ค.ศ.2013 Yu *et al.* [5] ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการสุ่มตัวอย่างลดแบบใหม่ที่มีแนวคิดมาจากการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงมด ซึ่งเรียกว่า ACO Sampling โดยขั้นตอนวิธีนี้จะค้นหาชุดข้อมูลย่อยที่เหมาะสมสำหรับคลาสกลุ่มมาก และได้ทำการประเมินขั้นตอนวิธีด้วยชุดข้อมูล DNA microarray 4 ชุด ที่เป็นข้อมูลไม่สมดุล โดยตัวแยกประเภทเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine: SVM) และผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่น โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้จะมีส่วนประกอบเป็น 3 ตัววัดประสิทธิภาพ ได้แก่ F1 score, G-mean และ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ Receiver operating characteristic curve (AUROC) ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 López *et al.* [6] ได้เสนอการใช้ขั้นตอนวิธีแบบ Iterative Instance Adjustment for Imbalanced Domains (IPADE-ID) ที่มีกรอบการทำงานแบบเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary framework) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้พบว่าวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการอื่น โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใช้ตัววัดประสิทธิภาพ AUROC สำหรับการวิวัฒนาการผลเฉลย ในปี ค.ศ. 2016 Kim *et al.* [7] ได้เสนอแนวทางการปรับให้เหมาะสมของการสุ่มตัวอย่างตามคลัสเตอร์เพื่อเลือกตัวแทนที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลได้ และได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีผสมระหว่างเทคโนโลยีคลัสเตอร์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมบนตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยวิธีการที่นำเสนอสามารถใช้แก้ปัญหาการทำนายการล้มละลายของสถาบันการเงินได้สำเร็จ โดยที่ใช้ตัววัด G-mean ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และใน ปี ค.ศ. 2017 Li *et al.* [8] ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการปรับสมดุลกลุ่มปรับตัว ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของข้อมูลขนาดใหญ่ อีกทั้งยังพบว่ามีประสิทธิภาพสอดคล้องกับชุดข้อมูลทางการแพทย์ที่ไม่สมดุลขนาดใหญ่โดยทั่วไปอีกด้วย ซึ่งวิธีการที่นำเสนอทำให้ตัวแบบจำแนกประเภทมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นและลดเวลาการทำงานให้สั้นลงเมื่อเทียบกับวิธี brute-force โดยที่ใช้ตัววัดประสิทธิภาพ kappa และ ค่าความถูกต้อง ในการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์

และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการสร้างขั้นตอนวิธีใหม่ที่ชื่อว่ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไบนารีวาฬ (binary whale optimization algorithms) [9] ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยม

นิยมในการประยุกต์นำไปใช้กับหลากหลายศาสตร์ เช่น การแก้ปัญหาการเลือกคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับตัวแบบ (feature selection) [10] การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [9] และ การแก้ปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีนี้ค่อนข้างน่าสนใจเป็นอย่างมากถ้านำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุล โดยในปี ค.ศ. 2019 Hussien *et al.* ได้เสนอขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวาทแบบใหม่โดยมีการใช้ไบนารีมาประยุกต์เข้ากับการเลือกคุณลักษณะย่อยที่เหมาะสมเพื่อลดจำนวนมิติของชุดข้อมูลบนปัญหาการจำแนกประเภท [11] โดยวิธีการใหม่นี้จะใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนซิกมอยด์ (S shape) ในการหาคุณลักษณะที่เหมาะสม ผลการวิจัยพบว่าขั้นตอนวิธีใหม่นี้มีประสิทธิภาพในการค้นหาคุณลักษณะที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี ในปี ค.ศ. 2020 V. Kumar และ D. Kumar ได้ปรับปรุง WOA ให้กลายเป็น BWOA โดยปรับเปลี่ยนจากเวกเตอร์ผลเฉลยที่อยู่ในปริภูมิของจำนวนจริง ให้กลายเป็นเวกเตอร์ผลเฉลยที่อยู่ในปริภูมิของไบนารี [9] และใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนซิกมอยด์เพื่อใช้ในการปรับปรุงตำแหน่งของผลเฉลย ผลการทดสอบเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีอื่น ๆ พบว่าขั้นตอนวิธีนี้มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า อีกทั้งยังทดสอบกับปัญหาการสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (unit commitment) ซึ่งเป็นปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่น ๆ ในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง และในปีเดียวกันนี้ Sayed *et al.* ได้นำเสนอตัวแบบอัจฉริยะแบบผสมที่ใช้ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห้คลัสเตอร์ร่วมกับขั้นตอนวิธีแบบไบนารีเวอร์ชันของ WOA และ Moth flam optimization [12] เพื่อใช้ในการเลือกคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลมะเร็งเต้านมทางคลินิก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถสร้างคุณลักษณะของข้อมูลที่มีความหมายและมีนัยสำคัญได้ และงานวิจัยสุดท้ายในปี ค.ศ. 2020 Hussien *et al.* ได้เสนอ BWOA ที่ใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ S shape และ V shape [13] ผลลัพธ์พบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่น ๆ และได้้นำขั้นตอนวิธีนี้ไปแก้ปัญหาทางวิศวกรรม และปัญหาการเดินทางของพนักงาน (travelling salesman problem) จากการศึกษาพบว่าได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่นทั้งด้านความแม่นยำและความเร็ว

จากงานวิจัยต่าง ๆ จะพบว่าขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบไบนารีวาทนั้น มีความสามารถที่โดดเด่นในการตัดสินใจว่า

จะเลือกหรือไม่เลือกสิ่งใดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด เช่น การเลือกคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการสร้างตัวแบบและตัดคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสมทิ้งไป การเลือกสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าว่าเครื่องใดควรทำงานเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด เป็นต้น จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบไบนารีวาทมีประสิทธิภาพที่ดีจริงทำให้หลายงานวิจัยมีการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีนี้กันอย่างแพร่หลาย ด้วยความสามารถของขั้นตอนวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเลือกกลุ่มตัวอย่างข้อมูลย่อยที่มีแนวโน้มที่จะเป็นตัวแทนที่ดีของกลุ่มตัวอย่างข้อมูลขนาดใหญ่ได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอขั้นตอนวิธีใหม่ที่ต้องการสุ่มตัวอย่างลดโดยเกิดจากการรวมการทำงานของ ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไบนารีวาท และขั้นตอนวิธีเคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (K-nearest neighbor) [14] และเนื่องจากการทำงานของขั้นตอนวิธีไบนารีวาทมีการวนซ้ำเพื่อคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวนมาก ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกขั้นตอนวิธีเคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดในการสร้างตัวแบบเพื่อประเมินค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพราะง่ายและไม่ซับซ้อน หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อดึงชุดข้อมูลย่อยที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของคลาสกลุ่มมากด้วยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเสร็จแล้ว จะนำข้อมูลที่มีการปรับจำนวนทั้งสองคลาสให้มีความสมดุลแล้วนั้น เข้าสู่การสร้างตัวแบบโดยใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน [15] เนื่องจากเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหาการจำแนกประเภทข้อมูล เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีขนาดไม่ใหญ่มากและทำงานได้ดีแม้ว่าข้อมูลจะมีจำนวนคุณลักษณะที่มาก [5] ถึงอย่างไรก็ตามเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์ก็มีข้อจำกัดเมื่อนำไปใช้กับข้อมูลไม่สมดุลซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการทำนายลดลงอย่างมาก [16] หากขั้นตอนวิธีใดสามารถปรับปรุงสมดุลของข้อมูลได้ดี ก็จะสามารถดึงประสิทธิภาพในการสร้างตัวแบบของเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนได้ดีเช่นกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับขั้นตอนวิธีการสุ่มตัวอย่างลดอีก 3 วิธี ซึ่งได้แก่ การลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม (random undersampling) [17] คลัสเตอร์เซนทรอยด์ (cluster centroid) [18] และ เนียร์มิส (near-miss) [19] สำหรับตัววัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีข้างต้นมีดังต่อไปนี้ Accuracy, F1score, G-mean, AUROC, AUPRC, Sensitivity, Precision, Matthew's correlation coefficient (MCC), และ Cohen's Kappa Coefficient (Kappa)

2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีใหม่ในการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลถึงวิธีการสุ่มตัวอย่างลด โดยรวมการทำงานของขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโบนารีวาท และขั้นตอนวิธีเคเพือนบ้านใกล้ที่สุด

3) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1) อัตราส่วนความไม่สมดุล (Imbalance Ratio)

อัตราส่วนความไม่สมดุลเป็นตัววัดที่เอาไว้งบอกระดับความไม่สมดุลของข้อมูลที่มีลักษณะสองคลาส แสดงในสมการที่ 1 [20]

$$\text{ImbalanceRatio}(IR) = \frac{n^-}{n^+} \quad (1)$$

โดยที่ n^- คือ จำนวนของกลุ่มตัวอย่างในคลาสลบ (คลาสกลุ่มมาก) และ n^+ คือ จำนวนของกลุ่มตัวอย่างในคลาสบวก (คลาสกลุ่มน้อย) ซึ่งตัววัดนี้สามารถใช้เพื่อเรียงลำดับความแตกต่างของความไม่สมดุลของข้อมูลแต่ละชุดได้ หากค่าอัตราส่วนความไม่สมดุลมีค่ามากกว่าหนึ่งหรือน้อยกว่าหนึ่งอาจบ่งบอกได้ว่าชุดข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่ไม่สมดุล ถึงอย่างไรก็ตามตัววัดนี้ก็อาจจะไม่ใช้ตัววัดความไม่สมดุลของข้อมูลที่ตีเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ด้วย [4]

3.2) วิธีการสุ่มตัวอย่างลด (Undersampling Methods)

เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อเลือกหาชุดข้อมูลย่อยเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลคลาสกลุ่มมาก หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้เข้าสู่การสร้างตัวแบบในปัญหาการจำแนกประเภทต่อไป โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างลดที่งานวิจัยนี้นำมาเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมีทั้งหมด 3 ขั้นตอนวิธี ได้แก่ การลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม คลัสเตอร์เซนทรอยด์ และ เนียร์มัส

3.2.1) การลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม จะทำการสุ่มเลือกหาชุดข้อมูลย่อยจากคลาสกลุ่มมาก เนื่องจากเป็นวิธีการแบบสุ่มทำให้ในแต่ละครั้งที่ทำการสุ่มก็จะได้ชุดข้อมูลย่อยที่แตกต่างกันออกไป [17]

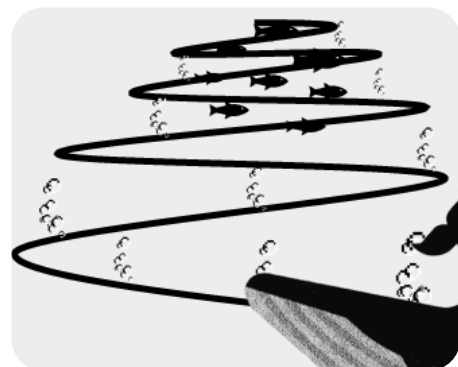
3.2.2) คลัสเตอร์เซนทรอยด์ จะทำการสร้างจุดข้อมูลใหม่หรือชุดข้อมูลย่อยใหม่ ที่มีจำนวนเท่ากับขนาดของคลาสกลุ่มน้อย ซึ่งเบื้องหลังการทำงานของวิธีนี้คือใช้ K-means algorithm โดยทำการระบุจำนวนกลุ่มหรือคลัสเตอร์ (cluster) ที่ต้องการจะแบ่งซึ่งจำนวนกลุ่มที่ว่าจะต้องมีขนาดเท่ากับจำนวนของคลาสกลุ่มน้อย หลังจากนั้น จะทำการสร้างเซนทรอยด์บนข้อมูลคลาสกลุ่มมาก และจะทำการปรับค่าตำแหน่งเซนทรอยด์ไปจนกว่าเซน

ทรอยด์จะไม่มีเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง สุดท้ายเซนทรอยด์ที่ถูกสร้างจะกลายเป็นชุดข้อมูลย่อยที่เป็นตัวแทนของคลาสกลุ่มมาก [18]

3.2.3) เนียร์มัส จะทำการเลือกชุดข้อมูลย่อยจากคลาสกลุ่มมาก โดยในแต่ละจุดข้อมูลของคลาสกลุ่มมากจะทำการหาจุดข้อมูลของคลาสกลุ่มน้อย 3 จุดที่อยู่ใกล้ที่สุด ทำการหาระยะทางระหว่าง 3 จุดนั้น แล้วคำนวณระยะทางเฉลี่ย ทำแบบนี้ทุกจุดข้อมูลของคลาสกลุ่มมาก หลังจากนั้นนำระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้มาเรียงจากน้อยไปมาก และจะทำการเลือกชุดข้อมูลย่อยของคลาสกลุ่มมากจากจุดข้อมูลที่มีระยะทางเฉลี่ยน้อยที่สุด จำนวนเท่ากับขนาดของคลาสกลุ่มน้อย [19]

3.3) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวาฬ (Whale Optimization Algorithm: WOA)

WOA เป็นหนึ่งในขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก (meta heuristic optimization algorithm) ที่ได้แรงบันดาลใจในการสร้างมาจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม (humpback whale) โดยพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬชนิดนี้จะแบ่งออกเป็นสองเฟส เฟสแรกวาฬหลังค่อมจะทำการสำรวจหาเหยื่อ (exploration phase) โดยเหยื่อของวาฬหลังค่อมจะเป็นปลาตัวเล็กหรือแพลงก์ตอน หลังจากที่ได้เจอเหยื่อแล้วจะเข้าสู่เฟสที่สอง โดยวาฬหลังค่อมจะทำการปิดล้อมเหยื่อและโจมตีเหยื่อ (exploitation phase) โดยวิธีการโจมตีเหยื่อของวาฬหลังค่อมจะว่ายวนรอบเหยื่อพร้อมกับปล่อยฟองอากาศมาล้อมรอบเหยื่อซึ่งจะมีลักษณะคล้ายเลข '9' แสดงดังรูปที่ 1 ด้วยพฤติกรรมการล่าเหยื่อที่น่าสนใจจึงทำให้ Mirjalili และ Lewis [21] ทำการศึกษาและพัฒนา WOA ขึ้นมาเพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย



รูปที่ 1 : การปล่อยฟองอากาศของวาฬหลังค่อม

พิจารณาฟังก์ชัน $f(x)$ ที่นิยามบนเซต $W \subset \mathbb{R}^d$ ซึ่งเป็นเซตที่มีขอบเขต โดยในที่นี้จะเรียกฟังก์ชัน f ว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (fitness function) โดยเป้าหมายของฟังก์ชันนี้คือหา $x_0 \in W$ ที่ทำให้ฟังก์ชัน $f(x)$ มีค่ามากที่สุด (หรือน้อยที่สุด) เริ่มต้นด้วยการระบุจำนวนจุด $x_1, \dots, x_m$ ใน W โดยจุดเหล่านี้จะเปรียบเสมือนเวกเตอร์บอกตำแหน่งของวาฬแต่ละตัว ซึ่งมีทั้งหมด m ตัว (หรือ เปรียบเสมือนผลเฉลยของฟังก์ชันทั้งหมด m ผลเฉลย) ซึ่งจุดเหล่านี้จะถูกปรับปรุงตำแหน่งไปตามรอบการวนซ้ำสูงสุดที่กำหนดไว้ (maximum iteration) และสุดท้ายจะได้ x_0 ที่ทำให้ฟังก์ชัน $f(x)$ มีค่ามากที่สุด (หรือน้อยที่สุด)

เนื่องจากวาฬทั้งหมด m ตัว จะทำงานโดยอิสระจากวาฬตัวอื่น เราจึงได้ให้คำอธิบายสำหรับวาฬแต่ละตัวและกำหนดสัญลักษณ์ไว้ดังนี้ ให้ $\vec{X}_j(t)$ เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของวาฬตัวที่ j ณ รอบการวนซ้ำ t (นั่นคือ $\vec{X}_j(0) = x_j$ โดยที่ $j = 1, \dots, m$ และกำหนดให้ตำแหน่งในตอนเริ่มต้น ($t = 0$) จะถูกสร้างขึ้นมาด้วยการสุ่มตัวเลขในจำนวนจริง) และ $\vec{X}^*(t)$ จะบ่งบอกถึงตำแหน่งของวาฬตัวที่ดีที่สุดที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่ามากที่สุด (หรือน้อยที่สุด) ตั้งแต่เริ่มการวนซ้ำจนจบรอบการวนซ้ำ

ในการปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งของวาฬในทั้งสองเฟส ตัวแปรที่สำคัญแสดงดังสมการที่ 2

$$a(t) = 2 \left(1 - \frac{t}{MaxIter} \right) \quad (2)$$

โดยที่ t คือ ครั้งการวนรอบปัจจุบัน และ $MaxIter$ คือ การวนซ้ำสูงสุดก่อนการหยุดการทำงาน โดยค่า $a(t)$ นี้จะลดลงแบบเชิงเส้นตั้งแต่ 2 ถึง 0 โดยขึ้นอยู่กับครั้งการวนรอบปัจจุบัน และเปรียบเสมือนตัวแปรที่เอาไว้กำหนดขนาดของการค้นหาเหยื่อของวาฬ ยิ่งในช่วงแรกของการค้นหาวาฬ วาฬจะออกไปได้ไกลมากแต่เมื่อถึงช่วงท้ายวาฬจะเริ่มไม่ไปห่างจากบริเวณที่หาอาหาร และเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายค่า $a(t)$ จะถูกเขียนแทนด้วย a

3.3.1) ตัวแบบการปิดล้อมและโจมตี (Exploitation Phase)

อันดับแรกในการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อมเมื่อเจอเหยื่อแล้ววาฬหลังค่อมจะทำการเข้าไปปิดล้อมเหยื่อ (Encircling method) โดยลักษณะพฤติกรรมสามารถจำลองและสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$\vec{D}_E = \vec{D}_E(t, j) = |C \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}_j(t)| \quad (3)$$

$$\vec{X}_j(t+1) = \vec{X}^*(t) - A \cdot \vec{D}_E \quad (4)$$

โดยที่ $|\cdot|$ เป็นการหาค่าสมบูรณ์ในแต่ละองค์ประกอบ (elementwise absolute), $A = A(t, j) = a \cdot (2r - 1)$ และ $C = C(t, j) = 2r$ เมื่อ $r = r(t, j)$ เป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution) อยู่ในช่วง $[0, 1]$ ดังนั้นค่า A และ C จึงมีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มซึ่งอยู่ในช่วง $[a, -a]$ และ $[0, 2]$ ตามลำดับ และ $\vec{D}_E$ บ่งบอกถึงระยะทางจากเวกเตอร์บอกตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ถูกคูณด้วยตัวแปรสุ่ม C ถึงเวกเตอร์บอกตำแหน่งตัวที่ j ณ รอบการวนซ้ำที่ t

สมการที่ (4) เป็นสมการที่แสดงการอัปเดตเวกเตอร์บอกตำแหน่งของวาฬให้ปิดล้อมเข้าใกล้วาฬตัวที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีที่สุด หรือเข้าใกล้แหล่งอาหาร โดยจะเห็นว่าสมการการปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งแบบปิดล้อมจะขึ้นอยู่กับตัวแปร A และ C และพฤติกรรมการปิดล้อมที่ค่อย ๆ หดตัวเข้าหาเหยื่อก็คือจำลองด้วยการลดลงของค่าพารามิเตอร์ a

เมื่อวาฬหลังค่อมทำการปิดล้อมเหยื่อเรียบร้อยแล้ววาฬหลังค่อมจะทำการว่ายวนรอบเหยื่อพร้อมกับปล่อยฟองอากาศออกมา (bubble-net attacking method) โดยสมการการปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งของพฤติกรรมนี้ แสดงในสมการที่ (5) และ (6)

$$\vec{D}_B = \vec{D}_B(t, j) = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}_j(t)| \quad (5)$$

$$\vec{X}_j(t+1) = \vec{X}^*(t) + \vec{D}_B e^{bl} \cos(2\pi l) \quad (6)$$

โดยที่ $\vec{D}_B$ บ่งบอกถึงระยะทางจากเวกเตอร์บอกตำแหน่งที่ดีที่สุดถึงเวกเตอร์บอกตำแหน่งตัวที่ j ณ รอบการวนซ้ำที่ t และ $l = l(t, j)$ เป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ และ b คือค่าคงที่ที่ใช้ในการกำหนดรูปร่างการหมุนวนของวาฬ

3.3.2) ตัวแบบการสำรวจหาเหยื่อ (Exploration Phase)

เพื่อให้การค้นหาเหยื่อหรือการค้นหาลักษณะมีความหลากหลาย ดังนั้นต้องมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่จะให้วาฬไปหา ซึ่งจากเดิมวาฬจะต้องปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งไปหาวาฬตัวที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด เปลี่ยนเป็นให้ปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งไปหาวาฬตัวอื่น ๆ เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีความหลากหลายและมีโอกาสที่จะเกิดตำแหน่งที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าเดิมได้ ซึ่งสามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

$$\vec{D}_R = \vec{D}_R(t, j) = |C \cdot \vec{X}_{rand}(t) - \vec{X}_j(t)| \quad (7)$$

$$\vec{X}_j(t+1) = \vec{X}_{rand}(t) - A \cdot \vec{D}_R \quad (8)$$

โดยที่ $\vec{D}_R$ บ่งบอกถึงระยะทางจากเวกเตอร์บอกตำแหน่งที่ถูกสุ่มมาหนึ่งตัวจากทั้งหมด m ตัว โดยคูณด้วยตัวแปรสุ่ม C ถึงเวกเตอร์บอกตำแหน่งตัวที่ j ณ รอบการวนซ้ำที่ t และ $\vec{X}_{rand}(t)$ คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของวาฬตัวอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ตัวที่ดีที่สุดซึ่งจะถูกเลือกมาแบบสุ่ม ณ เวลา t

3.3.3) การเปลี่ยนเฟส (Switching Phase) เนื่องจากมีเวกเตอร์บอกตำแหน่งของวาฬ (หรือผลเฉลย) หลายตัวในแต่ละรอบการวนซ้ำ ทำให้วาฬแต่ละตัวต้องมีการสุ่มเลือกพฤติกรรมว่าจะถูกปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งด้วยสมการใด ซึ่งเกณฑ์การเปลี่ยนเฟสจะแสดงดังสมการที่ (9)

$$\vec{X}_j(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - A \cdot \vec{D}_E & \text{ถ้า } p < 0.5 \text{ และ } |A| < 1; \\ \vec{X}^*(t) + \vec{D}_B e^{bl} \cos(2\pi l) & \text{ถ้า } p \geq 0.5; \dots \\ \vec{X}_{rand}(t) - A \cdot \vec{D}_R & \text{ถ้า } p < 0.5 \text{ และ } |A| \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

โดยที่ $p = p(t, j)$ เป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มบนช่วง $[0,1]$

3.4) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไบนารีวาฬ (Binary Whale Optimization Algorithm: BWOA)

BWOA ได้ถูกพัฒนามาจาก WOA [9] ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการหาผลเฉลยแบบไบนารีเวกเตอร์ (binary vectors) โดยโดเมนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ปริภูมิ

$$X = \{0,1\}^d = \prod_{i=1}^d \{0,1\}$$

จากส่วนประกอบของเวกเตอร์คือ 0 และ 1 ดังนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหลากหลายงานที่ต้องใช้การตัดสินใจแบบไบนารี (binary)

โดยที่ในแต่ละองค์ประกอบของเวกเตอร์บอกตำแหน่งจะถูกปรับปรุง โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวแปรสุ่มและค่าของฟังก์ชันการถ่ายโอนซิกมอยด์ (sigmoid transfer function) ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนซิกมอยด์จะแสดงดังสมการที่ (10)

$$g(s) = \frac{1}{1 + e^{-10(s-0.5)}} \quad (10)$$

โดยที่ s เป็นค่าคงที่ที่เพิ่มขึ้นจาก -2 ถึง 2 ซึ่งส่งผลให้ฟังก์ชัน $g(s)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $\frac{1}{1+e^{25}} \approx 0$ ถึง $\frac{1}{1+e^{-15}} \approx 1$ และสมการการปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งจะแสดงดังสมการที่ (11)

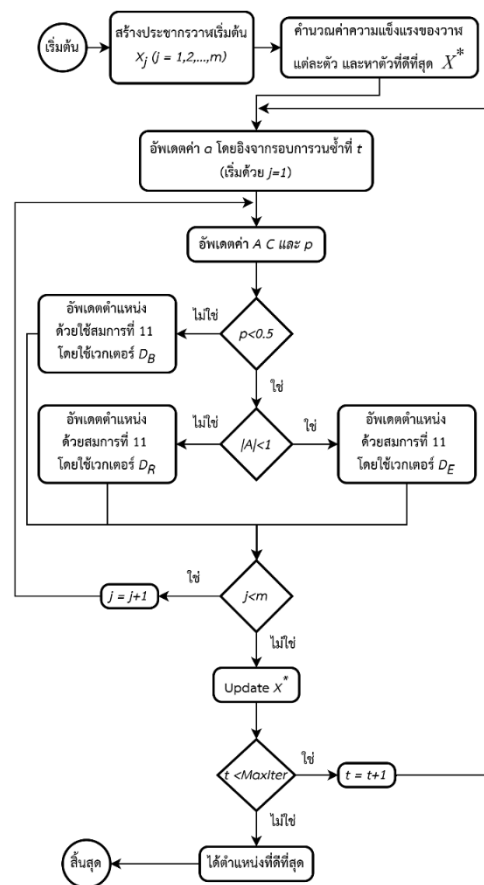
$$\vec{X}_j(t+1, i) = \begin{cases} 1 - \vec{X}_j(t, i), & \text{ถ้า } r \leq g(A\vec{D}_0(i)) \\ \vec{X}_j(t, i), & \text{ถ้า } r > g(A\vec{D}_0(i)) \end{cases} \quad (11)$$

โดยที่ r เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มอยู่ในช่วง $[0,1]$ และ i เป็นดัชนีของเวกเตอร์ $\vec{D}_0$ โดยที่เวกเตอร์ $\vec{D}_0$ จะมี

เงื่อนไขในการเลือกดังสมการที่ (12) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งของวาฬในแต่ละองค์ประกอบจะอาศัยการเปรียบเทียบกับค่าของตัวแปรสุ่ม r

$$\vec{D}_0 = \begin{cases} \vec{D}_E & \text{ถ้า } p < 0.5 \text{ และ } |A| < 1; \dots \\ \vec{D}_B & \text{ถ้า } p \geq 0.5; \dots \\ \vec{D}_R & \text{ถ้า } p < 0.5 \text{ และ } |A| \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในการปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งของ BWOA จะเหมือนกับ WOA ในสมการที่ (9) เพียงแต่แตกต่างกันที่สมการการปรับปรุงเวกเตอร์บอกตำแหน่งเพียงเท่านั้น ภาพขั้นตอนการทำงานของ BWOA แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 : ขั้นตอนการทำงานของ BWOA

3.5) ตัวแบบการเรียนรู้ของเครื่อง

การเรียนรู้ของเครื่องสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) และ การเรียนรู้แบบเสริมแรง (reinforcement learning) ซึ่งในงานวิจัยจะการเรียนรู้ของเครื่องประเภทการเรียนรู้แบบมีผู้สอนและใช้สำหรับงานการจำแนกประเภท (classification task) เพียงเท่านั้น

3.5.1) *เคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (K-nearest neighbors: K-NN)* เป็นขั้นตอนวิธีที่มีพื้นฐานมาจากการหาระยะทาง โดยเริ่มจากการนำจุดข้อมูลใหม่มาพล็อตลงปริภูมิเดียวกับข้อมูลชุดฝึกสอน หลังจากนั้นหาระยะทางเทียบกับจุดข้อมูลชุดฝึกสอนว่าจุดข้อมูลใหม่นี้มีจุดข้อมูลชุดฝึกสอนใกล้จุดข้อมูลใหม่มากี่จุด โดยที่จำนวนจุดที่ล้อมรอบจุดข้อมูลใหม่จะถูกกำหนดจำนวนด้วยพารามิเตอร์ K (โดยส่วนมากหากเป็นปัญหาสองคลาสมักจะกำหนด K เป็นจำนวนคี่) ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการระบุว่าจุดข้อมูลใหม่นี้จะถูกจำแนกว่าเป็นคลาสไหน โดยดูจากจุดข้อมูลชุดฝึกสอนที่ใกล้กับจุดข้อมูลใหม่มากที่สุดจำนวน K ตัว และดูว่าคลาสใดมีจำนวนมากที่สุด คลาสนั้นจะถูกติดฉลากให้กับจุดข้อมูลใหม่โดยทันที [14]

3.5.2) *ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines: SVM)* คือขั้นตอนวิธีที่อาศัยหลักการการสร้างไฮเปอร์เพลน (Hyperplane) เพื่อตัดแบ่งข้อมูลให้ออกเป็นกลุ่ม ๆ อย่างชัดเจน โดยจะมีการปรับสัมประสิทธิ์ของสมการวัตถุประสงคให้เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้ไฮเปอร์เพลนสามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลให้ดีที่สุด [15]

3.6) การประเมินตัวแบบ (Model Evaluation)

หลังจากทำการสร้างตัวแบบในการจำแนกประเภทข้อมูลแล้ว จะต้องมีการวัดประสิทธิภาพว่าตัวแบบมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด โดยตัววัดประสิทธิภาพโดยส่วนใหญ่จะมีพื้นฐานการสร้างมาจากเมทริกซ์ความสับสน (confusion matrix) [4] แสดงดังรูปที่ 3

		ผลทำนาย (Prediction)	
		Negative	Positive
ผลจริง (Actual)	Negative	TN	FP
	Positive	FN	TP

รูปที่ 3 : Confusion matrix

จากรูปที่ 3 Positive, Negative, TN, FN, FP, และ TP มีความหมายดังต่อไปนี้

- Positive คือ ค่าทางบวก ซึ่งจะถูกระบุให้กับคลาสที่สนใจที่จะทำนายผล

- Negative คือ ค่าทางลบ ซึ่งจะถูกระบุให้กับคลาสที่สนใจรองลงมา
- TN คือ ผลทำนายตรงกับผลจริงในทางลบ
- FN คือ ผลทำนายเป็นทางลบแต่ผลจริงเป็นทางบวก
- FP คือ ผลทำนายเป็นทางบวกแต่ผลจริงเป็นทางลบ
- TP คือ ผลทำนายตรงกับผลจริงในทางบวก

ตัววัดประสิทธิภาพของตัวแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

- ค่าความถูกต้อง (Accuracy) แสดงดังสมการที่ (13)

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (13)$$

- ค่าความแม่นยำ (Precision) แสดงดังสมการที่ (14)

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (14)$$

- ค่าความไว (Sensitivity) หรือเรียกอีกอย่างว่า ความระลึก (Recall) แสดงดังสมการที่ (15)

$$Sensitivity(Recall) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (15)$$

- ค่าเฉลี่ยเลขคณิตระหว่างค่าความแม่นยำและความไว (F1 score) แสดงดังสมการที่ (16)

$$F1\ score = \frac{2 \times (Precision \times Recall)}{Precision + Recall} \quad (16)$$

- ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างค่าความจำเพาะและค่าความไว (G-mean) [22] แสดงดังสมการที่ (17)

$$G\text{-mean} = \sqrt{Sensitivity \times Specificity} \quad (17)$$

โดยที่ Specificity คือ ค่าความจำเพาะ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (18)

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (18)$$

- ค่า Matthew's correlation coefficient (MCC) [23] เป็นตัววัดที่ใช้วัดคุณภาพของปัญหาที่มีสองคลาส ซึ่งเป็นหน่วยวัดที่สมดุลแม้ขนาดของคลาสจะแตกต่างกัน แสดงดังสมการที่ (19)

$$MCC = \frac{(TN \times TP) - (FP \times FN)}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}} \quad (19)$$

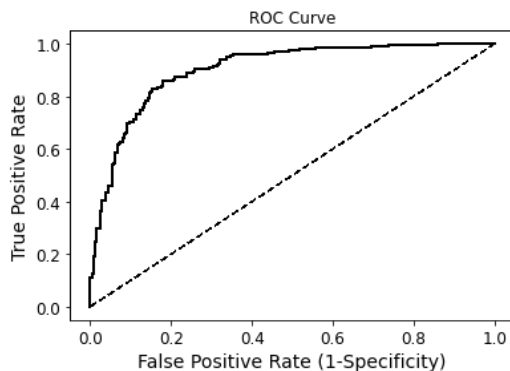
- ค่า Cohen's Kappa coefficient (kappa) [24] เป็นค่าตัวชี้วัดทางสถิติ ระหว่างผู้ให้ความเห็นสองฝ่ายว่ามีความสอดคล้องกันมากเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับ เมทริกซ์ความสับสน ผู้ให้ความเห็นฝ่ายแรกก็คือ ผลจริง และผู้ให้ความเห็นฝ่ายที่สอง คือ ผลการทำนาย ซึ่งแสดงการคำนวณดังสมการที่ (20)

$$kappa = \frac{p_a - p_e}{1 - p_e} = 1 - \frac{1 - p_a}{1 - p_e} \quad (20)$$

โดยที่ p_a คือ ค่าความถูกต้อง และ

$$p_e = \frac{(TN + FP)(TN + FN) + (FN + TP)(FP + TP)}{(TP + TN + FP + FN)^2}$$

- ค่าพื้นที่ใต้กราฟ Receiver operating characteristic curve (AUROC) กราฟ ROC [25] คือกราฟที่พล็อตระหว่างอัตราผลบวกจริง (True Positive Rate : TPR) และ อัตราผลบวกเท็จ (False Positive Rate : FPR) แสดงดังรูปที่ 4

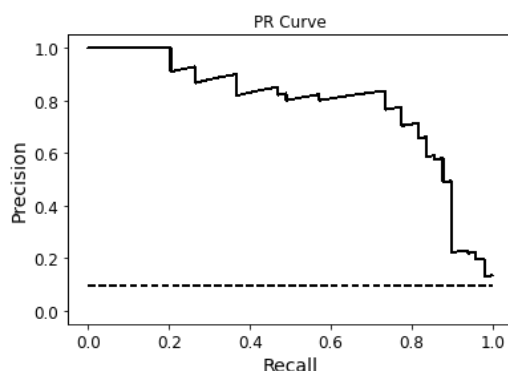


รูปที่ 4 : กราฟ ROC

โดยที่ TPR คือ ค่าความไว และ FPR สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}$$

- ค่าพื้นที่ใต้กราฟ Precision-Recall curve (AUPRC) กราฟ PR [26] คือกราฟที่พล็อตระหว่างค่าความแม่นยำและค่าความระลึก แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5: กราฟ PR

3.7) K-fold Cross Validation

เป็นวิธีที่นิยมในการใช้ทดสอบประสิทธิภาพของตัวแบบ ซึ่งมักจะใช้ร่วมกับการฝึกสอนตัวแบบการเรียนรู้ของเครื่อง โดยจะแบ่งข้อมูลชุดฝึกสอนออกเป็น k ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะมีจำนวน

ข้อมูลเท่ากัน หลังจากนั้นข้อมูลหนึ่งส่วนจะใช้เป็นตัวทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลและทำวนไปเช่นนี้จนครบจำนวนที่แบ่งไว้ [27]

4) วิธีดำเนินการวิจัย

4.1) ชุดข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูลจำนวน 12 ชุดข้อมูล ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ตัวแปรตามแบ่งเป็นสองคลาส (Binary class) และค่าอัตราส่วนความไม่สมดุล (IR) มีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเรียงชุดข้อมูลตาม IR จากน้อยไปมากดังแสดงในตารางที่ 1 โดยชุดข้อมูลเหล่านี้มาจากฐานข้อมูล KEEL [28] และ imbalanced-learn [29] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่มีความนิยมและมีความน่าเชื่อถือสูง เพราะงานวิจัยโดยส่วนใหญ่นิยมนำข้อมูลจากฐานข้อมูลนี้ไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพของตัวแบบหรือขั้นตอนวิธีที่ได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ ซึ่งจากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าข้อมูลทั้ง 12 ชุดที่เลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีความหลากหลายทั้งทางด้านของจำนวนคุณลักษณะ ขนาดข้อมูล ขนาดข้อมูลกลุ่มน้อย ขนาดข้อมูลกลุ่มมาก และ ค่าอัตราส่วนความไม่สมดุล (IR)

ตารางที่ 1: รายละเอียดชุดข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อชุดข้อมูล	จำนวน คุณ- ลักษณะ	ขนาด ข้อมูล กลุ่ม น้อย	ขนาด ข้อมูล กลุ่ม มาก	IR
glass1	9	214	138	1.82
Iris0	4	150	100	2.00
glass-0-1-2-3_VS_4-5-6	9	214	163	3.20
ecoli2	7	336	284	5.46
glass6	9	214	185	6.38
ecoli	7	336	301	8.60
pen_digits	16	10,992	9,937	9.42
abalone	10	4,177	3,786	9.68
Libras_move	90	360	336	14.00
solar_flare_m0	32	1,389	1,321	19.43
yeast_me2	8	1,484	1,433	28.10
mammography	6	11,183	10,923	42.01

4.2) วิธีการทำงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ

เราได้นำเสนอการประยุกต์รวมการทำงานของขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโบนาริวิฟ และ ขั้นตอนวิธีเคเพื่อนบ้าน ใกล้ที่สุดเพื่อแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุล โดยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะอิงวิธีการสุ่มตัวอย่างลด ซึ่งวิธีการทำงานของขั้นตอนวิธีที่เสนอสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ให้ D เป็นเซตของข้อมูลฝึกสอน จากนั้นแบ่งเซต D ออกเป็น 2 เซต คือ D^- เป็นเซตของคลาสกลุ่มมาก และ D^+ แทนเซตของคลาสกลุ่มน้อย และให้ $d = |D^-|$ แทนจำนวนของตัวอย่างในคลาสกลุ่มมาก และ $n^+ = |D^+|$ แทนจำนวนของตัวอย่างในคลาสกลุ่มน้อย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ต้องการสุ่มตัวอย่างลดข้อมูลคลาสกลุ่มมาก โดยเราต้องการหาเซตย่อย $D_{red}^- \subset D^-$ ซึ่ง $|D_{red}^-| \approx |D^+|$ ในขณะเดียวกันเซตย่อยที่ถูกเลือกนี้จะถูกนำมาเป็นข้อมูลในการสร้างตัวแบบ ซึ่งตอนนี้ $D_{red}^- \cup D^+$ จะกลายเป็นข้อมูลชุดฝึกสอนแล้ว และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$f = f(A) := (1 - F1 \text{ score})^2 + (1 - AUROC)^2 + (1 - Sensitivity)^2 + \beta(n^- - n^+)^2 \quad (21)$$

โดยที่ $A \subseteq D^-$ เป็นเซตย่อยของคลาสกลุ่มมาก, $n^- = n^-(A) = |A|$ เป็นจำนวนของกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ใน A , β เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ติดลบ ซึ่งเปรียบเสมือนกับค่า Penalty หากเลือกเซตย่อยที่มีจำนวนของตัวอย่างไม่เท่ากับจำนวนของคลาสกลุ่มน้อย กำหนดให้ ค่า F1 score, AUROC และ Sensitivity จะเป็นค่าที่ได้จากการทำ 10-fold cross validation ที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน $A \cup D^+$ เรียบร้อยแล้ว

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เราได้สร้างขึ้นมานั้น เราได้ฟังก์ชัน

$$f : 2^{D^-} \rightarrow [0, \infty)$$

นิยามบนเซตกำลัง 2^{D^-} ของเซต D^- (ซึ่งเป็นโอกาสของการเกิดเซตย่อยทั้งหมดที่เป็นไปจากการเลือกเซตย่อยจากคลาสกลุ่มมาก และส่งไปยังเซต $[0, \infty)$) ซึ่งเราต้องการหาเซตย่อยที่ทำให้ฟังก์ชันนี้มีค่าต่ำที่สุด

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เราต้องการเลือกเซตย่อยออกมาจากคลาสกลุ่มมาก และเรามี $D^- = \{x_1, \dots, x_d\}$ เป็นกลุ่มตัวอย่างของคลาสกลุ่มมาก โดยเราจะกำหนดฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติเป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งคือ

$$\phi : \{0,1\}^d \rightarrow 2^{D^-}$$

ซึ่งนิยามโดย

$$\phi(\vec{X}) = \{x_i \in D^- : \vec{X}(i) = 1\} \quad (i = 1, \dots, d)$$

โดยเงื่อนไขในการเลือกเซตย่อย คือ เมื่อพบว่าองค์ประกอบของ $\vec{X}$ ณ ดัชนีที่ i ใด ๆ ที่มีค่าเท่ากับ 1 จะถูกกำหนดให้ไปเลือกตัวอย่างตัวที่ i ใน D^- มาเป็นเซตย่อยของคลาสกลุ่มมาก และจะได้ฟังก์ชันประกอบ คือ

$$f \circ \phi : \{0,1\}^d \rightarrow [0, \infty)$$

ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันประกอบที่เราต้องการที่จะหาค่าต่ำสุดเนื่องจากโดเมนของฟังก์ชันประกอบนี้เป็นปริภูมิของโบนาริเวกเตอร์ ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถนำขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโบนาริวิฟเข้ามาช่วยหาค่าที่ต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f \circ \phi$ และตัวแบบที่เราใช้ในการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นตัวแบบที่เข้าใจง่ายและไม่ซับซ้อน นั่นคือ เคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด ซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์ $K = 1$ เพื่อลดความซับซ้อนของการทำงานและเวลาในการคำนวณ

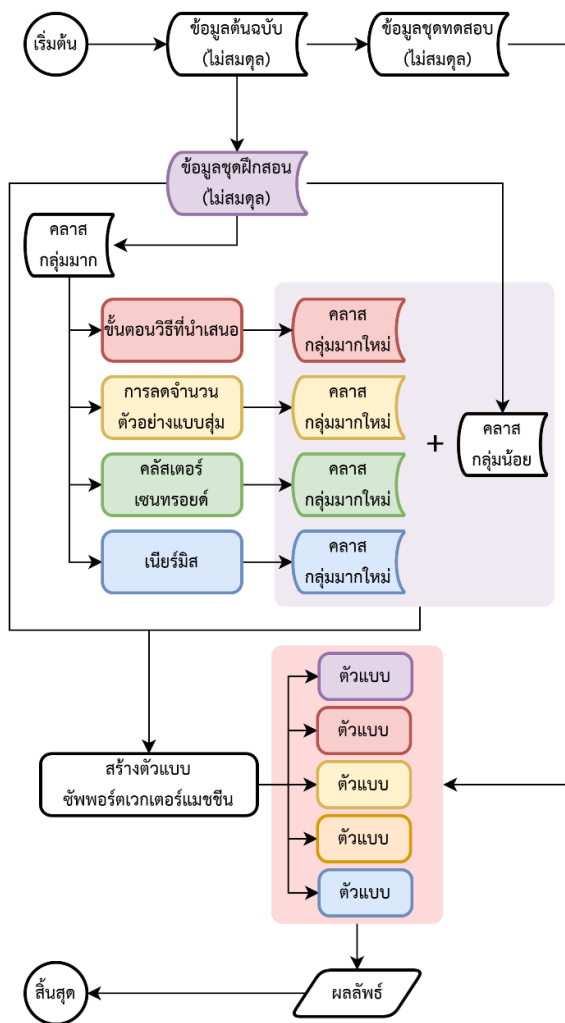
4.3) การทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่เสนอ

ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพมีดังต่อไปนี้

1. ในแต่ละชุดข้อมูล (12 ชุดข้อมูล) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ข้อมูลชุดฝึกสอน (training set) และ ข้อมูลชุดทดสอบ (testing set) ในอัตราส่วน 80:20 ซึ่งการแบ่งในครั้งนี้อัตราส่วนความไม่สมดุลระหว่างสองคลาสของข้อมูลชุดฝึกสอนและข้อมูลชุดทดสอบยังคงมีความใกล้เคียงกับข้อมูลต้นฉบับ
2. ข้อมูลชุดฝึกสอนแต่ละชุดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ คลาสกลุ่มมาก D^- และคลาสกลุ่มน้อย D^+
3. ทำการสุ่มตัวอย่างลดข้อมูลคลาสกลุ่มมาก D_{red}^- โดยใช้ขั้นตอนวิธีทั้ง 4 วิธี ได้แก่ ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ การลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม คลัสเตอร์เซนทรอยด์ และ เนียร์มิส ในขณะที่ข้อมูลคลาสกลุ่มน้อยยังคงไว้เหมือนเดิม ในกรณีของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ เราต้องการหาโบนาริเวกเตอร์ $\vec{X}^*$ ของ $f \circ \phi$ ซึ่งเซตย่อยของคลาสกลุ่มมาก คือ $D_{red}^- = \{x_i \in D^- : \vec{X}^*(i) = 1\}$ เราได้กำหนดจำนวนผลเฉลี่ยเท่ากับ 20 ผลเฉลี่ย ($m = 20$) และกำหนด β เท่ากับ 100 และเงื่อนไขในการหยุดการทำงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ คือ
 - หากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับศูนย์
 - หากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใน 350 รอบการวนซ้ำ

- หากครบรอบการวนซ้ำสูงสุด คือ 1,000 รอบการวนซ้ำ
- นำข้อมูลฝึกสอน $D_{red}^- \cup D^+$ ที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างลดในแต่ละขั้นตอนวิธี มาสร้างตัวแบบด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยใช้ 10-fold cross validation สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด และใช้ F1 score เป็นตัววัดประสิทธิภาพ
 - ประเมินประสิทธิภาพด้วยข้อมูลชุดทดสอบ และวัดผลของตัววัดประสิทธิภาพต่าง ๆ ที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.6

การทำงานโดยภาพรวมของงานวิจัยนี้ แสดงแผนผังการทำงานดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 : กระบวนการทำงานโดยภาพรวม

5) ผลการวิจัย

การหาเซตย่อยของคลาสกลุ่มมากที่เป็นตัวแทนที่เหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ สามารถแสดงออกมาในรูปแบบ

ของกราฟการกระจายของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละชุดข้อมูล ซึ่งสามารถแสดงดังตารางที่ 2 โดยที่ แกน X และ Y ของกราฟ คือ ค่าวัตถุประสงค์และรอบการวนซ้ำ ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า แต่ละชุดข้อมูลจะมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป อีกทั้งยังมีรอบการวนซ้ำที่หยุดทำงานที่แตกต่างกันด้วย

ผลการวิจัยพบว่าเมื่อนำข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านการทำสมดุลข้อมูล และข้อมูลที่ได้ผ่านการทำสมดุลข้อมูลด้วยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอและขั้นตอนวิธีอื่นอีก 3 วิธี ได้แก่ การลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม คลัสเตอร์เซนทรอยด์ และ เนียร์มิส ผลลัพธ์จากการนำชุดข้อมูลทดสอบมาทดสอบผ่านตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่ได้หาค่าพารามิเตอร์อย่างเหมาะสมจากข้อมูลชุดฝึกสอนเรียบร้อยแล้ว ผลลัพธ์ของตัววัดประสิทธิภาพต่าง ๆ ในแต่ละชุดข้อมูล (12 ชุดข้อมูล) จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 3 และได้กำหนดด้วยที่อยู่บนหัวตารางที่ 3 ให้ความหมายดังต่อไปนี้

- None หมายถึง การใส่ข้อมูลต้นฉบับลงไปโดยไม่มีการทำสมดุลข้อมูล
- CC หมายถึง วิธีการสุ่มแบบคลัสเตอร์เซนทรอยด์
- NM หมายถึง วิธีเนียร์มิส
- RUS หมายถึง วิธีการลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม
- PA หมายถึง ขั้นตอนวิธีที่รวมการทำงานของขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโบนาริอาฟ และ ขั้นตอนวิธีเคเพือนบ้านใกล้ที่สุด(ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ)

6) สรุปและอภิปรายผล

โดยปกติแล้วถ้าเรานำข้อมูลที่ไม่สมดุลมาสร้างตัวแบบทันทีจะทำให้ได้ผลลัพธ์ของการทำนายมีค่า Accuracy ที่สูงมากและส่งผลให้ Precision สูงตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันจะเห็นได้ว่าค่า Sensitivity มีค่าที่ต่ำมาก นั่นหมายความว่า ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่ถูกสร้างจากข้อมูลไม่สมดุลนั้นไม่สามารถทำนายคลาสกลุ่มน้อยได้ดีเท่าที่ควร จากผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอข้างต้น จะเห็นได้ชัดเจน ว่าขั้นตอนวิธีที่เสนอมีค่าเฉลี่ยของตัววัดประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงหลายตัววัด โดยตัววัดที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดมาเป็นอันดับหนึ่ง คือ G-mean, AUROC, AUPRC, Sensitivity และ MCC ตัววัดที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดอันดับที่สอง คือ Accuracy, F1 score, Precision และ kappa ที่เป็นเช่นนี้เพราะขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมี

การเลือกชุดข้อมูลกลุ่มย่อยที่เป็นตัวแทนที่ดีของคลาสข้อมูลกลุ่มมากโดยอิงการเลือกจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นตัวบ่งบอกว่าชุดข้อมูลกลุ่มย่อยที่เลือกมาดีไม่น้อยเพียงใด ซึ่งในการทำงานได้ทำการหาชุดข้อมูลกลุ่มย่อยที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ผลลัพธ์คือ กลุ่มข้อมูลย่อยนั้นจะมีขนาดของคลาสข้อมูลกลุ่มน้อยและคลาสข้อมูลกลุ่มมากใหม่ที่มีขนาดที่ใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งค่าของ F1 score, AUROC และ Sensitivity ก็จะดีตามไปด้วย ซึ่งกระบวนการทำงานจะแตกต่างกับวิธีการสุ่มตัวอย่างลดอีก 3 วิธี โดยวิธีการลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่มจะเน้นไปที่การสุ่มตัวอย่างแบบไม่มีเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ วิธีคลัสเตอร์เซนทรอยด์จะเน้นไปที่การหาจุดกึ่งกลางของกลุ่มเพื่อเป็นตัวแทนของคลาสข้อมูลกลุ่มมาก และ วิธีเนียร์มิสจะเน้นการหาระยะระหว่างจุดข้อมูลเพื่อหาชุดข้อมูลย่อยของคลาสข้อมูลกลุ่มมาก

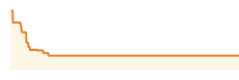
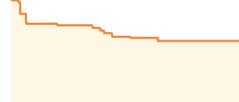
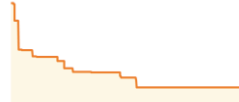
สรุปแล้วขั้นตอนวิธีที่นำเสนอที่เกิดจากการรวมการทำงานของขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโบนาริอาฟ และ ขั้นตอนวิธีเคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลจากข้อมูล 12 ชุดข้อมูลที่เหนือกว่าขั้นตอนวิธีอื่นที่นำมาเปรียบเทียบอีก 3 วิธี ได้แก่ การลดจำนวนตัวอย่างข้อมูลแบบสุ่ม คลัสเตอร์เซนทรอยด์ และ เนียร์มิส

7) ข้อเสนอแนะ

1. ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอได้ใช้เทคนิคเคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดใน การประเมินค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในการพัฒนาต่อไป อาจจะเปลี่ยนเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องเป็นวิธีอื่น ที่มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ได้ ถึงอย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบให้เหมาะสม หากตัวแบบมีความซับซ้อนมากก็จะทำให้การกำหนดพารามิเตอร์มีความยาก และท้าทายตามไปด้วย

2. สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบอื่น ๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ซึ่งการทำเช่นนี้จะทำให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ นั้นสามารถใช้ร่วมกับ เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบใดถึงทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีก็ขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลที่นำมาใช้ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2 : ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ

ชื่อชุดข้อมูล	กราฟลักษณะการสุ่มเข้าของ ค่าวัตถุประสงค์	ค่าวัตถุประสงค์ ที่ดีที่สุด (รอบที่หยุด การทำงาน)
glass1		0.0047557 (631)
Iris0	**หยุดตั้งแต่รอบการวนซ้ำแรก	0.0000000 (1)
glass-0-1-2-3_VS_4-5-6		0.0006235 (369)
ecoli2		0.0157653 (423)
glass6		0.0000000 (332)
ecoli		0.0017889 (410)
pen_digits		0.0000189 (814)
abalone		0.1069821 (993)
libras_move		0.0000000 (35)
solar_flare_m0		0.1135251 (779)
yeast_me2		0.0074181 (884)
mammography		0.0453169 (462)

ตารางที่ 3: ค่าเฉลี่ยของตัววัดประสิทธิภาพ

ตัววัด ประสิทธิภาพ	วิธีการสุ่มตัวอย่างลด				
	None	CC	NM	RUS	PA
Accuracy	0.9430 (0.0616)	0.8192 (0.1557)	0.6915 (0.2892)	0.8391 (0.1420)	0.8596 (0.1321)
F1 score	0.6370 (0.3680)	0.5957 (0.3147)	0.5047 (0.3369)	0.5996 (0.2773)	0.6255 (0.2962)
G-mean	0.6939 (0.3670)	0.8552 (0.1155)	0.7459 (0.2336)	0.8711 (0.1186)	0.8941 (0.1042)
AUROC	0.8673 (0.1348)	0.8992 (0.0980)	0.7962 (0.2369)	0.9171 (0.1030)	0.9363 (0.0812)
AUPRC	0.6807 (0.3338)	0.6708 (0.3093)	0.5739 (0.3845)	0.6554 (0.3155)	0.6978 (0.3283)
Sensitivity	0.6250 (0.3798)	0.9126 (0.1008)	0.8639 (0.1694)	0.9239 (0.0846)	0.9444 (0.0765)
Precision	0.6685 (0.3662)	0.5240 (0.3539)	0.4236 (0.3463)	0.4973 (0.3046)	0.5271 (0.3289)
MCC	0.6119 (0.3674)	0.5741 (0.3025)	0.4279 (0.4046)	0.5769 (0.2711)	0.6204 (0.2783)
kappa	0.6072 (0.3676)	0.5233 (0.3449)	0.4069 (0.3792)	0.5253 (0.3089)	0.5695 (0.3194)

หมายเหตุ : ตัวหนาขีดเส้นใต้และตัวธรรมดาขีดเส้นใต้ คือ ขั้นตอนวิธีที่มีค่าของตัววัดประสิทธิภาพสูงสุดอันดับที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และค่าที่อยู่ในวงเล็บ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

REFERENCES

- [1] S. Fotouhi, S. Asadi, and M. W. Kattan, "A comprehensive data level analysis for cancer diagnosis on imbalanced data," *J. Biomed. Inform.*, vol. 90, Feb. 2019, Art. no. 103089, doi: 10.1016/j.jbi.2018.12.003.
- [2] N. M. Mqadi, N. Naicker, and T. Adeliyi, "Solving misclassification of the credit card imbalance problem using near miss," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, Jul. 2021, Art. no. 7194728, doi: 10.1155/2021/7194728.
- [3] W. Kesornsit, V. Lorchirachoonkul, and J. Jitthavech, "Imbalanced data problem solving in classification of diabetes patients," (in Thai), *KKU Res. J. (Graduate Studies)*, vol. 18, no. 3, pp. 11–21, 2018.
- [4] A. Fernández, S. García, M. Galar, R. C. Prati, B. Krawczyk, and F. Herrera, *Learning from Imbalanced Data Sets*. Cham, Switzerland: Springer, 2018.
- [5] H. Yu, J. Ni, and J. Zhao, "ACOSampling: An ant colony optimization-based undersampling method for classifying imbalanced DNA microarray data," *Neurocomputing*, vol. 101, pp. 309–318, 2013.
- [6] V. López, I. Triguero, C. J. Carmona, S. García, and F. Herrera, "Addressing imbalanced classification with instance generation techniques: IPAD-IDE," *Neurocomputing*, vol. 126, pp. 15–28, 2014.
- [7] H.-J. Kim, N.-O. Jo, and K.-S. Shin, "Optimization of cluster-based evolutionary undersampling for the artificial neural networks in corporate bankruptcy prediction," *Expert Syst. Appl.*, vol. 59, pp. 226–234, 2016.
- [8] J. Li et al. "Adaptive swarm balancing algorithms for rare-event prediction in imbalanced healthcare data," *PloS One*, vol. 12, no. 7, 2017, Art. no. e0180830, doi: 10.1371/journal.pone.0180830.
- [9] V. Kumar and D. Kumar, "Binary whale optimization algorithm and its application to unit commitment problem," *Neural. Comput. Appl.*, vol. 32, no. 7, pp. 2095–2123, 2020.
- [10] M. M. Mafarja and S. Mirjalili, "Hybrid whale optimization algorithm with simulated annealing for feature selection," *Neurocomputing*, vol. 260, pp. 302–312, 2017.
- [11] A. G. Hussien, A. E. Hassanien, E. H. Houssein, S. Bhattacharyya, and M. Amin, "S-shaped binary whale optimization algorithm for feature selection," in *Recent Trends in Signal and Image Processing (Advances in Intelligent Systems and Computing)*, vol. 727, S. Bhattacharyya, A. Mukherjee, H. Bhaumik, S. Das, K. Yoshida Eds., Singapore, Singapore: Springer, 2019, pp. 79–87.
- [12] G. I. Sayed, A. Darwish, and A. E. Hassanien, "Binary whale optimization algorithm and binary moth flame optimization with clustering algorithms for clinical breast cancer diagnoses," *J. Classif.*, vol. 37, no. 1, pp. 66–96, 2020.
- [13] A. G. Hussien, A. E. Hassanien, E. H. Houssein, M. Amin, and A. T. Azar, "New binary whale optimization algorithm for discrete optimization problems," *Eng. Optim.*, vol. 52, no. 6, pp. 945–959, 2020.
- [14] D. W. Aha, D. Kibler, and M. K. Albert, "Instance-based learning algorithms," *Mach. Learn.*, vol. 6, no. 1, pp. 37–66, 1991.
- [15] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Mach. Learn.*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, 1995.

- [16] R. Akbani, S. Kwek, and N. Japkowicz, "Applying support vector machines to imbalanced datasets," in *Proc. Mach. Learn.: ECML 2004: 15th Eur. Conf. Mach. Learn.*, Pisa, Italy, Sep. 2004, pp. 39–50.
- [17] S. Mishra, "Handling imbalanced data: SMOTE vs. random undersampling," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 8, pp. 317–320, 2017.
- [18] The Imbalanced-learn Developers. "ClusterCentroids." IMBALANCED-LEARN.org. https://imbalanced-learn.org/stable/references/generated/imblearn.under_sampling.ClusterCentroids.html (accessed Mar. 3, 2022).
- [19] J. Zhang and I. Mani, "kNN approach to unbalanced data distributions: A case study involving information extraction," presented at ICML'2003 Workshop on Learning from Imbalanced Data Sets (II), Washington, DC, USA, Aug. 21, 2003.
- [20] A. Oriols-Puig and E. Bernadó-Mansilla, "Evolutionary rule-based systems for imbalanced data sets," *Soft Comput.* vol. 13, no. 3, pp. 213–225, 2009.
- [21] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 95, pp. 51–67, 2016.
- [22] J. S. Akosa, "Predictive accuracy: A misleading performance measure for highly imbalanced data," presented at the SAS Global Forum 2017, Orlando, FL, USA, Apr. 2–5, 2017, Paper 942–2017.
- [23] D. Chicco and G. Jurman, "The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation," *BMC Genomics*, vol. 21, no. 1, pp. 1–13, 2020.
- [24] J. Cohen, "A coefficient of agreement for nominal scales," *Educ. Psychol. Meas.*, vol. 20, no. 1, pp. 37–46, 1960.
- [25] T. Fawcett, "An introduction to ROC analysis," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 27, no. 8, pp. 861–874, 2006.
- [26] *scikit-learn 1.2.2: Precision-Recall*. (2023). [Online]. Available: https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/model_selection/plot_precision_recall.html
- [27] K. Battula, "Research of machine learning algorithms using K-fold cross validation," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 8, no. 6S, pp. 215–218, 2021.
- [28] *Imbalanced data sets*, KEEL, 2011. [Online]. Available: <http://www.keel.es/>
- [29] *fetch_datasets*, The imbalanced-learn developers, 2018. [Online]. Available: https://imbalanced-learn.org/stable/references/generated/imblearn.datasets.fetch_datasets.html

การพัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

สัพพัญญู ชูแก้ว^{1*} ประสงค์ ปราณีตพลกรัง² พายัพ ศิรินาม³

^{1*,2,3}หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สำนักบัณฑิตศึกษา
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : sappanyou@gmail.com

รับต้นฉบับ : 23 กุมภาพันธ์ 2566; รับประทานฉบับแก้ไข : 12 มีนาคม 2566; ตอบรับบทความ : 28 เมษายน 2566
เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้ส่งผลกระทบเป็นวงกว้างต่อหน่วยงานด้านความมั่นคงของประเทศ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจหาการบุกรุกทางไซเบอร์ หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการตรวจหาการบุกรุก คือ ต้องมีการรวบรวมข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์หรือมีชุดข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในหน่วยงานสำหรับใช้ในการฝึกสอน และพัฒนาโมเดลภัยคุกคามและการตรวจหาการบุกรุกทางไซเบอร์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษา รวบรวม และ วิเคราะห์ภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศ และพัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง จากนั้นจึงทำการประเมินโมเดลเพื่อหาค่าความแม่นยำที่มีต่อการตรวจหาภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศ โดยใช้เครื่องมือที่ชื่อ RapidMiner Studio ในการวิเคราะห์ ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ 5 โมเดล ได้แก่ Naïve Bayes, Decision Tree, Random Forest, Gradient Boosted Trees และ Support Vector Machines ผู้วิจัยใช้ชุดข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศซึ่งประกอบด้วยข้อมูลการโจมตีภายในเครือข่ายของกองทัพอากาศ ซึ่งมีภัยคุกคามหลักจากมัลแวร์ (malware) หรือซอฟต์แวร์ประสงค์ร้าย จำนวน 7 ประเภท รวมการโจมตีทั้งสิ้น 38,641 ข้อมูล โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์ (traffic log) ซึ่งใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในการฝึกสอนโมเดล เมื่อทำการทดลองและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โมเดลทั้งหมดแล้วจึงทำการคัดเลือกโมเดล Naïve Bayes และ Random Forest นำมาประกอบกันเพื่อปรับปรุงโมเดลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งพบว่าโมเดลแบบผสมนี้ ให้ค่าความแม่นยำ (accuracy) มากถึง 98.01% ค่าความเที่ยง (Precision) 96.07% ค่าความระลึก (Recall) 98.17% และค่าเฉลี่ย F1 (F1 Score) 97.04%

คำสำคัญ : ความแม่นยำ ภัยคุกคามทางไซเบอร์ ระบบตรวจหาการบุกรุก การเรียนรู้ของเครื่อง

Development of Cyber Threat Model in the Royal Thai Air Force Using Machine Learning

Sappanyou Chukaew^{1*} Prasong Praneetpolgrang² Payap Sirinam³

^{1*,2,3}*Master of Engineering Program in Defense Technology, Office of Graduate Studies,
Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Bangkok, Thailand*

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

Received: 23 February 2023; Revised: 12 March 2023; Accepted: 28 April 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

Current cyber threats have a wide impact on security agencies. Therefore, it is absolutely necessary to have an intrusion detection system. One of the factors that affect the efficiency of an intrusion detection is that the Royal Thai Air Force (RTAF) must have his own cyber threat dataset used in training and develop the model. Therefore, the purposes of this research were to present studying, collecting and analyzing of cyber threats within the RTAF in order to respond to cyber threats and to develop a cyber threats model by using machine learning techniques imported into the process of valuing accuracy of cyber threat detection within the RTAF by using RapidMiner Studio to analyze with five models: Naïve Bayes, Decision Tree, Random Forest, Gradient Boosted Trees and Support Vector Machines. The researchers used the cyber threat data set which consists of attacks within the RTAF network in which the main threats were caused by 7-type malicious softwares, totaling 38,642 attacks, each contains computer traffic data (Traffic Log) used as the training data for the model. The Naïve Bayes and Random Forest models were chosen to increase efficiency. Both models gave the highest accuracy of 98.01% and a detailed assessment of the mixed model (Hybrid) gave the accuracy of 98.01 %, the precision of 96.07%, the recall of 98.17 % and the mean (F1 Score) of 97.04 %.

Keywords: Accuracy, Cyber threat, Intrusion detection systems, Machine learning

1) บทนำ

ในยุคปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเครือข่ายโดยเฉพาะอินเทอร์เน็ต ทำให้เกิดภัยคุกคามรูปแบบใหม่นั้นคือ ภัยคุกคามทางไซเบอร์ (cyber threat) ที่นับวันจะทวีความรุนแรงขึ้นตามลำดับ ทำให้หน่วยงานที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญทางสารสนเทศ (Critical Information Infrastructure : CII) รวมถึงกองทัพอากาศ ได้รับผลกระทบจากภัยคุกคามทางไซเบอร์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การบุกรุกระบบเครือข่ายปัจจุบันมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งมีวิธีการหลบเลี่ยงการตรวจหาการบุกรุกจากเครื่องมือต่าง ๆ และความหลากหลายของรูปแบบการโจมตีที่ซับซ้อนขึ้น ซึ่งส่วนมากมาจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วในการประยุกต์ใช้เครือข่ายคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตในองค์กรหรือกองทัพอากาศในการทำธุรกรรมต่าง ๆ เช่น ด้านการเงิน ด้านสาธารณสุข โภค ด้านการสื่อสาร จึงทำให้ระบบวิเคราะห์และตรวจหา จำเป็นต้องพัฒนาตามไปด้วย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการบริหารจัดการข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบร้ายแรงและป้องกันการถูกโจมตีจากภัยคุกคามทางไซเบอร์

กองทัพอากาศจึงได้ให้ความสำคัญ ด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ (cybersecurity) เป็นอย่างมากโดยสามารถเห็นได้จากแผนยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2560 – 2579) ในส่วนของมิติไซเบอร์ (cyber domain) กองทัพอากาศได้เล็งเห็นถึงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารด้านเครือข่ายและอินเทอร์เน็ตนั้น ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ภัยคุกคามทางไซเบอร์ก็ได้มีการพัฒนาในรูปแบบที่หลากหลายและรุนแรงมากยิ่งขึ้น จึงได้มีการนำระบบการตรวจหาการบุกรุก (Intrusion Detection System: IDS) [1]–[7] คือ ระบบในการตรวจสอบการใช้งานคอมพิวเตอร์และระบบเครือข่ายที่มีจุดประสงค์ร้าย (malicious information) ที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อความถูกต้องของข้อมูล ความสามารถในการให้บริการของระบบ หรือความน่าเชื่อถือขององค์กร ระบบตรวจหาการบุกรุกนั้นแบ่งออกได้เป็นประเภท ดังนี้ 1) ระบบการตรวจสอบการบุกรุกประเภทโฮสต์เบส (Host-based IDS) คือระบบตรวจจับการบุกรุกที่ถูกติดตั้งลงบนระบบคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบข้อมูลทั้งเข้าและออกจากคอมพิวเตอร์ ตรวจหาการทำงานของกระบวนการ เพื่อแจ้งเตือนและบันทึกข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์ (traffic log) [8] เมื่อเกิดการบุกรุก หรือ ภัยคุกคาม 2) ระบบตรวจจับการบุกรุกเครือข่าย (Network-based IDS) คือระบบตรวจจับ

การบุกรุกภายในเครือข่ายว่ามีการใช้งานเครือข่ายที่เป็นการประสงค์ร้ายหรือไม่ โดยการตรวจจับการบุกรุกประเภทนี้จะตรวจสอบข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์ภายในระบบเครือข่ายที่ส่งไปมา เพื่อมาตรวจสอบค้นหารูปแบบที่น่าสงสัย และแจ้งเตือนในการระงับการบุกรุกนั้น

จากการตรวจหาภัยคุกคามทางไซเบอร์ผ่านระบบการตรวจหาการบุกรุกทางไซเบอร์ ทางผู้วิจัยได้นำชุดข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมชุดข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศมาจัดทำเป็นชุดข้อมูล (dataset) เพื่อนำมาทำการตรวจสอบหาค่าความแม่นยำภัยคุกคามทางไซเบอร์ ผ่านเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) ซึ่งก็คือรูปแบบหนึ่งของการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดำเนินการวิเคราะห์ด้วยโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องที่ตั้งอยู่บนรากฐานแนวคิดที่ว่า ระบบนั้นสามารถที่จะเรียนรู้และมีปฏิสัมพันธ์กับชุดข้อมูลต่าง ๆ รวมถึงสามารถระบุและทราบรูปแบบภัยคุกคามที่เกิดขึ้นได้ และนำไปสู่การตัดสินใจ

เทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง [2], [4] นั้น สามารถถูกแบ่งออกเป็นการเรียนรู้ได้เป็น 2 แบบ ดังนี้ 1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) คือการเรียนรู้ โดยมีชุดข้อมูลที่ทำให้คอมพิวเตอร์รู้จักข้อมูลที่น่าเข้าไป เมื่อใส่ข้อมูลเข้าไปจะทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด (split test) คือ ชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนหรือข้อมูลชุดเรียนรู้ (training set) และชุดข้อมูลทดสอบ (testing set) เพื่อให้คอมพิวเตอร์แยกแยะตามประเภทข้อมูล หลังจากนั้นเราก็นำข้อมูลมาให้คอมพิวเตอร์ตรวจสอบ แล้วให้ตอบบอกว่าคืออะไร คอมพิวเตอร์ก็ตรวจจากประเภทข้อมูลใส่ไปให้ และสามารถนำเข้ากระบวนการทำนายผล (prediction) ต่อไป 2) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) จะตรงข้ามกับการเรียนรู้แบบมีผู้สอน คือไม่มีข้อมูลมาฝึกสอน แต่ต้องแยกแยะข้อมูลเองโดยใช้ข้อมูลที่ซ้ำกันมาใส่รวมกันจนได้ผลลัพธ์ออกมา โมเดลที่ใช้กันคือ K Nearest Neighbour และ K Mean

ในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ประเภทของการเรียนรู้ของเครื่องแบบการเรียนรู้แบบมีผู้สอน โดยการสร้างชุดข้อมูลฝึกสอนและนำชุดข้อมูล โดยนำชุดข้อมูลทดสอบนำเข้ากระบวนการทำนายผล เพื่อหาค่าความแม่นยำการตรวจหาภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศ โดยใช้งานเครื่องมือที่ชื่อ RapidMiner Studio ใช้โมเดล (model) ในการวิเคราะห์ 5 โมเดล ได้แก่ Naïve Bayes, Decision Tree, Random Forest, Gradient Boosted Trees และ Support Vector Machines เป็นต้น [9],

[10] โดยโปรแกรม Rapid Miner เป็นชุดซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่ศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้งานด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูล (data science) และสามารถใช้สำหรับการเตรียมข้อมูล การเรียนรู้เครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก การทำเหมืองข้อความ และการวิเคราะห์การทำนาย (predictive analysis) โดยเหตุผลสำคัญที่ผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือดังกล่าว เพื่อเป็นการเปิดโอกาสให้ผู้ปฏิบัติงานด้านไซเบอร์ของกองทัพอากาศสามารถนำไปใช้งานได้ทันที และลดช่องว่างทางทักษะ (skill gap) ในการเตรียมเครื่องมือเพื่อรองรับภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทำการศึกษารวบรวม และวิเคราะห์ภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่มีต่อกองทัพอากาศ
2. เพื่อพัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) ภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทำการศึกษารวบรวม และวิเคราะห์ประเภทของภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศผ่านการตรวจสอบหลักฐานการโจมตีที่เกิดขึ้นจากชุดข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งกองทัพอากาศได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากชุดซอฟต์แวร์ Deep Instinct [11] ซึ่งถูกติดตั้งบนเครื่องลูกข่ายของกองทัพอากาศ ซึ่งหน้าที่รวบรวมข้อมูลภัยคุกคาม โดยผลการวิเคราะห์พบว่า จากข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระยะเวลาเก็บรวบรวมข้อมูลในรอบ 1 ปี (พ.ศ.2564) ในขั้นตอนตรวจสอบภัยคุกคามทางไซเบอร์ จำนวน 7 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 1 ประกอบด้วย

- การโจมตีประเภท Backdoor
- การโจมตีประเภท Dropper
- การโจมตีประเภท Potentially Unwanted Applications (PUA)
- การโจมตีประเภท Ransomware
- การโจมตีประเภท Spyware
- การโจมตีประเภท Virus
- การโจมตีประเภท Worm

ตารางที่ 1 : แสดงประเภทและจำนวนการโจมตีทางไซเบอร์ต่อกองทัพอากาศซึ่งถูกเก็บรวบรวมข้อมูลผ่านซอฟต์แวร์ Deep Instinct ในช่วงปี พ.ศ.2564

ประเภทการโจมตี	จำนวน	อัตราส่วน
Backdoors	2,083	5.39%
Dropper	11,870	30.72%
PUA	10,227	26.47%
Ransomware	2,297	5.94%
Spyware	3,821	9.89%
Virus	7,461	19.31%
Worm	882	2.28%
รวมทั้งสิ้น	38,641	100.00%

ซึ่งการโจมตีทั้งหมดนั้น ถือเป็นการโจมตีที่อยู่ในประเภทมัลแวร์ (malware) หรือซอฟต์แวร์ประสงค์ร้าย (malicious software) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายตั้งแต่ระดับเล็กน้อย เช่น ก่อให้เกิดความรำคาญต่อผู้ใช้ ไปจนถึงเกิดความเสียหายระดับร้ายแรง กล่าวคือ อาจทำให้เป็นช่องทางในการเข้ามจารกรรมข้อมูลที่มีความสำคัญต่อประเทศชาติ รวมถึงเป็นช่องทางในการโจมตีเพื่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบงานด้านยุทธการของกองทัพ

จากผลการศึกษาดังกล่าว ทำให้ทราบถึงประเภทภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่มีต่อกองทัพอากาศ และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องต่อไป

3.2) พัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

หลังจากที่ผู้วิจัยเริ่มต้นจากการศึกษารวบรวม และวิเคราะห์ประเภทของภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำข้อมูลที่ได้ไปเพื่อพัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเพื่อศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์การเรียนรู้ของเครื่อง ในการพัฒนาระบบตรวจหาการบุกรุก [2]–[7] รวมถึงการวิเคราะห์อัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ ว่ามีข้อดี-ข้อเสียอย่างไร [10], [12], [13] และปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดลอย่างไร เพื่อนำข้อมูลมาสรุปวิเคราะห์ และออกแบบพัฒนาโมเดลประเภท

ปรับตัวด้านภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้อย่างถูกต้องโดยประกอบ
ด้วยขั้นตอนต่าง ๆ [3], [14]–[16] แสดงดังรูปที่ 1

รูปที่ 2 : ภาพรวมจัดเตรียมชุดข้อมูล

3.2.2) การเตรียมข้อมูล (Data Preparation) เมื่อจัดเตรียม
ชุดข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมชุดข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์
ภายในกองทัพอากาศ จำนวน 38,642 ข้อมูล แสดงผลลัพธ์ที่
นำมาคำนวณจากชุดข้อมูล [17] ดังตารางที่ 2 โดยใช้งานโปรแกรม
RapidMiner Studio [18], [19] สำหรับขั้นตอนการตรวจสอบ
และประเมินประสิทธิภาพ โดยเริ่มจากการนำข้อมูลชุดฝึกฝนเข้า
สู่โปรแกรมโดยกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการทำนายเป็นฉลาก
หรือป้าย (label) ในที่นี้ได้รับเป็นในส่วนประเภทของภัยคุกคาม
ทางไซเบอร์ที่อยู่ในฟีเจอร์ที่ชื่อ Deep Classification

รูปที่ 1 : ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและการออกแบบการทดลอง 5 ขั้นตอน [7]

จากรูปที่ 1 สามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และ
การออกแบบการทดลองได้ดังต่อไปนี้

3.2.1) ชุดข้อมูล (Dataset) ในการพัฒนาโมเดลภัยคุกคาม
ทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง
ผู้วิจัยได้ดำเนินการนำผลการศึกษาภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายใน
กองทัพอากาศ เพื่อนำมาพัฒนาโมเดลที่มีความเหมาะสมโดย
เริ่มต้นในการเตรียมชุดข้อมูลเพื่อฝึกสอนโมเดล ซึ่งในงานวิจัยนี้
ได้จัดเตรียมชุดข้อมูลดังรูปที่ 2 โดยมีขั้นตอนการรวบรวมดังนี้
1) ดักจับข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์ [8] จากอุปกรณ์
ภายในกองทัพอากาศ 2) นำข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์
[8] เข้าวิเคราะห์ระบบตรวจหาผู้บุกรุก เพื่อเป็นข้อมูลตั้งต้นใน
การเตรียมชุดข้อมูล 3) ทำการจัดทำข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน
(normalization) 4) จำแนกข้อมูลภัยคุกคาม (classification)
จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้ชุดข้อมูลเพื่อนำมาทำการ
ตรวจสอบหาค่าความแม่นยำภัยคุกคามทางไซเบอร์ [1], [12]

ตารางที่ 2 : แสดงผลลัพธ์สำหรับชุดข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายใน

กองทัพอากาศ	
Feature	Usage
Status	



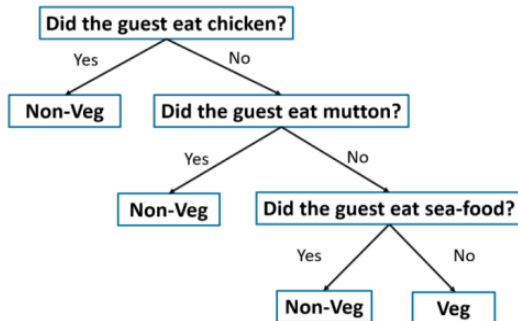
ตารางที่ 2 : แสดงผลลัพธ์สำหรับชุดข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายใน

กองทัพอากาศ (9jv)

Feature	Usage
---------	-------

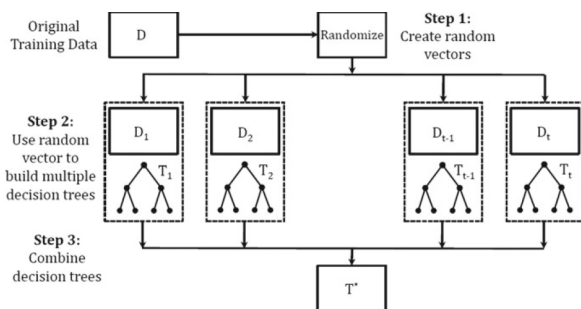
MAC Address

จำแนกประเภท Decision Tree มักใช้เทคนิคการแบ่งกิ่งหลังที่ประเมินประสิทธิภาพของแผนผังการตัดสินใจ เนื่องจากถูกแบ่งโดยใช้ชุดการตรวจสอบความถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 4 [5], [12]



รูปที่ 4 : การทำงานของ Decision Tree [12]

3.2.4.3) *Random Forest* [21] คือโมเดลที่มีอัลกอริทึมที่นำ Decision Tree หลาย ๆ Tree มา Train ร่วมกัน (ตั้งแต่ 10 ต้น ถึง มากกว่า 1000 ต้น) โดยที่แต่ละ Tree จะได้รับ Feature และ Data เป็น Subset ของ Feature และ Data ทั้งหมดแบบ Random ตอนทำ Prediction ก็ให้แต่ละ Decision Tree ทำ Prediction ของแต่ละอัน และเลือกผล Final Prediction จากค่า Prediction ที่ได้รับการโหวตมากที่สุดแสดงดังรูปที่ 5

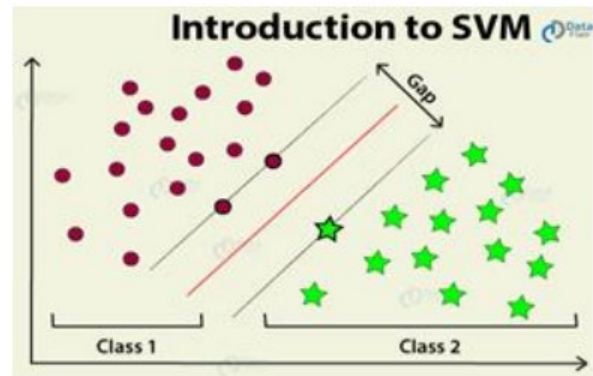


รูปที่ 5: การทำงานของ Random Forest [21]

3.2.4.4) *Gradient Boosted Trees* [14] คือ โมเดลที่มีอัลกอริทึมที่มีพื้นฐานมาจาก Decision Tree ซึ่งเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดลให้มีความสูงขึ้น โดยการสุ่มสร้าง Decision Tree หลายร้อยโมเดล และประเมินผลแต่ละโมเดลจนกว่าจะได้ *Decision Tree* ที่สมบูรณ์

3.2.4.5) *Support Vector Machines* [4], [9] คือโมเดลที่มีอัลกอริทึมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและจำแนกข้อมูลโดยอาศัยหลักการของการหาสมมติของสมการเพื่อสร้างเส้นแบ่งแยก

กลุ่มข้อมูลที่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการฝึกฝนให้ระบบเรียนรู้ โดยเน้นไปยังเส้นแบ่งแยกและกลุ่มข้อมูล แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 : การทำงานของ Support Vector Machine [12]

3.2.5) *การประเมินตัวโมเดล (Model Evaluation)* เมื่อผ่านขั้นตอนการสร้างโมเดลเรียบร้อยแล้วจะนำผลการทำนายเข้ากระบวนการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบโดยพิจารณาจากค่าความแม่นยำ [13] ดังสมการที่ 2 ค่าความเที่ยง ดังสมการที่ 3 ค่าความระลึก ดังสมการที่ 4 และค่าเฉลี่ย F1 ของ ค่าความเที่ยง และ ค่าความระลึก ดังสมการที่ 5 [15]

$$Accuracy = \frac{TN+TP}{TP + FP + TP+FN} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (4)$$

$$F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

โดยที่ TP คือ ข้อมูลที่ทำนายถูกต้องเมื่อเทียบกับเฉลย

FP คือ ข้อมูลที่ทำนายแล้วไม่ถูกต้องเมื่อเทียบกับเฉลย

FN คือ ข้อมูลที่อยู่ในเฉลยแต่ไม่มีการทำนาย (ตรงข้ามกับ FN)

Precision คือ ค่าความเที่ยงเกิดจากการนำค่า TP มาเทียบกับ FP

Recall คือค่าความระลึกเกิดจากการนำค่า TP มาเทียบกับ FN

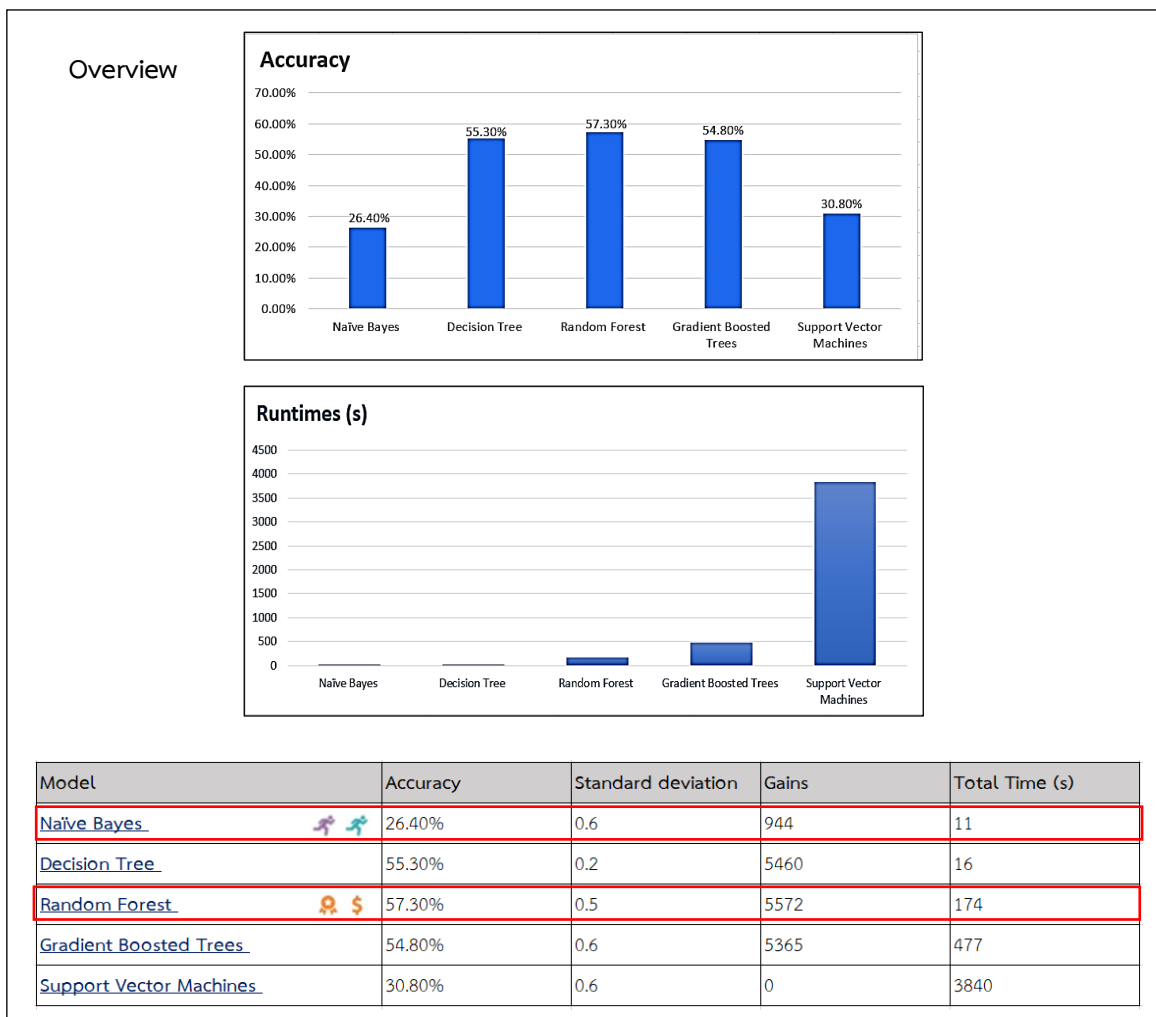
F1 Score คือ ค่าเฉลี่ยของ ค่าความเที่ยง และค่าความ

ระลึก

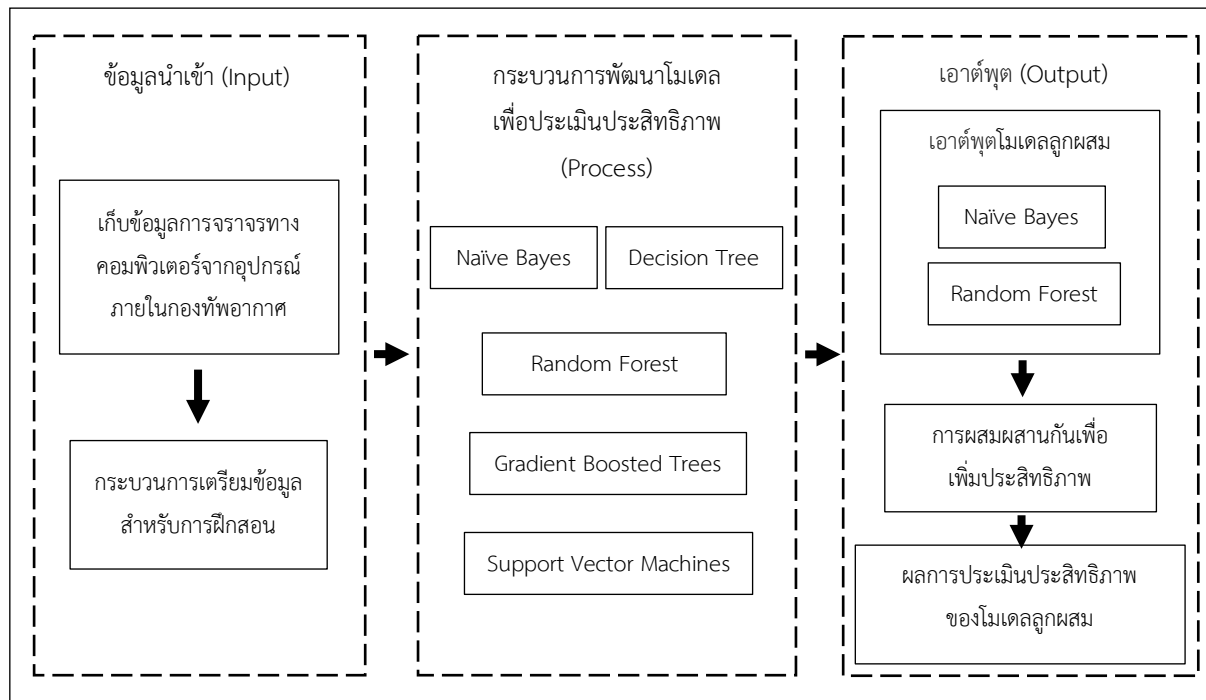
4) ผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ที่ได้ทำการศึกษา รวบรวม และ วิเคราะห์ภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่มีต่อกองทัพอากาศนั้น ผู้วิจัยได้ รวบรวมชุดข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศ จำนวน 38,642 ข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพ โดยใช้ ทั้ง 5 โมเดล ได้แก่ Naïve Bayes โดยมีค่าความแม่นยำ 26 % โดยใช้เวลารวมในการทดสอบ 11 วินาที, Decision Tree โดยมีค่าความแม่นยำ 55.3 % โดยใช้เวลารวมในการทดสอบ 16 วินาที, Random Forest โดยมีค่าความแม่นยำ 57.3 % โดยใช้เวลารวมใน

การทดสอบ 2 นาที 54 วินาที, Gradient Boosted Trees Forest โดยมีค่าความแม่นยำ 54.8 % โดยใช้เวลารวมในการทดสอบ 7 นาที 52 วินาที และ Support Vector Machines โดยมีค่าความแม่นยำ 30.8 % โดยใช้เวลารวมในการทดสอบ 1 ชั่วโมง 4 นาที แสดงดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าโมเดล Naïve Bayes มีค่าที่ดีที่สุดคือ Fastest Scoring Time และ Fastest Total Time ในส่วน โมเดล Random Forest มีค่าที่ดีที่สุดคือ Best Performance และ Best Gain



รูปที่ 7 : ผลการประเมินภาพรวมประสิทธิภาพของทั้ง 5 โมเดล

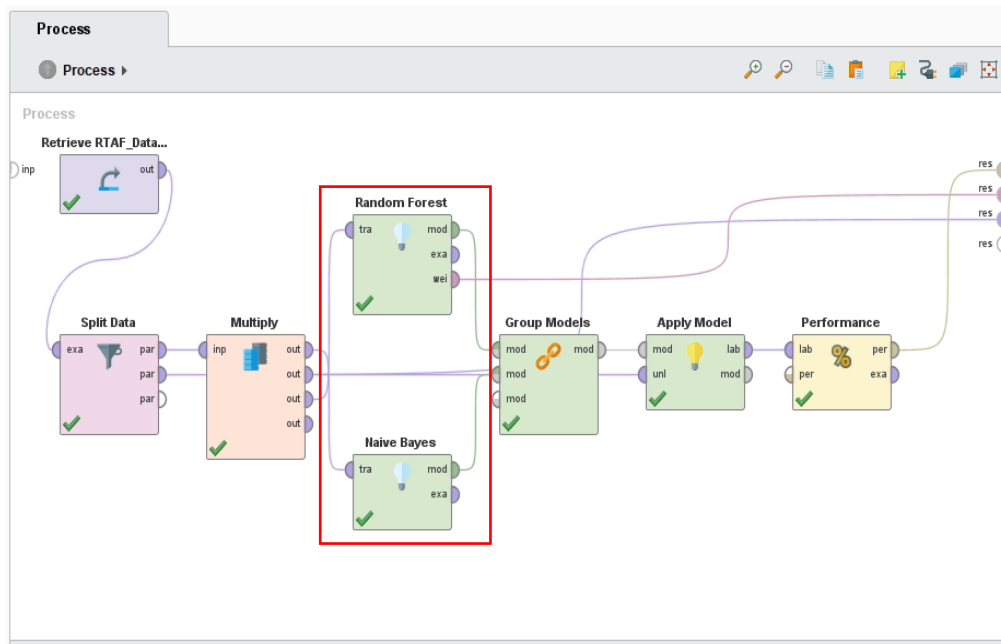


รูปที่ 8 : กระบวนการพัฒนาโมเดลลูกผสม

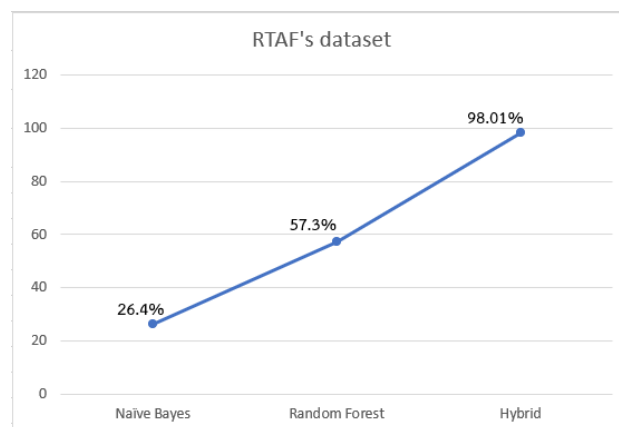
นอกจากนั้น จากวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 เพื่อพัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องนั้น ผู้วิจัยได้พัฒนาโมเดลลูกผสม (hybrid) [16] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาค่าความแม่นยำการตรวจหาภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศ รูปที่ 8 แสดงถึงกระบวนการพัฒนาโมเดลลูกผสม ซึ่งการสรุปแนวทางในการพัฒนาโมเดลซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 การจัดการข้อมูลนำเข้า ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์ และหาภัยคุกคามที่ส่งผลต่อกองทัพอากาศและเก็บรวบรวมข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์จากอุปกรณ์ภายในกองทัพอากาศ และทำการเตรียมข้อมูล เพื่อให้พร้อมสำหรับกระบวนการฝึกสอนโมเดล ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการพัฒนาโมเดลเพื่อประเมินประสิทธิภาพ โดยขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบในการฝึกสอนโมเดลจำนวน 5 โมเดล ในขั้นต้นจากนั้นทดสอบรูปแบบการใช้ประโยชน์จากโมเดลต่าง ๆ ตั้งแต่การใช้โมเดลเดี่ยว (1 โมเดลต่อการประเมิน) และการใช้โมเดลแบบลูกผสม (การผสมผสานโมเดล 2 โมเดล) เพื่อทำการวิเคราะห์หาแบบที่มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยผลการทดสอบพบว่าจากการทดสอบ ทั้งในทุก ๆ ความเป็นไปได้ พบว่ารูปแบบ

ของโมเดลที่มีความเหมาะสม คือ การใช้โมเดลลูกผสมจำนวน 2 โมเดล คือ Naive Bayes และ Random Forest ซึ่งให้ประสิทธิภาพของการตรวจจับการบุกรุกสูงสุดจากผลการทดลองซึ่งรูปแบบโมเดลแบบผสมดังกล่าว เป็นเอาต์พุตที่สำคัญที่กองทัพอากาศสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบของการสร้างโมเดล รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดลได้ในอนาคต โดยการพัฒนาต่อยอดสามารถทำการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ RapidMiner Studio ที่มีความสะดวก รวดเร็ว ต่อการพัฒนาโมเดล รวมถึงลดช่องว่างด้านทักษะของผู้พัฒนาที่ไม่จำเป็นต้องเชี่ยวชาญด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์มากนัก ดังแสดงรูปที่ 9

ทั้งนี้ เมื่อนำมาผสมผสานกันจนเป็นลูกผสมของทั้งสองโมเดลแล้วจะพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องได้สูงสุดอยู่ที่ 98.01% ดังแสดงในรูปที่ 10 และมีรายละเอียดของการประเมินโมเดลลูกผสมดังแสดงโดยละเอียดในตารางที่ 3 ที่แสดงผลโดยละเอียดผ่าน Confusion Matrix และเมื่อสรุปผลในภาพรวมพบว่าโมเดลดังกล่าวสามารถให้ค่าความแม่นยำมากถึง 98.01% ค่าความเที่ยง 96.07% ค่าความระลึก 98.17% และ ค่าเฉลี่ย F1 97.04% ตามลำดับ สรุปไว้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4



รูปที่ 9: โมเดลลูกผสมของ Naive Bayes และ Random Forest ในซอฟต์แวร์ RapidMiner Studio



รูปที่ 10 : กราฟแสดงประสิทธิภาพของโมเดลลูกผสม

ตารางที่ 3 : ผลการแสดงผลการประเมินผลลัพท์การทำนายผ่าน Confusion Matrix

Accuracy : 98.01%								
	True Worm	True Backdoor	True PUA	True Virus	True Dropper	True Spyware	True Ransomware	Class Precision
Pred. Worm	614	15	3	3	12	2	1	94.32%
Pred. Backdoor	1	1395	24	8	51	7	8	93.37%
Pred. PUA	1	2	7083	7	32	7	6	99.23%
Pred. Virus	0	0	28	5184	61	8	5	98.07%
Pred. Dropper	0	0	0	0	8002	0	0	100.00%
Pred. Spyware	0	3	10	18	42	2647	3	97.21%
Pred. Ransomware	1	43	11	3	108	4	1585	90.31%
Class recall	99.51%	95.68%	98.94%	99.25%	96.31%	98.95%	98.57%	

ตารางที่ 4 : ผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลลูกผสม

Model	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 (%)
Hybrid	98.01	96.07	98.17	97.04

5) อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยในการทดสอบเพื่อหาโมเดลที่มีความเหมาะสมในการรับมือต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศพบว่า การผสมผสานโมเดล 2 ประเภทได้แก่ Naïve Bayes และ Random Forest สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจหาภัยคุกคามได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการใช้งานโมเดลเพียงชนิดเดียว มากไปกว่านั้น การเลือกใช้ Naïve Bayes และ Random Forest มีความโดดเด่นในแง่ของสถาปัตยกรรมโมเดลที่ไม่ซับซ้อนมากเกินไป อันส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการฝึกฝนหรือฝึกสอนโมเดล และใช้ทรัพยากรในการประมวลผลที่น้อย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ในหน่วยงานทุกระดับ โดยเฉพาะในกองทัพอากาศ รวมถึงสามารถลดข้อจำกัดด้านเวลาในการฝึกฝนข้อมูลการโจมตีในรูปแบบใหม่เพื่อให้โมเดลมีความพร้อมสำหรับรับมือกับการถูกโจมตีจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่เกิดขึ้นใหม่อยู่ตลอดเวลา

6) สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ทำการศึกษา รวบรวม และวิเคราะห์ภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศสำหรับรับมือกับภัยคุกคามทางไซเบอร์ จากชุดข้อมูลที่ได้จากการศึกษา รวบรวม และวิเคราะห์ จากนั้นได้จัดทำเตรียมชุดข้อมูล สำหรับการตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพ โดยเริ่มจากการกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการทำนายเป็นผลาก หรือป้าย ในที่นี้ระบุเป็นในส่วนของชนิดของภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่อยู่ในพีเจอร์ชื่อ Deep Classification จากนั้นนำชุดข้อมูลทำการหาค่าความแม่นยำ โดยใช้โมเดลในการวิเคราะห์ 5 โมเดล ได้แก่ Naïve Bayes, Decision Tree, Random Forest, Gradient Boosted Trees และ Support Vector Machines 2) พัฒนาโมเดลประเภทปรับตัวด้านภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่สามารถส่งเสริมการพึ่งพาตนเอง และรักษาอธิปไตยไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศ โดยคัดเลือกโมเดล Naïve Bayes ที่มีค่าที่ดีที่สุดคือ Fastest Scoring Time และ Fastest Total Time และ โมเดล Random Forest มีค่าที่ดีที่สุดคือ Best Performance และ Best Gain นำมาผสมเพื่อ

เพิ่มประสิทธิภาพโดยเมื่อผสมโมเดลทั้งสองชนิดแล้วให้ค่าความแม่นยำสูงสุดที่ 98.01 % ความเที่ยง 96.07 % ค่าความระลึก 98.17 % และ ค่าเฉลี่ย F1 97.04 %

7) ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการศึกษาเฉพาะการโจมตีประเภทหลักที่มีต่อเครือข่ายภายในของกองทัพอากาศ ดังนั้น โมเดลจึงถูกสร้างให้มีความเหมาะสมกับประเภทภัยคุกคามเฉพาะด้านเท่านั้น
- 2) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาโมเดลแบบผสมผสานที่เป็นลูกผสม ในการนำไปใช้งานจึงมีความจำเป็นที่ต้องรู้ประเภทของภัยคุกคามล่วงหน้าสำหรับเตรียมฝึกฝนโมเดลให้มีความเหมาะสม ดังนั้น หากมีการโจมตีผ่านช่องโหว่ที่ยังไม่เคยถูกตรวจพบมาก่อน (zero-day attacks) อาจต้องทำการพัฒนาโมเดลให้เป็นแบบปรับตัวได้

8) ข้อเสนอแนะ

จากที่ได้ทำการวิจัยการพัฒนาโมเดลภัยคุกคามทางไซเบอร์ในกองทัพอากาศด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

8.1) ข้อเสนอแนะทั่วไป

1. เนื่องจากข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์มีการพัฒนารูปแบบวิธีการโจมตีที่รวดเร็ว การศึกษา รวบรวม และวิเคราะห์ภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายในกองทัพอากาศนั้น ควรมีการทำให้ข้อมูลเป็นปัจจุบันอยู่เสมอ
2. ในการพัฒนาโมเดล สามารถนำโมเดลที่อัปเดตของเครื่องมือที่ใช้มาทำการทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการหาค่าความแม่นยำได้
3. ให้ความสำคัญในการเก็บชุดข้อมูลจริงเพราะมีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ สำหรับการตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพค่าความแม่นยำของงานวิจัย

8.2) ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการโจมตีมีรูปแบบที่เฉพาะและหลากหลายเพิ่มมากยิ่งขึ้นในปัจจุบัน อีกทั้งยังมีการโจมตีทางไซเบอร์ที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์อีกด้วย ดังนั้น การตรวจหาภัยคุกคามทางไซเบอร์ภายใต้การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (big data) จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องดำเนินการ

2. กระบวนการในการพัฒนาความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ที่มีประสิทธิภาพนั้น นอกเหนือจากมีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงแล้ว สิ่งที่สำคัญคือการศึกษาวิจัยและพัฒนาทักษะความตระหนักรู้ทางไซเบอร์ให้แก่บุคลากร เพื่อเป็นการป้องกันตั้งแต่ต้นทางก็จะช่วยลดความเสี่ยงต่อองค์กรได้ ดังนั้น การศึกษาและวิจัยในการสร้างความตระหนักรู้ด้านไซเบอร์จึงต้องทำควบคู่กันไป

3. การวิจัยแบบผสมผสานในเชิงจิตวิทยาไซเบอร์ (cyber psychology) รวมทั้งกรรมวิธีการเปลี่ยนทัศนคติและสร้างวัฒนธรรมทางไซเบอร์ที่ยั่งยืนในระดับบุคคลหน่วยงานให้เกิดภูมิคุ้มกัน และมีจริยธรรมทางไซเบอร์ ทั้งนี้เพื่อสร้างความพร้อมในการรับมือกับภัยคุกคามทางไซเบอร์ อีกทั้งยังทำให้บุคคลและหน่วยงานมีขีดความสามารถด้านไซเบอร์ ในอันที่จะป้องกันต่อต้าน ตรวจจับ และตอบสนองต่อการบุกรุก การจารกรรม หรือการหลอกลวง ที่จะทำให้เกิดความเสียหายได้ ผู้วิจัยจึงมองว่าควรทำวิจัยให้เป็นแบบสหวิทยาการต่อไปในอนาคต

8.3) ข้อเสนอเกี่ยวกับความสมดุลของข้อมูล

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า ชุดข้อมูลดังกล่าวเมื่อพิจารณาตามประเภทของการโจมตี (class of attack) จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝนมีความแตกต่าง และไม่สมดุลกัน (imbalance) เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มาจากการเก็บข้อมูลการโจมตีจริง ไม่ได้เกิดจากการจำลองขึ้นมา ดังนั้นจำนวนครั้งของการโจมตี จึงบ่งบอกถึงความถี่ของภัยคุกคามนั้น ผู้วิจัยตระหนักดีถึงปัญหาที่อาจเกิดจากข้อมูลที่ไม่สมดุลอาจกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของโมเดลและการแปลความในแง่ประสิทธิภาพของโมเดล แต่ในกรณีนี้จะเห็นว่า ข้อมูลของคลาสที่มีจำนวนน้อยที่สุดมีจำนวนถึง 882 ข้อมูล ซึ่งมากเพียงพอต่อการฝึกสอนโมเดลให้สามารถจำแนกประเภทการโจมตีดังกล่าว ดังจะเห็นได้จากค่าความแม่นยำ 90% สำหรับการตีความเรื่องประสิทธิภาพ ผู้วิจัยตระหนักดีว่า นอกเหนือจากการตีความในภาพรวมของโมเดลที่เป็นค่าความแม่นยำแล้ว ที่อาจได้รับผลเชิงบวกจากประเภทการโจมตีอื่น ๆ ที่มีจำนวนข้อมูลฝึกฝนที่มากกว่า ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอข้อมูลผลการแสดงการประเมินผลลัพธ์การทำนายผ่าน Confusion Matrix เพื่อเป็นข้อมูลอย่างละเอียดให้แก่ผู้ใช้นาโมเดลดังกล่าวไปใช้งานต่อ

REFERENCES

- [1] D. Kapil, N. Mehra, A. Gupta, S. Maurya, and A. Sharma, "Network security: Threat model, Attacks, and IDS using machine learning," in *Int. Conf. Artif. Intell. and Smart Syst. (ICAIS)*, Coimbatore, India, 2021, pp. 203–208.
- [2] U. S. Musa, S. Chakraborty, M. M. Abdullahi, and T. Maini, "A review on intrusion detection system using machine learning techniques," in *Int. Conf. Comput., Commun., and Intell. Syst. (ICCCIS)*, Greater Noida, India, 2021, pp. 541–549.
- [3] F. Hossain, M. Akter, and M. N. Uddin, "Cyber Attack Detection Model (CADM) based on machine learning approach," in *2nd Int. Conf. Robotics, Elect. and Signal Process. Techn. (ICREST)*, Dhaka, Bangladesh, 2021, pp. 567–572.
- [4] A. Halimaa and K. Sundarakantham, "Machine learning based intrusion detection system," in *3rd Int. Conf. Trends in Electron. and Inform. (ICOEI)*, Tirunelveli, India, 2019, pp. 916–920.
- [5] S. Biswas, "Intrusion detection using machine learning: A comparison study," *Int. J. Pure Appl. Math.*, vol. 118, no. 19, pp. 101–114, Feb. 2018.
- [6] F. Y. Osisanwo, J. E. T. Akinsola, O. Awodele, J. O. Hinmikaiye, O. Olakanmi, and J. Akinjobi, "Supervised machine learning algorithms: Classification and comparison," *Int. J. Comput. Trends Technol. (IJCTT)*, vol. 48, no. 3, pp. 128–138, Jun. 2017, doi: 10.14445/22312803/IJCTT-V48P126.
- [7] A. Handa, A. Sharma, and S. K. Shukla, "Machine learning in cybersecurity: A review," *WIREs Data Mining and Knowl. Discovery*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.1002/widm.1306.
- [8] C. G. Cordero, E. Vasilomanolakis, A. Wainakh, M. Mühlhäuser, and S. N. Tehrani, "On generating network traffic datasets with synthetic attacks for intrusion detection," *ACM Trans. Privacy Secur. (TOPS)*, vol. 24, no. 2, pp. 1–39, Dec. 2020.
- [9] R. -F. Hong, S. -C. Horng, and S. -S. Lin, "Machine learning in cyber security analytics using NSL-KDD Dataset," in *Int. Conf. Technol. and Appl. Artif. Intell. (TAAI)*, Taichung, Taiwan, 2021, pp. 260–265.
- [10] A. O. David and U. J. Joseph, "A novel immune inspired concept with neural network for intrusion detection in cybersecurity," *Int. J. Appl. Inf. Syst. (IJASIS)*, vol. 12, no. 30, pp. 13–17, Jun. 2020.
- [11] A. Mathew, "Cybersecurity infrastructure and security automation," *Adv. Comput.: An Int. J. (ACIJ)*, vol. 10, no. 6, pp. 1–7, 2019.

- [12] B. Mahesh, "Machine Learning Algorithms - A Review," *Int. J. Sci. and Res. (IJSR)*, vol. 9, no. 1, pp. 381–386, Jan. 2020.
- [13] S. Bagui, E. Kalaimannan, S. Bagui, D. Nandi, and A. Pinto, "Using machine learning techniques to identify rare cyber-attacks on the UNSW-NB15 dataset," *Secur. Privacy*, vol. 2, no. 6, 2019, doi: 10.1002/spy2.91.
- [14] D. Upadhyay, J. Manero, M. Zaman, and S. Sampalli, "Gradient boosting feature selection with machine learning classifiers for intrusion detection on power grids," *IEEE Trans. Netw. Service Manag.*, vol. 18, no. 1, pp. 1104–1116, Mar. 2021, doi: 10.1109/TNSM.2020.3032618.
- [15] N. F. Rusland, N. Wahid, S. Kasim, and H. Hafit, "Analysis of naïve bayes algorithm for email spam filtering across multiple datasets," in *Proc. Int. Res. Innov. Summit (IRIS2017)*, Melaka, Malaysia, May 2017, doi: 10.1088/1757-899X/226/1/012091.
- [16] Y. Hamid, M. Sugumaran, and V. Balasaraswathi, "IDS using machine learning - current state of art and future directions," *British J. Appl. Sci. & Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 1–22, 2016, doi: 10.9734/bjast/2016/23668.
- [17] I. Sharafaldin, A. H. Lashkar, and A. A. Ghorbani, "Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization," in *Proc. 4th Int. Conf. Inf. Syst. Secur. Privacy (ICISSP)*, 2018, pp. 108–116, doi: 10.5220/0006639801080116.
- [18] M. H. Hameed, U. Rasheed, and A. Rehan, "Spam profile detection on Facebook and performance evaluation of machine learning Algorithms," *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol.*, vol. 7, no. 8, pp. 870–875, Aug. 2022.
- [19] T. Vincent and U. Prince, "Implementation of critical information infrastructure protection techniques against cyber attacks using big data analytics," Jun. 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/352682216_IMPLEMENTATION_OF_CRITICAL_INFORMATION_INFRASTRUCTURE_PROTECTION_TECHNIQUES_AGAINST_CYBER_ATTACK_USING_BIG_DATA_ANALYTICS
- [20] I. H. Sarker, A. S. M. Kayes, S. Badsha, H. Alqahtani, P. Watters, and A. Ng, "Cybersecurity data science: An overview from machine learning perspective," *J. Big Data*, vol. 7, 2020, Art. no. 41.
- [21] A. B. Shaik and S. Srinivasan, "A brief survey on random forest ensembles in classification model," in *Proc. Int. Conf. Innov. Comput. and Commun.*, New Delhi, India, May 2018, pp. 253–260.
- [22] M. Abdullahi, "Detecting cybersecurity attacks in internet of things using artificial intelligence methods: A systematic literature review," *Electron.*, vol. 11, no. 2, p. 198, 2022, doi: 10.3390/electronics11020198.
- [23] N. Baharun, N. F. M. Razi, S. Masrom, N. A. M. Yusri, and A. S. A. Rahman, "Auto modelling for machine learning: A comparison implementation between RapidMiner and Python," *Int. J. Emerging Technol. Adv. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 15–27, 2022, doi: 10.46338/ijetae0522_03.

การพัฒนาโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่ ด้วยเทคโนโลยีประมวลผลภาพ

วรวิทย์ ฝั้นคำอ้าย¹ ศุภชัย วงศ์นภาวิเศษ² สหวรรษ กิตติยะ³ และนงนุช เกตุย^{4*}

^{1,2,3,4}สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา,
น่าน, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : nongnuchketui@rmutl.ac.th

รับต้นฉบับ : 6 มกราคม 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 27 กุมภาพันธ์ 2566; ตอบรับบทความ : 28 เมษายน 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

การพัฒนาโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่ด้วยเทคโนโลยีประมวลผลภาพ มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่หน้ากาก มีสามขั้นตอนการพัฒนา 1) การเตรียมชุดข้อมูล 2) การฝึกฝนโมเดล และ 3) การจำแนกประเภทหน้ากากและการสวมใส่ ผู้วิจัยได้เก็บชุดข้อมูล โดยมีทั้งหมด 4 คลาส ได้แก่ คลาสที่ 1 ภาพบุคคลไม่สวมหน้ากาก คลาสที่ 2 ภาพบุคคลสวมหน้ากากอนามัย คลาสที่ 3 ภาพบุคคลสวมหน้ากากผ้า และคลาสที่ 4 ภาพบุคคลสวมหน้ากาก N95 การทดลองการจำแนกประเภทหน้ากากครั้งนี้ได้เปรียบเทียบอัลกอริทึมโวลเวอชัน 4 บนสภาพแวดล้อมเทนเซอร์โฟร์ และอัลกอริทึมโวลเวอชัน 5 บนสภาพแวดล้อมไพทอน ด้วยชุดข้อมูลจำนวน 2,311 ภาพ ซึ่งผลการทดลองพบว่า ความแม่นยำเฉลี่ยทุกคลาสของอัลกอริทึมโวลเวอชัน 5 (0.9943) มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมโวลเวอชัน 4 (0.9057) ในขณะที่อัลกอริทึมโวลเวอชัน 5 สามารถจำแนกหน้ากากผ้าได้ดีที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ย F1-score เท่ากับ 0.9995 และได้นำโมเดลที่ได้จากอัลกอริทึมโวลเวอชัน 5 ไปใช้งานจริงกับการตรวจจับด้วยกล้องเว็บแคม (Webcam) จำนวน 12 คน พบว่าสามารถจำแนกหน้ากากผ้าได้ถูกต้องสูงสุด จำนวน 11 คน คิดเป็นร้อยละ 0.91

คำสำคัญ : เทคโนโลยีประมวลผลภาพ การจำแนกประเภทหน้ากาก การตรวจจับสวมใส่หน้ากาก

Development of Mask Classification and Wearing Detection Program with Image Processing Technology

Worawit Fankam-ai¹ Suphachai Wongnaphawiset² Sahawut Kitiya³ Nongnuch Ketui^{4*}

^{1,2,3,4}*Computer Science, Faculty of Science and Agricultural Technology,
Rajamangala University of Technology Lanna, Nan, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: nongnuchketui@rmutl.ac.th

Received: 6 January 2023; Revised: 27 February 2023; Accepted: 28 April 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

Development of mask classification and wearing detection program with image processing technology which is purpose to classify and detect wearing masks. There are three steps 1) data set preparation 2) model training and 3) mask classification and wearing. Our research collected datasets with 4 classes; class 1: non-wearing mask, class 2: surgical mask, class 3: cloth mask, and class 4: N95 mask. Our mask classification and wearing detection experiment, two algorithms which are YOLOv4 on Tensorflow and YOLOv5 on Pytorch are compared with 2,311 datasets. We found that the average of accuracy (mAP) of the YOLOv5 (0.9943) is better than the YOLOv4 (0.9057) while the YOLOv5 can classify the cloth mask with the maximum F1-score at 0.9995. Twelve persons are set in the real situation with webcam. The result shown that the YOLOv5 model can correctly detect the 11 persons (0.91%).

Keywords: Image processing technology, Mask classification, Mask detection

1) บทนำ

การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาโควิด-19 (COVID-19) ได้เกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 2019 จนถึงปัจจุบัน ทำให้ส่งผลกระทบต่อสังคมและเศรษฐกิจทั่วโลก โดยเฉพาะปัญหาด้านวิกฤตสุขภาพโลก โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาโควิด-19 เป็นโรคติดต่อระบบทางเดินหายใจที่เกิดขึ้นใหม่ มีอาการเกี่ยวกับทางเดินหายใจเฉียบพลันชนิดรุนแรง ปัจจุบันการป้องกันการติดเชื้อโควิด-19 (COVID-19) นั้น มีวิธีการที่สามารถแก้ไขได้ เช่น การกักตัว การจำกัดพื้นที่ (lock down) และการสวมหน้ากากอนามัย แต่เนื่องจากมาตรการกักตัวที่เข้มงวดส่งผลกระทบต่อชีวิตของประชาชน ควบคู่ไปกับความเหนื่อยล้าจากการล็อกดาวน์ สุดท้ายประชาชนต้องออกมาใช้ชีวิตแบบปกติ เนื่องจากค่าใช้จ่าย ค่าเลี้ยงชีพและค่าใช้จ่ายของอุปโภคที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต จึงจำเป็นต้องมีสวมหน้ากากเพื่อป้องกันตามมาตรการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการช่วยลดความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดเชื้อไวรัสโควิด-19 (COVID-19) ได้โดยมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประมวลผลภาพ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ เพื่อพัฒนาโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่หน้ากาก เพื่อให้ประชาชนทั่วไปตระหนักและเห็นความสำคัญของการสวมหน้ากาก

2) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1) ประเภทหน้ากาก

โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาโควิด-19 (COVID-19) สามารถติดเชื้อผ่านระบบทางเดินหายใจ เกิดขึ้นเมื่อผู้ติดเชื้อไอ จาม ผายลมออก เหล่านี้มีน้ำหนักรวมเกินกว่าจะลอยอยู่ในอากาศ และตกลงบนพื้นหรือพื้นผิวอย่างรวดเร็ว การติดเชื้อเกิดได้จากการหายใจเอาไวรัสเข้าสู่ร่างกาย หรือโดยการสัมผัสพื้นผิวที่มีเชื้อไวรัสแล้วสัมผัสตา จมูก หรือปากของตนเอง การป้องกันการแพร่ระบาดทำได้โดยการสวมใส่หน้ากากอนามัยป้องกันการแพร่กระจายเชื้อไวรัส และที่สำคัญควรรักษาระยะห่างและหมั่นทำความสะอาดด้วยเจลล้างมืออยู่บ่อยครั้ง ดังนั้นการสวมใส่หน้ากากแต่ละประเภทได้พิจารณาจากงานวิจัยของ พานิช อินต๊ะ [1] มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1) หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ (Surgical Mask)

หน้ากากประเภทนี้ประกอบด้วยอย่างต่ำ 3 ชั้น ดังรูปที่ 1 โดยชั้นนอกสุดจะถูกเคลือบด้วยสารที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลวได้ (waterproof coating) ซึ่งสารเคลือบนี้สามารถละลายออกมา หากมีการซักล้างด้วยสบู่ หรือเช็ดทำความสะอาด

ด้วยแอลกอฮอล์ ชั้นตรงกลางจะมีชั้นแผ่นกรองอยู่วัสดุที่ใช้ผลิตหน้ากาก็เกิดจากการหลอมเม็ดพลาสติกโดยไม่ผ่านการทอ (nonwovens) ขึ้นรูปจากเส้นใยพลาสติกจนเกิดเป็นแผ่นกรองที่สามารถปรับขนาดความหนาแน่นได้ เพื่อช่วยกรองกลิ่นด้วย และชั้นในมีไว้สำหรับดูดซับความชื้น ชั้นนอกจะสะท้อนน้ำ สามารถป้องกันเชื้อโรคที่ปนมากับละอองน้ำมูกหรือน้ำลายได้ แต่มีอายุใช้งานสั้น ควรใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งถ้าใช้ซ้ำกันหลาย ๆ ครั้งอาจเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรคได้ และมีระดับการป้องกันที่ต่ำ แต่รู้สึกสบายเมื่อสวมใส่ [1]



รูปที่ 1 : หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ (surgical mask)

2.1.2) หน้ากากอนามัยแบบผ้า (Cloth Mask) เป็นหน้ากากที่ทำจากสิ่งทอทั่วไปโดยมักเป็นผ้าฝ้าย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 : หน้ากากอนามัยแบบผ้า (cloth mask)

มีไว้สวมปิดปากและจมูก มีไว้สำหรับบุคคลที่ไม่แสดงอาการทางคลินิกของการติดเชื้อไวรัสหรือแบคทีเรียและผู้ที่ไม่ได้สัมผัสกับผู้ที่มีอาการติดเชื้อมาก่อน หน้ากากผ้าจะปิดจมูกปากและคางและต้องไม่รวมวาล์วหายใจเข้าและหรือหายใจออก ทำจากผ้าชั้นเดียวหรือหลายชั้น (ผ้าทอ ผ้าถัก ผ้าไม่ทอ และผ้าอื่น ๆ) มีหรือไม่มีฟิล์ม จะต้องมียางคล้องหูหรือศีรษะ สามารถปรับระยะบริเวณจมูกแก้มและคางของผู้ใช้เมื่อผิวของผู้ใช้แห้งหรือชื้นหรือเมื่อผู้ใช้ขยับศีรษะ อากาศที่หายใจเข้าไปส่วนใหญ่จะแทรกซึมเข้าไปในวัสดุหน้ากอกและมาถึงบริเวณจมูกและปาก อากาศที่หายใจออกจะถูกระบายออกทางเดียวกันไปสู่บรรยากาศโดยตรง [1] แม้ประสิทธิภาพน้อยกว่าหน้ากากอนามัย แต่

ประชาชนทั่วไปใช้ในครัวเรือนและในแหล่งชุมชนเป็นการป้องกันต่อโรคติดเชื้อและมลพิษทางอากาศที่เป็นอนุภาค หน่วยงานสาธารณสุขโดยทั่วไปจึงแนะนำหน้ากากผ้าเฉพาะสำหรับการควบคุมแหล่งโรคในสถานการณ์โรคระบาด แต่ไม่ถือเป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

2.1.3) หน้ากากเอ็น 95 (N95 Mask) เป็นหน้ากากกรองอากาศ ดังรูปที่ 3 ประเภทใช้แล้วทิ้งชนิดหนึ่งตามมาตรฐานคุณภาพการกรองของหน้ากาก (National Institute of Occupational Safety and Health: NIOSH)



รูปที่ 3 : หน้ากากอนามัยแบบ N95

หน้ากาก N95 มีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคที่ไม่ใช่น้ำมันขนาด 0.3 ไมครอน ซึ่งแขวนลอยในอากาศ เช่น ฝุ่นละอองและเชื้อโรค การสวมใส่ต้องพอดีแนบกระชับกับใบหน้าของผู้สวม หน้ากากจะสามารถช่วยป้องกันผู้สวมได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่ออากาศที่ผู้สวมหายใจเข้าทั้งหมดต้องผ่านการกรองของหน้ากาก

2.2) เทคโนโลยีประมวลผลภาพ (Image Processing)

เทคโนโลยีประมวลผลภาพ (Image Processing) คือ เทคโนโลยีที่อยู่เบื้องหลังภาพที่คมชัดและความละเอียดสูง โดยข้อมูลนำเข้าเป็นรูปแบบ หรือวิดีโอ สามารถที่จะสร้างระบบประมวลผลภาพด้วยปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) [2] แล้วมีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ สถิติและความน่าจะเป็น ทำให้การถ่ายภาพไม่ว่าจะเป็นภาพนิ่งหรือการถ่ายวิดีโอ (VDO) สามารถทำได้คมชัด ตอบสนองความต้องการในการนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ อีกมากมาย

2.3) การตรวจจับใบหน้า (Face Detection)

เทคโนโลยีตรวจจับใบหน้า (face detection) คือ ระบบวิเคราะห์ใบหน้าถือว่าเป็นหนึ่งในระบบที่ใช้ในการพิสูจน์ยืนยันตัวตนบุคคลโดยใช้คุณลักษณะจำเพาะทางสรีระ (biometric)

โดยระบบรู้จำใบหน้าจะทำงานโดยการเปรียบเทียบใบหน้าจากภาพถ่ายดิจิทัลหรือภาพจากกล้องวิดีโอของบุคคลที่เราสนใจกับฐานข้อมูลใบหน้าที่มีอยู่ และเมื่อเปรียบเทียบเสร็จก็จะแสดงผลใบหน้าที่อยู่ในฐานข้อมูลที่มีใบหน้าเหมือนกับภาพที่นำมาเปรียบเทียบออกมา

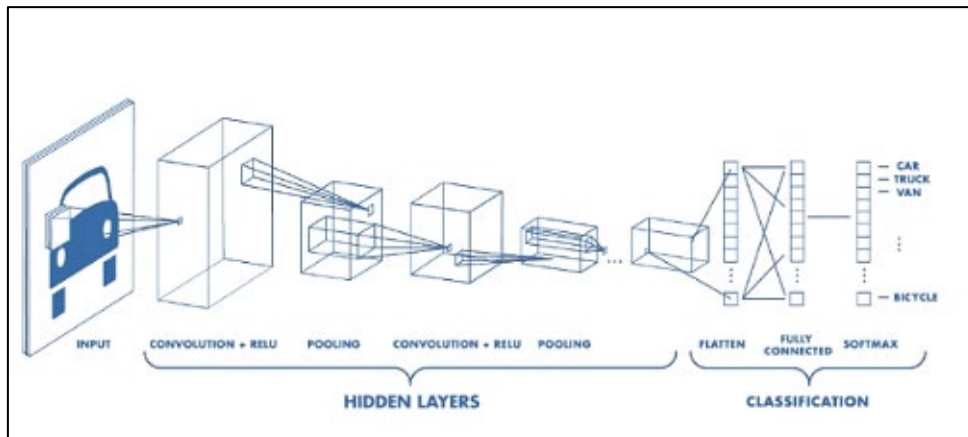


รูปที่ 4 : การตรวจจับใบหน้า (Face Detection)

แหล่งที่มา : <http://www.fukuro.co.th/wpcontent/uploads/Face-detection-camera.gif>

2.4) การจำแนกภาพ (Image Classification)

การจำแนกประเภทข้อมูล (image classification) เป็นการนำเอาข้อมูลทั้งหมดที่เก็บ รวบรวมมาได้ มาผ่านกระบวนการขั้นตอนการแยกแยะข้อมูลลงในแต่ละกลุ่มที่จัดไว้ โดยในแต่ละกลุ่มของข้อมูลนั้นจะมีคุณลักษณะเด่นของแต่ละกลุ่มที่แตกต่างกัน ขึ้นกับข้อมูล หรือ ฟีเจอร์ที่เก็บ รวบรวมมาได้ รวมทั้งกระบวนการหรือวิธีการที่ใช้จำแนกข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการจำแนกรูปภาพโดยใช้กระบวนการที่มีชื่อว่า โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks : CNN) [3] คือ โครงข่ายประสาทเทียม (neural network) หลายชั้น (layer) ที่มีโครงสร้างเฉพาะตัว โดยถูกออกแบบมาเพื่อการเพิ่มความสามารถในการสกัดเอาจุดเด่นของภาพ (feature) ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นจากข้อมูล โดยโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันนั้นตอบ โจทย์ปัญหาประเภทการรับรู้ (perceptual tasks) อย่างมาก ซึ่งโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันเป็นโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งในกลุ่ม Bio-Inspired โดยที่โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน จะจำลองการมองเห็นของมนุษย์ที่มองเห็นพื้นที่เป็นที่ย่อย ๆ และนำกลุ่มของพื้นที่ย่อย ๆ มาผสานกัน เพื่อจำแนกประเภทของวัตถุต่าง ๆ ออกมา



รูปที่ 5 : การทำงานของโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน

แหล่งที่มา : <https://miro.medium.com>

2.5) โมเดลสำหรับการตรวจจับวัตถุ (YOLO Model)

โยโล (You Only Look Once: YOLO) เป็นรูปแบบโมเดลสำหรับการตรวจจับวัตถุ โดย Redmon *et al.* [4] ในปี ค.ศ. 2016 จากนั้น Redmon และ Farhadi ได้พัฒนางานต่อจนในปี 2018 [5] ก็ได้เผยแพร่โยโลเวอร์ชันที่ 3 (YOLOv3) โดยมีการปรับการทำนายคลาสของ bounding box ด้วยการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ที่มีความแม่นยำที่มากขึ้น และในปี 2020 Alexey ได้เผยแพร่โยโลเวอร์ชันที่ 4 (YOLOv4) [6] ได้ใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) และเพิ่มประสิทธิภาพ (optimize) สำหรับชิปประมวลผลกราฟิกส์ (GPU) ที่ใช้การคำนวณแบบคู่ขนาน และใช้เทคนิคการค้นหาพารามิเตอร์ (hyper parameter searching) เพื่อทำให้มีความแม่นยำที่สูงขึ้นกว่า โยโลเวอร์ชันที่ 3 (YOLOv3) โดยมีความเร็วอัตราเฟรม (Frame Per Second: FPS) ที่สูงกว่า EfficientDet และมีความเร็วใกล้เคียงกับโยโลเวอร์ชันที่ 3 (YOLOv3) ในขณะที่โยโลเวอร์ชันที่ 5 (YOLOv5) ถูกออกแบบสถาปัตยกรรมโดยบริษัทอัลตราไลติก (ultralytics) เพื่อตรวจจับวัตถุให้มีประสิทธิภาพและรวดเร็วมากขึ้น [7] ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน คือ 1) การเตรียมข้อมูลขนาดภาพให้เหมาะสมกับโมเดล และสกัดข้อมูล (feature selection) 2) การตรวจจับวัตถุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (neural network) ที่ทำนายตำแหน่งและขนาดของวัตถุที่อยู่ในภาพ 3) การจัดการภาพหลังตรวจจับ โมเดลจะส่งค่าตำแหน่งของวัตถุในรูปแบบกล่อง (bounding box) และความเชื่อมั่นโดยใช้ค่า Threshold เพื่อตัดสินใจจะใช้ข้อมูลภาพนั้นหรือไม่ 4) การลบ Bounding Box (non-maximum suppression) ที่มีค่าความเชื่อมั่นต่ำหรือซ้อน

ทับกันออก และคืนค่า Bounding Box ที่เหลือให้เพียงพอสำหรับการใช้งาน

2.6) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับหน้ากาก

Adusumalli *et al.* [8] ได้พัฒนางานวิจัยตรวจจับหน้ากากในบุคคลด้วยโอเพ่นซอร์สด้านประมวลผลภาพ (OpenCV) ร่วมกับเทคนิคเทนเซอร์โฟล (TensorFlow) เพื่อตรวจจับหน้ากากในบุคคล ในขณะที่ Teboulbi *et al.* [9] มีการพัฒนาตรวจจับหน้ากากป้องกันเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 แบบเรียลไทม์ โดยพิจารณาจากระบบการมองเห็นแบบฝัง และสร้างโมเดลจากการฝึกฝนล่วงหน้า ด้วยเครื่องมือ MobileNet ResNet Classifier และ VGG รวมไปถึงทีมนักวิจัยของ Sethi *et al.* [10] พัฒนาระบบตรวจจับหน้ากากด้วยเทคโนโลยี ResNet50 เป็นพื้นฐาน และใช้แนวคิดของการถ่ายโอนการเรียนรู้เพื่อหลอมรวมข้อมูลความหมายระดับสูงในแผนที่คุณสมบัติหลายแบบ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Goyal *et al.* [11] พัฒนาระบบตรวจจับหน้ากากอนามัยแบบเรียลไทม์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน การตรวจจับหน้ากากสำหรับวิดีโอแบบคงที่และเรียลไทม์ซึ่งจัดประเภทภาพเป็น “ใส่หน้ากาก” และ “ไม่มีหน้ากาก” แบบจำลองนี้ได้รับการฝึกอบรมและประเมินโดยใช้ชุดข้อมูล Kaggle ชุดข้อมูลที่รวบรวมประกอบด้วยรูปภาพประมาณ 4,000 ภาพและบรรลุอัตราความแม่นยำของประสิทธิภาพ 98%

3) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่

2. เพื่อแสดงข้อมูลสรุปสถิติการสวมใส่หน้ากากแต่ละประเภทในรูปแบบแผนภาพ (dashboard)

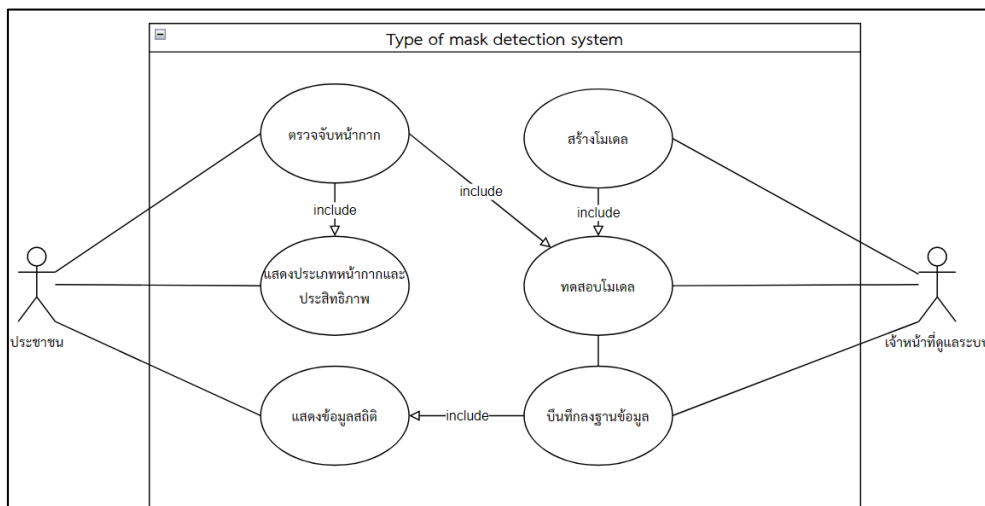
4) วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่ ได้กำหนดขอบเขตการดำเนินงานดังรูปที่ 6 โดยมีผู้ใช้งาน 2 กลุ่ม ได้แก่ เจ้าหน้าที่ดูแลระบบ และประชาชนทั่วไป ซึ่งเจ้าหน้าที่ดูแลระบบจะต้องสร้างโมเดล ทดสอบโมเดล นำโมเดลไปสร้างเป็นแอปพลิเคชัน และนำไปใช้เพื่อบันทึกหลักฐานข้อมูล และเรียกค้นข้อมูลสถิติ ขณะที่ประชาชนทั่วไปสามารถรับการแสดงผลการสวมใส่หรือไม่ พร้อมระบุประเภทหน้ากากได้

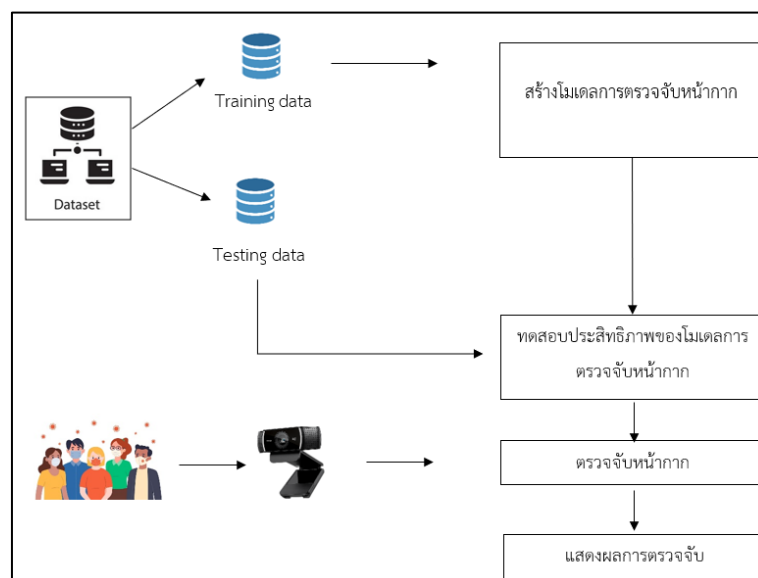
4.1) สถาปัตยกรรมของระบบ

สถาปัตยกรรมของระบบแสดงในรูปที่ 7 และอธิบายขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) การรวบรวมภาพบุคคลสวมหน้ากาก ภาพบุคคลไม่สวมหน้ากาก ภาพบุคคลสวมหน้ากากอนามัย บุคคลสวมหน้ากาก N95 บุคคลสวมหน้ากากผ้า พร้อมกำกับภาพ (label) สำหรับชุดข้อมูล
- 2) การแบ่งชุดข้อมูล แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือชุดข้อมูลฝึกฝน (training dataset) และชุดข้อมูลทดสอบ (testing dataset) ในการสร้างโมเดลการเรียนรู้



รูปที่ 6 : Use Case Diagram ตรวจจับหน้ากาก



รูปที่ 7 : สถาปัตยกรรมของระบบ

3) การสร้างโมเดลในการจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจ
จับการสวมหน้ากาก ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

4) การนำโมเดลจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการ
สวมหน้ากากมาทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ

5) การรับภาพและวิดีโอจากผู้ใช้และทำการสแกนใบหน้า
ผ่านกล้องเว็บแคม (webcam) เพื่อตรวจจับการสวมหน้ากาก ไม่
สวมหน้ากากและจำแนกประเภทหน้ากากผ่านโมเดลที่ได้จาก
ขั้นตอนที่ 4

6) การแสดงผลการตรวจจับการสวมหน้ากากผ่านหน้าจอ
คอมพิวเตอร์

4.2) ผังงานแบบจำลองการสร้างชุดข้อมูล การสร้างโมเดล และ การตรวจจับ

ผังงานแบบจำลองการสร้างชุดข้อมูล การสร้างโมเดล และ
การตรวจจับ เป็นการอธิบายให้เห็นขั้นตอนดำเนินการ (รูปที่ 8)
เพื่อการสร้างโมเดลจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการ
สวมใส่หน้ากาก ดังนี้

4.2.1) การสร้างชุดข้อมูล

- การรวบรวมรูปภาพ ได้รวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูล
อินเทอร์เน็ต ที่ปรากฏทั้งรูปบุคคลเดี่ยว และหลายบุคคล
ประกอบไปด้วย 1) บุคคลไม่สวมหน้ากาก จำนวน 404 ภาพ 2)
บุคคลสวมหน้ากากอนามัย จำนวน 634 ภาพ 3) บุคคลสวม

หน้ากากผ้า จำนวน 512 ภาพ และ 4) บุคคลสวมหน้ากาก N95
จำนวน 761 ภาพ รวมทั้งหมดจำนวน 2,311 ภาพ

- การกำกับภาพ (label) เพื่อกำกับภาพให้เป็นคำตอบ
สำหรับชุดข้อมูลฝึกฝนและข้อมูลทดสอบ ได้ใช้โปรแกรมโรโบฟล์
(Roboflow) โดยมีการระบุชื่อและตำแหน่งของวัตถุ แล้วสร้าง
เป็นไฟล์นามสกุล .txt จากตัวอย่างรูปที่ 9 จะทำการระบุ
ตำแหน่งของหน้ากากอนามัย โดยระบุตำแหน่งกรอบสี่น้ำเงิน
(bounding box) ซึ่งข้อมูลในไฟล์ .txt ออกมาในรูปแบบดังนี้

```
<class id> <X0/X> <Y0/Y> <W/X> <H/Y>
```

โดยที่

class id: ดัชนีของวัตถุที่ต้องการโดยกำหนดค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0

X0: ค่าแกน x ของจุดกึ่งกลางของกรอบ (Bounding Box)

Y0: ค่าแกน y ของจุดกึ่งกลางของกรอบ (Bounding Box)

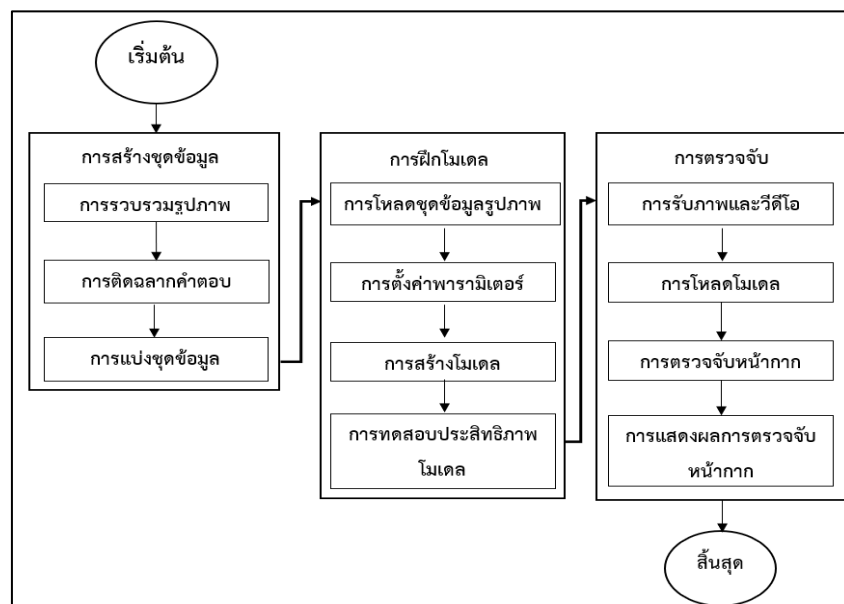
W: ความกว้างของกรอบ (Bounding Box)

H: ความสูงของกรอบ (Bounding Box)

X: ความกว้างของภาพ

Y: ความสูงของภาพ

- การแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือชุดข้อมูลฝึกฝน
(training dataset) และ ชุดข้อมูลทดสอบ (testing dataset)
โดยขั้นตอนการสร้างโมเดลนั้น จะใช้ชุดข้อมูลฝึกฝน (training
dataset) 90% และชุดข้อมูลทดสอบ (testing dataset) 10%



รูปที่ 8 : ผังงานแบบจำลองการตรวจจับสวมหน้ากาก



รูปที่ 9 : ตัวอย่างการกำกับภาพชุดข้อมูล

4.2.2) การฝึกโมเดล

- การโหลดชุดข้อมูลฝึกฝน (Training Dataset)
- การตั้งค่าพารามิเตอร์ เตรียมสภาพแวดล้อมสำหรับการสร้างโมเดล

- การสร้างโมเดลนี้ได้เปรียบเทียบโมเดลโดยใช้อัลกอริทึมของ YOLOv4 ที่ทำงานบนสภาพแวดล้อมของ Tensorflow และ YOLOv5 ที่ทำงานบนสภาพแวดล้อมของ Pytorch ใช้ภาษาไพทอนสำหรับการพัฒนาโมเดล และ OpenCV เป็นเครื่องมือสำหรับประมวลผล

- การทดสอบประสิทธิภาพโมเดล

4.2.3) การตรวจจับ

- การรับภาพและรับวิดีโอ
- การโหลดโมเดล
- การตรวจจับและจำแนกประเภทหน้ากาก
- การแสดงผลการตรวจจับและจำแนกประเภทหน้ากากผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

5) ผลการวิจัย

การทำงานของโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่ โดยสำหรับผลการดำเนินงานผู้ทำวิจัยได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การวัดประสิทธิภาพโมเดล 2) ผลการตรวจจับด้วยกล้องเว็บแคม (webcam) และ 3) การบันทึกข้อมูลและดึงข้อมูลไปแสดงผล (dashboard) โดยมีผลการดำเนินงาน ดังนี้

5.1) การวัดประสิทธิภาพโมเดล

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลรูปภาพออกเป็น 4 คลาส ได้แก่ คลาสที่ 1 ภาพบุคคลไม่สวมหน้ากาก (AP0) คลาสที่ 2 ภาพบุคคลสวมหน้ากากอนามัย (AP1) คลาสที่ 3 ภาพบุคคลสวมหน้ากากผ้า (AP2) และคลาที่ 4 ภาพบุคคลสวมหน้ากาก N95 (AP3) ดังนั้นรูปภาพที่รวบรวมเพื่อนำมาเป็นข้อมูลภาพฝึกฝนโมเดลและข้อมูลภาพทดสอบมีจำนวนทั้งหมด 2,311 ภาพ แต่ละคลาสจะมีรูปภาพเฉลี่ยจำนวน 578 ภาพ โดยการวัดประสิทธิภาพโมเดลใช้การประเมินผล (evaluate model) ที่มีการคำนวณหาความแม่นยำ ความถูกต้อง และหาค่าเฉลี่ย [11] ดังสมการข้างล่างนี้

โดยที่

$$\begin{aligned} \text{Precision} &= \frac{TP}{TP + FP} \\ \text{Recall} &= \frac{TP}{TP + FN} \\ \text{F1 - score} &= \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \\ \text{mAP} &= \frac{\text{AP}(0) + \text{AP}(1) + \text{AP}(2) + \text{AP}(3)}{\text{class}} \end{aligned}$$

TP คือ ข้อมูลที่ทำนายแล้วถูกต้องเมื่อเทียบกับเฉลี่ย

FP คือ ข้อมูลที่อยู่ในเฉลี่ยแต่ไม่มีในการทำนาย (ตรงข้ามกับ FN)

FN คือ ข้อมูลที่ทำนายแล้วไม่ถูกต้องเมื่อเทียบกับเฉลี่ย

Precision คือ ค่าความแม่นยำ คำนวณจากค่า TP และ FP

Recall คือ ค่าความถูกต้อง คำนวณจากค่า TP กับ FN

F1-Score คือ ค่าเฉลี่ยของ Precision และ Recall

mAP คือ ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision) ของทุกคลาสที่เกิดขึ้น

จากตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง YOLOv4 และ YOLOv5 ด้วยค่าความแม่นยำ (precision) ค่าความถูกต้อง (recall) ค่าเฉลี่ย (F1-Score) และค่าความแม่นยำเฉลี่ย (mAP) พบว่า อัลกอริทึม YOLOv4 ค่าเฉลี่ย (F1-Score) ที่ดีที่สุดสำหรับการจำแนกบุคคลสวมหน้ากาก N95 เท่ากับ 0.8649 ในขณะที่การจำแนกบุคคลสวมหน้ากากผ้า มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.7671 แต่ถ้าพิจารณาความแม่นยำ (precision) พบว่ามีค่าสูงกว่าค่าความถูกต้อง (recall) ในทุกคลาส ส่วนอัลกอริทึม YOLOv5 คลาสบุคคลไม่สวมหน้ากาก และบุคคลสวมหน้ากากผ้า มีค่าความแม่นยำ (precision) สูงกว่าค่าความถูกต้อง (recall) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0000 และประสิทธิภาพของ YOLOv5 สามารถจำแนกบุคคลที่สวมหน้ากากผ้าได้ดีที่สุด ที่ค่าเฉลี่ย (F1-Score) เท่ากับ 0.9995 แม้ว่าการจำแนกบุคคลที่

สวมหน้ากาก N95 จะมีค่าเฉลี่ย (F1-Score) เท่ากับ 0.9904 ที่ต่ำสุด แต่ประสิทธิภาพการจำแนกมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย (F1-Score) สูงสุดของอัลกอริทึม YOLOv4 ในขณะที่ถ้าพิจารณาค่า

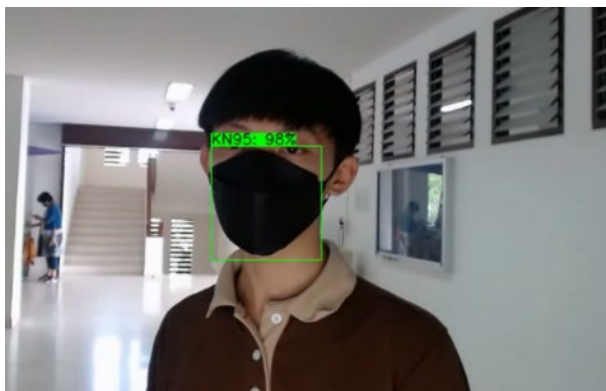
ความแม่นยำเฉลี่ย (mAP) ของทั้งสองอัลกอริทึมแล้ว พบว่า YOLOv5 มีประสิทธิภาพการตรวจจับที่แม่นยำกว่า YOLOv4

ตารางที่ 1 : แสดงการเปรียบเทียบ ค่าความแม่นยำ (Precision) ค่าความถูกต้อง (Recall) ค่าเฉลี่ย (F1-Score) และค่าความแม่นยำเฉลี่ย (mAP) ระหว่าง YOLOv4 และ YOLOv5

อัลกอริทึม		YOLOv4			YOLOv5		
ประเภทคลาส	คลาส (AP)	ค่าความแม่นยำ (Precision)	ค่าความถูกต้อง (Recall)	ค่าเฉลี่ย (F1-Score)	ค่าความแม่นยำ (Precision)	ค่าความถูกต้อง (Recall)	ค่าเฉลี่ย (F1-Score)
ไม่สวมหน้ากาก	AP0	0.9857	0.7419	0.8466	1.0000	0.9950	0.9975
สวมหน้ากากอนามัย	AP1	0.8476	0.7876	0.8165	0.9960	1.0000	0.9980
สวมหน้ากากผ้า	AP2	0.8485	0.7000	0.7671	1.0000	0.9990	0.9995
สวมหน้ากาก N95	AP3	0.9412	0.8000	0.8649	0.9810	1.0000	0.9904
Mean Average Precision(mAP)		0.9057	0.7574	0.8238	0.9943	0.9985	0.9963

5.2) ผลการทดสอบประสิทธิภาพโมเดลการตรวจจับใบหน้าที่สวมหน้ากาก

ตัวอย่างโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่ด้วยเทคโนโลยีประมวลผลภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 10-12



รูปที่ 10 : ผลลัพธ์การตรวจจับการสวมหน้ากากแบบ KN 95



รูปที่ 11 : ผลลัพธ์การตรวจจับการสวมหน้ากากและไม่สวมหน้ากาก



รูปที่ 12 : ผลลัพธ์การตรวจจับการสวมหน้ากากแต่ละประเภทและนับจำนวน

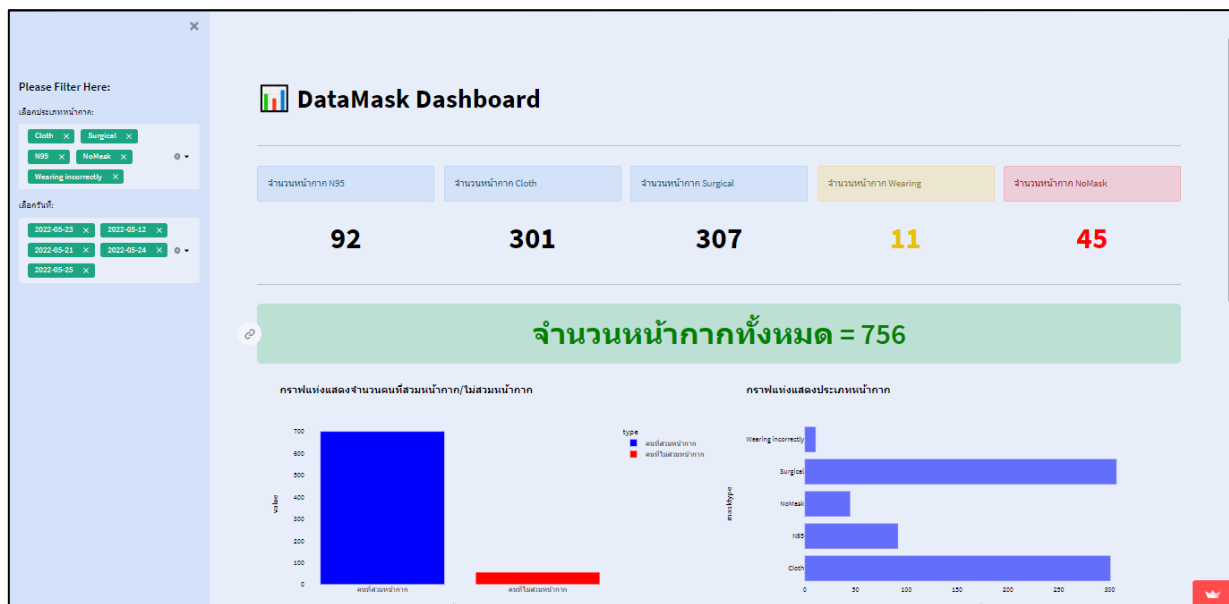
5.3) การบันทึกข้อมูลและดึงข้อมูลไปแสดงผลบนแผนภาพ (Dashboard)

5.3.1) บันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล หลังจากที่ได้ผลลัพธ์จากการตรวจจับหน้ากากแล้ว โปรแกรมจะบันทึกข้อมูลจำนวนการตรวจจับหน้ากากแต่ละประเภทลงในฐานข้อมูล และถูกนำไปใช้แสดงผลของค่าสถิติต่าง ๆ ในแผนภาพ (dashboard)

5.3.2) สร้างหน้าจอสรุปข้อมูล (Dashboard) การสร้างหน้าจอสรุปข้อมูล จะดึงข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในฐานข้อมูลมาแสดงผลเป็นค่าสถิติประกอบไปด้วย แสดงจำนวน หน้ากาก N95 หน้ากากผ้า หน้ากากอนามัย ไม่สวมหน้ากาก สวมหน้ากากไม่ถูกต้องและแสดงจำนวนหน้ากากทั้งหมดรวมกัน และได้ทำการ

สร้างกราฟแท่งแสดงจำนวนหน้ากากทั้งหมด กราฟแท่งแสดงจำนวนผู้ที่สวมใส่หน้ากากและไม่ได้สวมใส่หน้ากาก กราฟวงกลม

แสดงจำนวนหน้ากากทั้งหมด และกราฟเส้นแสดงจำนวนหน้ากากที่ตรวจจับได้ในแต่ละวัน ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 : ผลลัพธ์หน้าจอสรุปข้อมูล (Dashboard)

6) สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาโปรแกรมจำแนกประเภทหน้ากากและตรวจจับการสวมใส่ สามารถสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อ ดังนี้

6.1) สรุปผลการดำเนินงาน

การวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการทำงานของอัลกอริทึม โยโล YOLOv4 และ YOLOv5 โดยการวัดประสิทธิภาพโมเดลใช้การประเมินผล (Evaluate model) ที่มีการคำนวณหาค่าความแม่นยำ ความถูกต้อง และค่าเฉลี่ย จากนั้นจึงเลือกวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่ดี ไปการพัฒนาโมเดลการตรวจจับการสวมหน้ากาก โดยมีข้อมูลรูปภาพที่รวบรวมจากเว็บไซต์ต่าง ๆ ที่มีวัตถุในภาพแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มความหลากหลายแก่ชุดข้อมูล ขนาดรูปภาพที่มีความแตกต่างกัน แล้วจำแนกออกเป็น 4 คลาสได้แก่ ภาพบุคคลไม่สวมหน้ากาก ภาพบุคคลสวมหน้ากากอนามัย ภาพบุคคลสวมหน้ากากผ้า และภาพบุคคลสวมหน้ากาก N95 แล้วทำการกำกับภาพ และแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดข้อมูลฝึกฝน (training dataset) และ ชุดข้อมูลทดสอบ (testing dataset) หลังจากนั้นทำการฝึกฝนโมเดลบนเครื่องมือ (google collaboratory) และพัฒนาด้วยภาษาโปรแกรมไพทอน มีการประมวลผลด้วยเครื่องมือ OpenCV โดยความแตกต่างของ

สภาพแวดล้อมของ YOLOv4 จะทำงานบน Tensorflow ในขณะที่ YOLOv5 ทำงานบน Pytorch เมื่อได้โมเดลแล้วจึงนำไปใช้งานจริงกับเหตุการณ์ภาพวิดีโอจากกล้องเว็บแคม

6.2) อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากกระบวนการตรวจจับการสวมใส่และจำแนกประเภทหน้ากากของงานวิจัยครั้งนี้ มีขั้นตอนการทำงาน คือ การสร้างชุดข้อมูล ซึ่งพบว่าปัญหาที่สำคัญของการเตรียมข้อมูล และจัดการข้อมูลคือ ภาพที่ต้องปรากฏเฉพาะหน้าคนเท่านั้น ทั้งภาพเดี่ยวและกลุ่มคน เพื่อให้เกิดการเรียนรู้ ในขณะเดียวกัน สีของหน้ากากที่อยู่บนใบหน้าในภาพ ในกรณีถ้าเป็นสีขาวหรือดำ จะทำให้การฝึกโมเดลค่อนข้างยาก เนื่องจากภาพสีจะต้องถูกปรับเปลี่ยนเป็นรูปแบบสีเทา (gray scale) ทำให้เกิดการจำแนกคุณลักษณะของหน้ากากได้ยาก แต่ทั้งนี้เมื่อเข้าสู่โมเดลที่สร้างโดยอัลกอริทึม YOLOv5 จะทำให้มีการสกัดคุณลักษณะ (feature selection) ซึ่งเป็นช่วยให้การจำแนกประเภทหน้ากากผ้าได้ผลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากผลการวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนั้นการฝึกฝนโมเดลจากชุดข้อมูลฝึกฝนยังพบว่า YOLOv4 ใช้เวลาในการฝึกฝนนานถึง 7 ชั่วโมง ในขณะที่ YOLOv5 ใช้เวลาและทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์น้อยกว่า หลังจากพบว่า YOLOv5 ทำงานได้

ดีกับชุดข้อมูลทดสอบแล้ว ทางทีมนักวิจัยจึงนำไปพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันตรวจจับการสวมใส่และจำแนกประเภทหน้ากากผ่านกล้องเว็บแคม จำนวน 12 คน พบว่า สามารถจำแนกบุคคลสวมหน้ากากผ้าได้ถูกต้อง จำนวน 11 คน คิดเป็นร้อยละ 0.91 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของผลการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ ทั้งนี้ทีมนักวิจัยมองเห็นว่าถ้าต้องการให้โมเดลมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น การเตรียมชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนต้องมีจำนวนมากขึ้น รวมไปถึงทางทีมนักวิจัยมีแนวทางนำผลการทดลองของอัลกอริทึม ไปใช้หรือประยุกต์กับหน้ากากป้องกันฝุ่น PM 2.5 ซึ่งเป็นภาวะฉุกเฉินในสภาพแวดล้อมปัจจุบันของประเทศไทยต่อไปได้

REFERENCES

- [1] P. Intra, "Filtration efficiency of surgical masks, fabric masks and N95/KN95/FFP1/FFP2 masks available for use during the COVID-19 pandemic in Thailand," (in Thai), *Thai Sci. Technol. J.*, vol. 29, no. 5, pp. 904–918, 2021.
- [2] R. C. Gonzalez and R.E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [3] J. Wu, "Introduction to convolutional neural networks," National Key Lab for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, China, Accessed: Jan. 20, 2022. [Online]. Available: <https://cs.nju.edu.cn/wujx/paper/CNN.pdf>
- [4] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision and Pattern Recognit. (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779–788.
- [5] J. Redmon and A. Farhadi, "Yolov3: An incremental improvement," arXivLabs: experimental projects with community collaborators, Apr. 8, 2018. Accessed: Jan. 20, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1804.02767>
- [6] A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, H.-Y. M. Liao, "Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection," arXivLabs: experimental projects with community collaborators, Apr. 2020. Accessed: Jan. 20, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>
- [7] YOLOv5: The friendliest AI architecture you'll ever use, Ultralytics Company, Aug. 2013. [Online]. Available: <https://ultralytics.com/yolov5>
- [8] H. Adusumalli, D. Kalyani, R. K. Sri, M. Pratapteja, and P. V. R. D. P. Rao, "Face Mask Detection Using OpenCV," in *Proc. 3rd Int. Conf. Intell. Commun. Technol. and Virtual Mobile Networks (ICICV)*, Tirunelveli, India, Feb. 2021, pp. 1304–1309.
- [9] S. Teboulbi, S. Messaoud, M. A. Hajjaji, and A. Mtibaa, "Real-Time implementation of AI-based face mask detection and social distancing measuring system for COVID-19 prevention," *Scientific Program.*, vol. 2021, Sep. 2021, Art. no. 8340779.
- [10] S. Sethi, M. Kathuria, and T. Kaushik, "Face mask detection using deep learning: An approach to reduce risk of Coronavirus spread," *J. Biomed Inform.*, vol. 120, Aug. 2021, Art. no. 103848.
- [11] H. Goyal, K. Sidana, C. Singh, A. Jain, and S. Jindal. "A real time face mask detection system using convolutional neural network," *Multimedia Tools Appl.*, vol. 81, no. 11, pp. 14999–15015, May 2022.

การออกแบบและจัดผังโรงประลองทางวิศวกรรมด้วยการวางผังอย่างมีระบบ และการวางผังตามกระบวนการผลิต

กฤต จันทรัมย์¹ อรุมา ลาสุนนท์² วิโรช ทัศนะ^{3*}

^{1,3*}สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์,
สุรินทร์, ประเทศไทย

²สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : wiroj.th@rmu.ac.th

รับต้นฉบับ : 11 มกราคม 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 26 กุมภาพันธ์ 2566; ตอบรับบทความ : 10 มีนาคม 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและวางผังโรงประลองทางวิศวกรรม ด้วยการประยุกต์ใช้การวางผังอย่างมีระบบ และการวางผังตามกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นกระบวนการวางผังโรงงานที่มุ่งเน้นไปที่ระดับความสัมพันธ์ระหว่างสถานงาน การไหลของกระบวนการผลิต และการจัดกลุ่มของเครื่องจักร โดยทำการออกแบบผังและทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลของระยะทางรวมของการปฏิบัติงาน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ ผลการศึกษาพบว่า ผังโรงประลองทางวิศวกรรมที่ได้จากการวางผังอย่างมีระบบให้ระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 565.84 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 609.64 นาที/คน ในขณะที่ผังโรงประลองตามกระบวนการผลิตให้ระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 609.31 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 646.25 นาที/คน สรุปได้ว่า ผังที่ได้จากการวางผังอย่างมีระบบมีความเหมาะสมกว่าผังตามกระบวนการผลิต โดยผังโรงงานอย่างมีระบบมีระยะทางการเคลื่อนที่รวมที่สั้นกว่า คิดเป็นร้อยละ 7.13 และมีเวลารวมในการเคลื่อนที่น้อยกว่า คิดเป็นร้อยละ 5.66

คำสำคัญ : การวางผังตามกระบวนการผลิต การจำลองสถานการณ์ การวางผังอย่างมีระบบ

Plant Layout and Design of Fabrication Laboratory Using Systematic Layout Planning and Process Layout

Krit Chantarasamai¹ On-Uma Lasunon² Wiroj Tassana^{3*}

^{1,3*}*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of
Technology Isan Surin Campus, Surin, Thailand*

²*Engineering Manufacturing, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: wiroj.th@rmuti.ac.th

Received: 11 January 2023; Received: 26 February 2023; Accepted: 10 March 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

This research aimed to design the layout of the fabrication laboratory. The study applied the principles of Systematic Layout Planning (SLP) and Process Layout (PL), which focus on the relationship between work stations, flow processes, and groups of machines. The layouts were designed and simulated using the computer program. Criteria were used for minimizing the total moving distance and the total moving time to consider the suitable design. The results showed that the SLP gave a total moving distance of 565.84 meters per person and a total moving time of 609.64 minutes per person, while the PL provided a total moving distance of 609.31 meters per person and a total moving time of 646.25 minutes per person. In conclusion, the plant layout obtained from the SLP was better than the PL in terms of shorter total moving distance (7.13%) and less total moving time (5.66%).

Keywords: Process layout, Simulation, Systematic layout planning

1) บทนำ

ปัจจุบันโรงประลองทางวิศวกรรม (Fabrication Lab: FAB LAB) เป็นห้องปฏิบัติการสมัยใหม่ที่มหาวิทยาลัยต่าง ๆ ให้ความสนใจในการจัดตั้ง เนื่องจากเป็นแหล่งที่รวบรวมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่มีความหลากหลายเพื่อรองรับการทดลอง การฝึกฝน และการสร้างสรรค์ผลงานของนิสิตและคณาจารย์อย่างเต็มที่ อันเป็นขบวนการพัฒนาองค์ความรู้ การพัฒนาการผลิต รวมถึงการสร้างต้นแบบของชิ้นงานต่าง ๆ ทางพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ที่ทำให้เกิดทักษะเชี่ยวชาญนำไปสู่การแข่งขันนวัตกรรมในระดับชาติและนานาชาติ จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้สถานศึกษาต้นแบบ พยายามที่จะจัดตั้งโรงประลองทางวิศวกรรมขึ้นภายใน 2 อาคารเรียนที่เนื้อที่รวมกัน 1,152 ตารางเมตร แต่ยังคงขาดการออกแบบและจัดวางผังเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ ซึ่งจะส่งผลต่อการใช้พื้นที่ การไหลของผู้เข้าปฏิบัติงาน ตลอดจนเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานตามมาด้วย

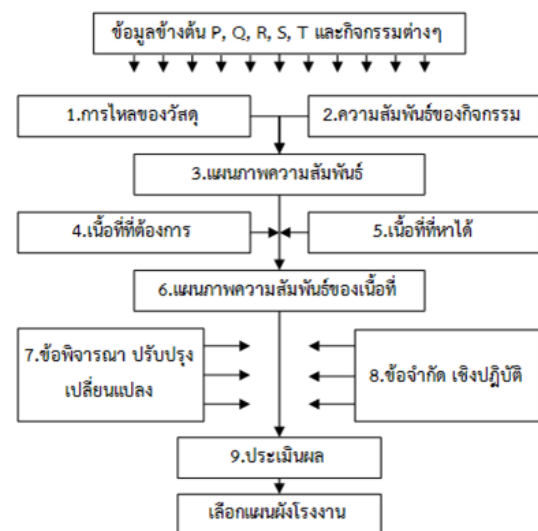
การวางผังโรงงาน (plant layout) เป็นการจัดระเบียบของเครื่องจักรและสถานที่ทำงานภายใต้ข้อจำกัดของพื้นที่ โดยมีวัตถุประสงค์ทำให้เกิดระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพที่มุ่งเน้นด้านการไหลของกระบวนการ ที่มีหลากหลายหลักการไม่ว่าจะเป็นการวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematics Layout Planning: SLP) เป็นการวางผังโรงงานที่มุ่งเน้นไปที่ระดับความสัมพันธ์ของกิจกรรมเป็นหลัก ว่ากิจกรรมใดควรอยู่ใกล้กันหรือกิจกรรมใดควรอยู่ไกลกันออกไป [1]–[6] และการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (Process Layout: PL) เป็นการวางผังโดยจัดกลุ่มของเครื่องจักรที่ทำงานเหมือนกันเข้าไว้ด้วยกัน [7], [8] แต่ในปัจจุบันการนำหลักการวางผังไปใช้ในการออกแบบผังโรงงานอย่างเดียวจะไม่เกิดประสิทธิภาพถ้าไม่มีการจำลองสถานการณ์ (simulation) เข้ามาวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองก่อนนำไปใช้แก้ไขกับปัญหาในสถานการณ์จริง [9]–[12]

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ให้ความสนใจในการวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning: SLP) และการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (Process Layout: PL) ร่วมกับการจำลองสถานการณ์ (simulation) มาใช้ในการออกแบบและจัดผังโรงประลองทางวิศวกรรม (Fabrication Lab: FABLAB) ของสถานศึกษาต้นแบบ ในจังหวัดมหาสารคามเพื่อจัดการพื้นที่และจัดวางเครื่องจักร/อุปกรณ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม รวมถึงจะช่วยลดระยะทาง ลดเวลาในการเคลื่อนที่ ตลอดจนพัฒนาศักยภาพของนิสิตที่เข้ามาปฏิบัติงานได้

2) ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1) การวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning: SLP)

การวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning: SLP) เป็นกระบวนการวางผังโรงงานที่มุ่งเน้นไปที่ระดับความสัมพันธ์ระหว่างสถานีหรือกิจกรรมและการไหลของกระบวนการที่จะสามารถช่วยลดระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่ลงได้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : การวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ

ซึ่งในอดีตจนถึงปัจจุบันมีผู้วิจัยหลายท่านได้นำหลักการวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (SLP) เข้ามาใช้ในการปรับปรุงผังหลากหลายวัตถุประสงค์และปัญหาไม่ว่าจะเป็น เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตหลอดไฟแอลอีดีตัวอย่าง [1] เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการไหลของโรงงานผลิตชาลาเปา [2] ลดระยะทางในการเคลื่อนที่ระหว่างแผนกของบริษัท CV Oto Boga Java ในประเทศอินโดนีเซีย [3] ลดระยะทางของการแปรรูปผักและผลไม้ [4] ลดกระบวนการการไหลของวัตถุดิบและลดระยะเวลาในการให้บริการลูกค้าของธุรกิจซ่อมเครื่องยนต์ [5] เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากระยะทางและเวลาในการขนย้ายวัสดุเป็นเวลานานและมีขั้นตอนที่เป็นคอขวดในกระบวนการโคไฟตาวนส์ [6]

2.2) การวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (Process Layout)

การวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (PL) เป็นการวางผังโดยจัดกลุ่มของเครื่องจักรที่ทำงานเหมือนกันเข้าไว้ด้วยกัน

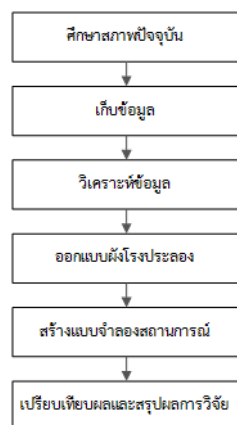
การจัดวางผังแบบนี้มีความยืดหยุ่นสูง เหมาะที่จะใช้ในกรณีที่โรงงานมีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขั้นตอนในการผลิตไม่เหมือนกัน และมีปริมาณการผลิตไม่สูงมากนัก เช่น การจัดผังการผลิตด้วยการจัดกลุ่มของเทคโนโลยีสำหรับโรงงานผลิตเครื่องมือแพทย์ เพื่อเพิ่มยอดการผลิตและความยืดหยุ่น [7] และการลดความสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นด้วยการวางผังของร้านค้าแฟสดในจังหวัดขอนแก่น [8]

2.3) การจำลองสถานการณ์ (Simulation)

การจำลองสถานการณ์เป็นกระบวนการออกแบบจำลอง (model) ของระบบจริง (real system) แล้วดำเนินการทดลองเพื่อให้เรียนรู้พฤติกรรมของระบบงานจริง และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองก่อนนำไปใช้แก้ไขกับปัญหาในสถานการณ์จริงหลากหลายปัญหา เช่น การจำลองสถานการณ์ในการออกแบบผังคลังสินค้าเพื่อลดเวลาในการขนถ่ายวัสดุ [9] การจำลองสถานการณ์เพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของคลินิกอายุรกรรมอาคารผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลมหาสารคาม [10] การจำลองสถานการณ์เพื่อลดเวลารอคอยของผู้ป่วย แผนกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลชุมชน จังหวัดสุพรรณบุรี [11] และการจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตรถกึ่งพ่วง [12]

3) วิธีดำเนินการวิจัย

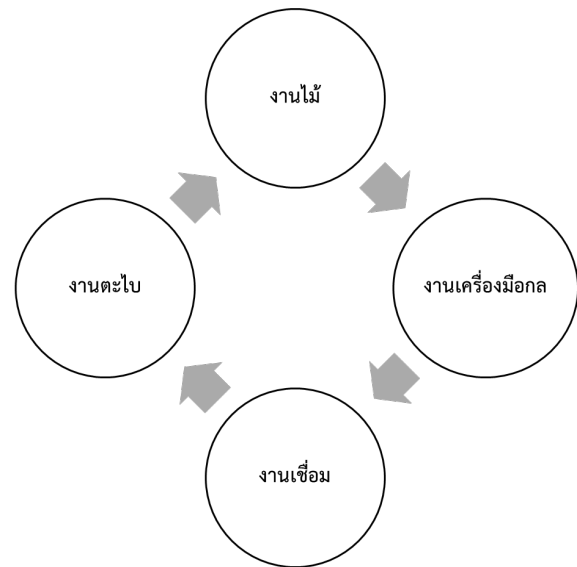
การวางแผนการดำเนินการวิจัยเพื่อให้ได้ผังของโรงประลองทางวิศวกรรมที่เหมาะสม มีการจัดวางพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อความสะดวกในการทำงาน และช่วยให้มีการไหลในการปฏิบัติงานของการเข้าฝึกปฏิบัติงานที่ดี สามารถกำหนดขั้นตอนในการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 : วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) ศึกษาสภาพปัจจุบันของกรณีศึกษา

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเข้าใช้เครื่องจักร/อุปกรณ์ในรายวิชาฝึกปฏิบัติงานของสถานศึกษาต้นแบบ พบว่าในการเข้าฝึกปฏิบัติงานในโรงประลองจะแบ่งการเข้าปฏิบัติออกเป็น 6 กลุ่มย่อย กลุ่มละ 15 คน เพื่อเข้าปฏิบัติงาน 4 ฐาน ได้แก่ งานไม้ งานเครื่องมือกล งานเชื่อม และงานตะไบ โดยปฏิบัติงานฐานละ 2 สัปดาห์ แบ่งเป็น เรียนทฤษฎี 1 สัปดาห์และฝึกปฏิบัติ อีก 1 สัปดาห์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : กิจกรรมการเข้าฝึกปฏิบัติงานในโรงประลอง

3.2) การเก็บข้อมูล

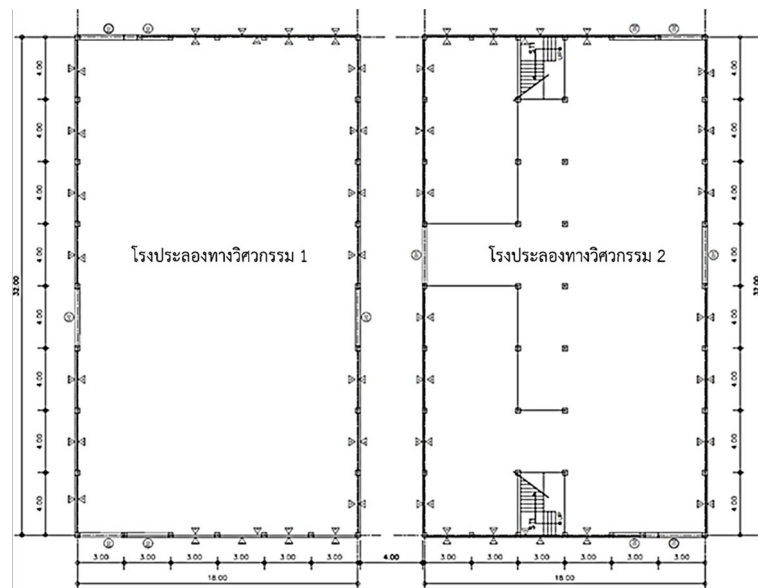
การเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมผู้วิจัยจะทำการรวบรวมข้อมูลของพื้นฐานโรงงาน เพื่อมาใช้ในการพิจารณาการออกแบบและวางผังโรงประลอง ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ที่โรงประลองทางวิศวกรรม รายการเครื่องจักร/อุปกรณ์ และความถี่ของการไหลเข้าฝึกปฏิบัติงาน โดยใช้ข้อมูลของการฝึกปฏิบัติงานในโรงงานของภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2564 โดยใช้แบบฟอร์มบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานแสดงได้ดังนี้

3.2.1) ขนาดและพื้นที่โรงประลองทางวิศวกรรม

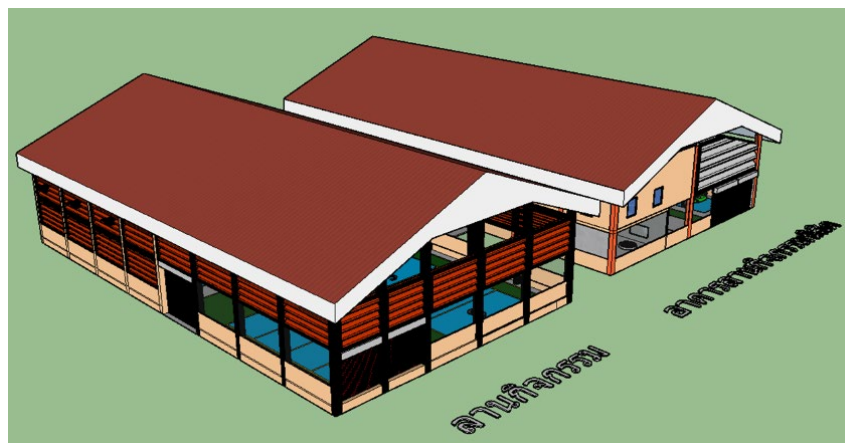
จากการศึกษาสภาพขนาดและพื้นที่ของโรงประลองทางวิศวกรรม โดยผู้วิจัยได้วัดขนาดพื้นที่ของโรงประลองทางวิศวกรรมเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อหาแนวทางในการวางผัง พบว่าโรงประลองทางวิศวกรรมมีทั้งหมด 2 อาคาร โดยแบ่งเป็นโรงประลองทางวิศวกรรม 1 มีพื้นที่ทั้งหมด 576 ตาราง

เมตร และโรงประลองทางวิศวกรรม 2 มีพื้นที่ทั้งหมด 576 ตารางเมตร ซึ่งรวมทั้งหมดมีพื้นที่ 1,152 ตารางเมตร ที่ใช้สำหรับการ

จัดวางผังเครื่องจักร/อุปกรณ์ สโตร์กลาง และพื้นที่ทำโปรเจคของนิสิต แสดงดังรูปที่ 4



1) พื้นที่ของโรงประลอง (มาตราส่วน 1:250 เมตร)



2) ภาพจำลอง 3 มิติของโรงประลอง

รูปที่ 4 : โรงประลองทางวิศวกรรม

3.2.2) รายการเครื่องจักร/อุปกรณ์

ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจและวัดขนาด (ตารางเมตร) ของรายการเครื่องจักร/อุปกรณ์ ซึ่งยังไม่รวมพื้นที่ในการทำงาน พื้นที่ทางเดิน และพื้นที่ในการจัดวางสิ่งสนับสนุนต่าง ๆ พบว่ามีเครื่องจักร/อุปกรณ์ทั้งหมด 88 รายการ โดยใช้พื้นที่ทั้งหมด 398.36 ตารางเมตร แสดงดังตารางที่ 1

3.2.3) ความถี่ของการไหล

การเก็บความถี่ของการไหลเข้าฝึกปฏิบัติงานผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของความถี่ของการไหลเข้าใช้เครื่องจักร/อุปกรณ์ในการเข้าฝึกปฏิบัติงานโดยใช้แผนภูมิจากไป (From to

Chart) ของ 1 กลุ่มเรียน ในภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2564 ดังตารางที่ 2

3.3) การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากทำการเก็บข้อมูลของ ขนาดและพื้นที่โรงประลองทางวิศวกรรม รายการเครื่องจักร/อุปกรณ์ และความถี่ของการไหลเข้าฝึกปฏิบัติงาน ผู้วิจัยจะนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเครื่องจักร/อุปกรณ์ และทำการจัดกลุ่มของเครื่องจักร/อุปกรณ์ เพื่อใช้ในการออกแบบและวางผังของโรงประลองทางวิศวกรรม

3.3.1) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเครื่องจักร/อุปกรณ์ผู้วิจัยได้นำข้อมูลความถี่ของการไหลเข้าฝึกปฏิบัติงานจากตารางที่ 2 มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเครื่องจักร/อุปกรณ์ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความถี่ทั้งหมด เพื่อใช้กำหนดค่าระดับความสัมพันธ์

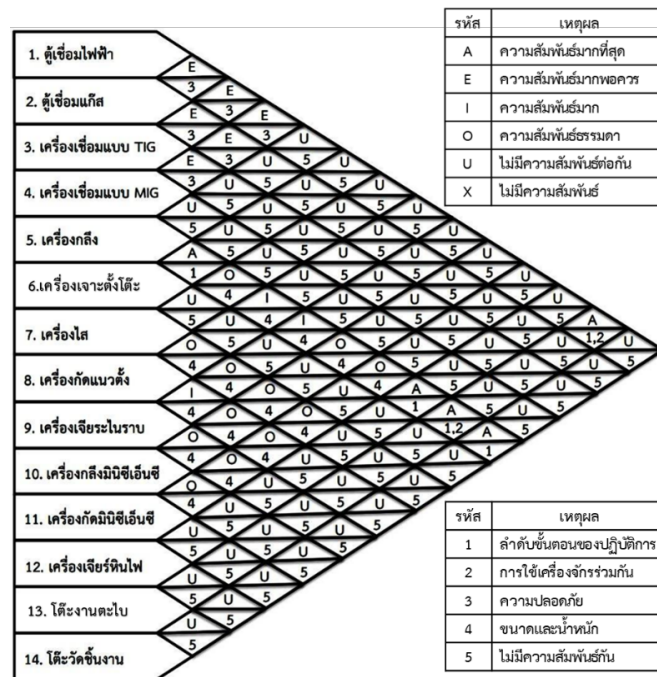
ระหว่างจุดบริการ โดยกำหนดให้ A คือความสัมพันธ์มากที่สุด (40%), E คือความสัมพันธ์มากพอควร (25%), I คือความสัมพันธ์มาก (20%), O คือความสัมพันธ์ธรรมดา (10%), U คือไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (5%) และ X คือไม่มีความสัมพันธ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 : รายการเครื่องจักร/อุปกรณ์และขนาดพื้นที่

เครื่องจักร/อุปกรณ์	สัญลักษณ์	จำนวน (เครื่อง)	พื้นที่ (ตารางเมตร)
จุดเริ่มต้นและสิ้นสุด	S	-	-
ตู้เชื่อมไฟฟ้า	M1	15	52.14
ตู้เชื่อมแก๊ส	M2	15	52.14
ตู้เชื่อมแบบ TIG	M3	2	15.84
ตู้เชื่อมแบบ MIG	M4	2	15.84
เครื่องกลึง	M5	12	105.37
เครื่องเจาะตั้งโต๊ะ	M6	4	9.46
เครื่องไส	M7	2	13.97
เครื่องกัดแนวตั้ง	M8	2	23.45
เครื่องเจียระไนราบ	M9	1	10.88
เครื่องกลึงมินิ CNC	M10	2	12.22
เครื่องกัดมินิ CNC	M11	2	11.21
เครื่องเจียร์หินไฟ	M12	6	12.58
โต๊ะงานตะใบ	T1	12	57.12
โต๊ะวัดชิ้นงาน	T2	1	6.14
รวม		88	398.36

ตารางที่ 2 : ความถี่ของการเข้าฝึกปฏิบัติงาน (หน่วยคน)

ไป จาก	S	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	T1	T2	จำนวน นิสิตรวม
S		180	-	-	180	-	-	-	-	-	-	-	-	360	-	720
M1	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M5	-	-	-	-	180		-	-	-	-	-	-	-	-	-	180
M6	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-
M7	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
M8	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
M9	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-
M10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
M11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-
M12	-	-	-	-	180	-	-	-	-	-	-	-		-	-	180
T1	-	180	-	-	180	-	-	-	-	-	-	-	-		-	360
T2	-	-	-	-	180	-	-	-	-	-	-	-	-	-		180
จำนวน นิสิตรวม	-	360	-	-	900	-	-	-	-	-	-	-	-	360	-	1,620



รูปที่ 5 : แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องจักร/อุปกรณ์

3.3.2) การจัดกลุ่มของเครื่องจักร/อุปกรณ์

จากข้อมูลรายการเครื่องจักร/อุปกรณ์แต่ละประเภทพบว่าในแต่รายการมีจำนวนและขนาดที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลจากการเข้าฐานปฏิบัติงานในแต่ละฐานมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อจัดกลุ่มของเครื่องจักรที่ทำงานเหมือนกันหรือลักษณะการใช้งานเหมือนกันไว้ในกลุ่มเดียวกัน สามารถจำแนกออกได้ 11 กลุ่ม ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : การแบ่งกลุ่มเครื่องจักรตามลักษณะการใช้งาน

กลุ่ม	สัญลักษณ์	ชื่ออุปกรณ์และเครื่องจักร
1	M1	ตู้เชื่อมไฟฟ้า
	M2	ตู้เชื่อมแก๊ส
2	M3	ตู้เชื่อมแบบ TIG
	M4	ตู้เชื่อมแบบ MIG
3	M5	เครื่องกลึง
4	M6	แท่นเจาะ (สว่าน)
5	M7	เครื่องไส
6	M8	เครื่องกัดแนวตั้ง
7	M9	เครื่องเจียรไนราบ
8	M10	เครื่องกลึงมินิ CNC
	M11	เครื่องกัดมินิ CNC
9	M12	เครื่องเจียรหินไฟ
10	T1	โต๊ะงานตะใบ
11	T2	โต๊ะวัดชิ้นงาน

3.4) ออกแบบผังโรงประลอง

การออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมเพื่อให้มีการไหลของการเข้าฝึกปฏิบัติงานที่ดีและเหมาะสม ผู้วิจัยได้นำข้อมูลความสัมพันธ์และการจัดกลุ่มของเครื่องจักร/อุปกรณ์ ตลอดจนนำกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและเครื่องหมายเพื่อความปลอดภัย [13] มาใช้ในการออกแบบและวางผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามหลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบและตามหลักการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต ได้ดังนี้

3.4.1) ผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามหลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ

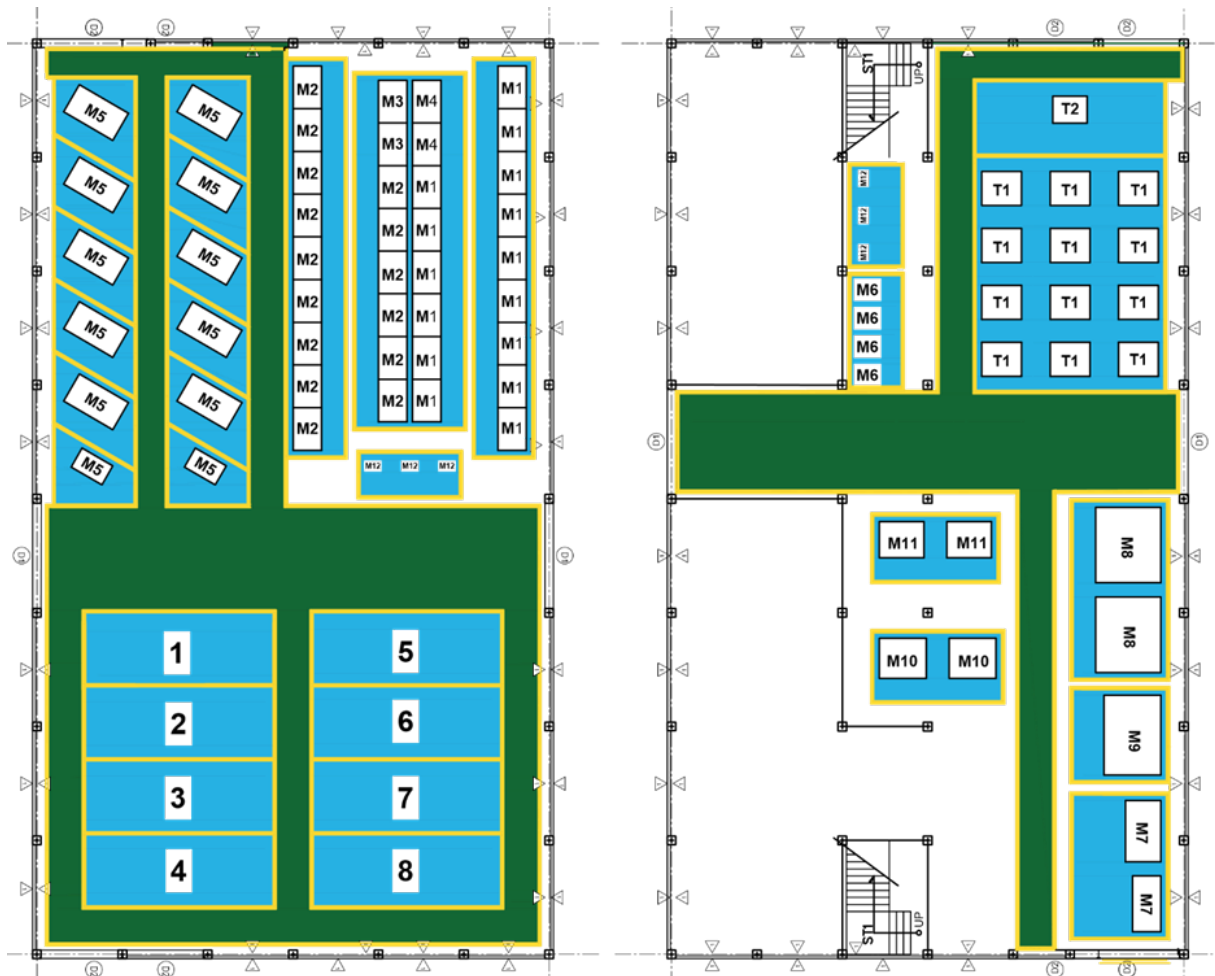
การออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพของการเข้าฝึกปฏิบัติงานผู้วิจัยจะนำข้อมูลที่ได้จากแผนภูมิความสัมพันธ์จากรูปที่ 5 มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบผังโดยนำคู่ของจุดให้บริการที่มีความสัมพันธ์มากที่สุด คือ A มาจัดวางผังก่อน จากนั้นจัดเรียงคู่ของจุดให้บริการตามความสัมพันธ์ E I O U ไปจนถึง X ตลอดจนลำดับขั้นตอนของปฏิบัติการ การใช้เครื่องจักรร่วมกัน ความปลอดภัย และขนาดและน้ำหนักของเครื่องจักร ตามลำดับ สามารถจัดผังโรงประลองทางวิศวกรรมได้ดังรูปที่ 6 โดยจัดวางเครื่องกลึง (M5) และเครื่องเชื่อม (M1-M4) ที่เป็นเครื่องจักรขนาดใหญ่และต้องการถ่ายเทอากาศที่ดี ตลอดจนเครื่องเจียรหินไฟ (M12) บางส่วนที่ทำงานร่วมกันกับเครื่องกลึง (M5) และเครื่องเชื่อม (M1-M4) ไว้ที่โรงประลองทางวิศวกรรม 1

ซึ่งมีพื้นที่ในแนวตั้งมากกว่าโรงประลองทางวิศวกรรม 2 เพราะไม่มีห้องเรียนที่อยู่บนชั้นลอย ส่วนเครื่องจักรที่เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ (M7-M11) ตลอดจนโต๊ะที่มีปากกาจับชิ้นงาน (T1) และโต๊ะวัดชิ้นงาน (T2) ผู้วิจัยได้จัดไว้ในโรงประลองทางวิศวกรรม 2

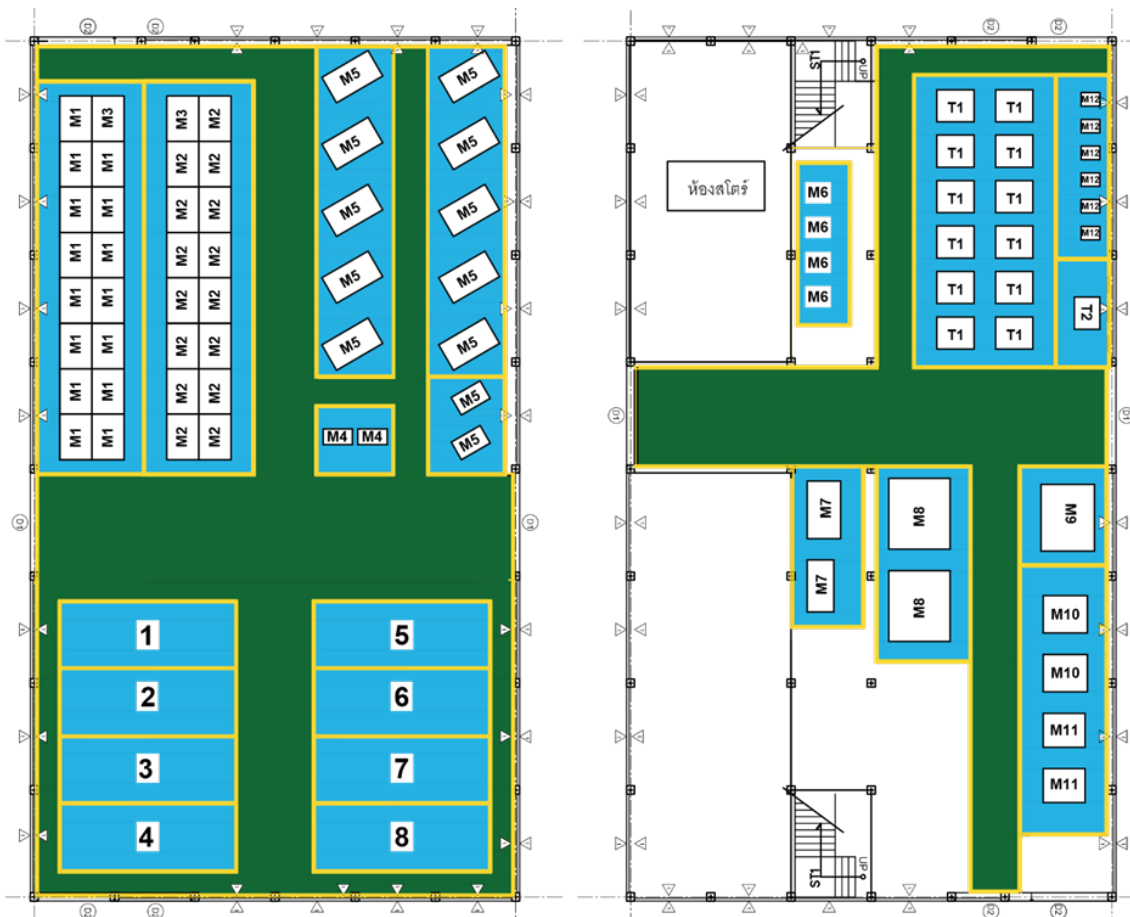
3.4.2) ผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามหลักการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต

การออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมด้วยการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (process layout) เป็นการจัดวางเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เป็นหมวดหมู่ โดยผู้วิจัยได้นำข้อมูลความถี่ของการไหลเข้าฝึกปฏิบัติงานจากตารางที่ 2 และการจัดกลุ่มของเครื่องจักร/อุปกรณ์จากตารางที่ 3 มาใช้ในการ

วิเคราะห์เพื่อจัดกลุ่มของเครื่องจักรที่ทำงานเหมือนกันไว้ด้วยกัน ตลอดจนคำนึงถึงลำดับขั้นตอนของปฏิบัติการ ความปลอดภัย และขนาดและน้ำหนักของเครื่องจักร สามารถจัดผังโรงประลองทางวิศวกรรมได้ดังรูปที่ 7 โดยผู้วิจัยได้จัดวางกลุ่มของเครื่องกลึง (M5) และกลุ่มของเครื่องเชื่อม (M1-M4) ไว้ที่โรงประลองทางวิศวกรรม 1 เนื่องจากเป็นเครื่องจักรขนาดใหญ่และต้องการถ่ายเทของอากาศ ซึ่งโรงประลองทางวิศวกรรม 1 มีพื้นที่ในแนวตั้งมากกว่าโรงประลองทางวิศวกรรม 2 ส่วนกลุ่มของแท่นเจาะ (M6) กลุ่มเครื่องจักรเทคโนโลยีสมัยใหม่ (M8-M11) กลุ่มของโต๊ะที่มีปากกาจับชิ้นงาน (T1) กลุ่มของเครื่องเจียระไนไฟ (T12) และโต๊ะวัดชิ้นงาน (T2) ผู้วิจัยได้จัดไว้ในโรงประลองทางวิศวกรรม 2



รูปที่ 6 : ผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามหลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ (มาตราส่วน 1:250 เมตร)



รูปที่ 7 : แผนผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามหลักการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (มาตราส่วน 1:250 เมตร)

3.5) สร้างแบบจำลองสถานการณ์

หลังจากทำการออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมแล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลของการเข้าปฏิบัติงานมาทำการวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล และสร้างแบบจำลองสถานการณ์ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ของการเข้าปฏิบัติงานเพื่อเปรียบเทียบผลของผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามหลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบกับการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิตแสดงได้ดังนี้

3.5.1) การกำหนดพารามิเตอร์

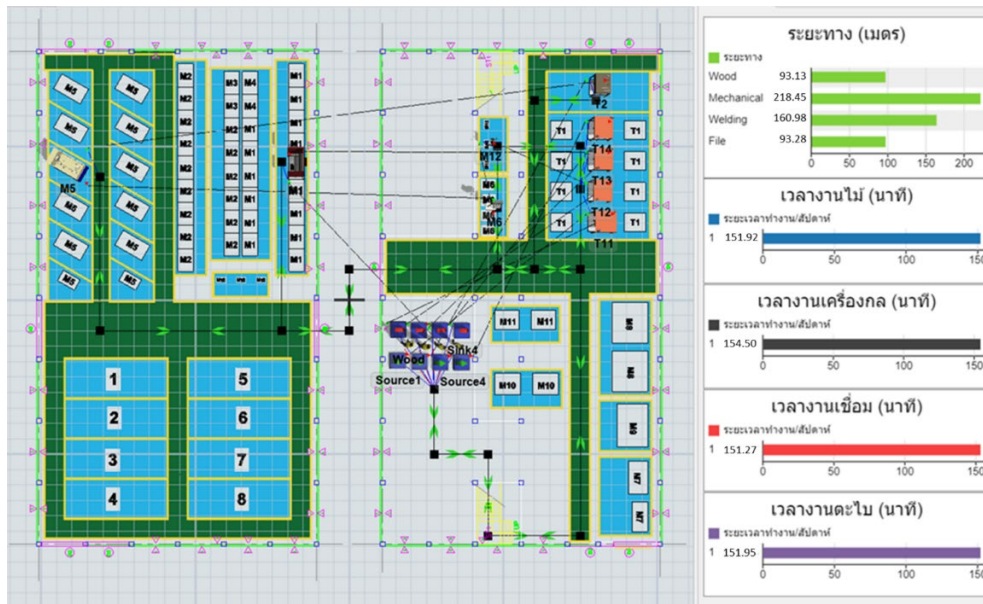
การวิเคราะห์การแจกแจงข้อมูลของเวลาเข้าปฏิบัติงานในเครื่องจักร/อุปกรณ์ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลของผู้ปฏิบัติงาน 1 กลุ่มเรียนที่มี 15 คนมาทำการวิเคราะห์เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองสถานการณ์ โดยใช้ Normality Test ซึ่งพบว่า ค่า P-Value ของการปฏิบัติงานแต่ละฐานมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4: การวิเคราะห์การแจกแจงเพื่อกำหนดพารามิเตอร์

เวลาในการปฏิบัติงาน (นาท)	Mean	S.D.	AD	P-Value
งานไม้	149.10	1.07	0.68	0.06
งานเครื่องกล	149.10	1.25	0.55	0.13
งานเชื่อม	149.30	1.12	0.46	0.23
งานตะไบ	149.90	0.73	0.52	0.15

3.5.2) แบบจำลองสถานการณ์

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ ผู้วิจัยจะนำข้อมูลของขั้นตอนเข้าปฏิบัติงาน เส้นทางการเข้าปฏิบัติงาน เวลาในการเข้าปฏิบัติงาน และระยะทางในการเคลื่อนที่ระหว่างเครื่องจักร/อุปกรณ์ มาทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ ตามการวางผังโรงประลองด้วยหลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบและหลักการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 : แบบจำลองสถานการณ์

3.5.3) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้องและได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด [9] โดยการเปรียบเทียบผู้วิจัยได้ทำการวัดระยะทางรวมและเวลารวมของผู้ปฏิบัติงานของนิสิตหนึ่งคนในการเข้าปฏิบัติงานไปกลับจนครบทุกฐานในสถานที่จริงโดยใช้ตลับเมตรและนาฬิกาในการบันทึกข้อมูล เทียบกับผลลัพธ์ของการประมวลผลจากแบบจำลองสถานการณ์ โดยต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 จากนั้นจะนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกับเพื่อหาร้อยละความคลาดเคลื่อนดังสมการที่ 1

$$\% \text{ Difference} = \left| \frac{E-S}{E} \right| \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ E คือ ระยะทางรวมของผู้เข้าปฏิบัติงานสถานที่จริง

S คือ ระยะทางรวมของผู้เข้าปฏิบัติงานจากการจำลองสถานการณ์

เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะทางรวมและเวลารวมของผู้เข้าปฏิบัติงานสถานที่จริงจากตารางที่ 5 กับการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากตารางที่ 6 ลงในสมการที่ 1 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนของระยะทางรวมร้อยละ 0.39 และเวลารวมร้อยละ 0.60 สำหรับผังตามหลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ ส่วนผังตามกระบวนการผลิตมีความคลาดเคลื่อนของระยะทางรวมร้อยละ 0.31 และเวลารวมร้อยละ 0.86 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลองสถานการณ์มีรูปแบบใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง และสามารถนำแบบจำลองสถานการณ์มาใช้ในการจำลองแทนสถานการณ์จริงได้

ตารางที่ 5 : ผลการเปรียบเทียบขั้นตอน ระยะทางรวม และเวลารวมในการเข้าปฏิบัติการ

ฐาน	การไหล	ขั้นตอน		ระยะทางรวม (เมตร/คน)		เวลารวม (นาทื/คน)	
		SLP	PL	SLP	PL	SLP	PL
งานไม้	S-T1-S	3	3	94.10	99.18	152.02	160.33
งานเครื่องกล	S-T2-M5-M6-M12-T1-S	11	11	220.04	213.49	155.90	154.89
งานเชื่อม	S-M1-T1-S	5	5	161.80	196.00	153.87	176.13
งานตะไบ	S-T1-S	3	3	92.10	98.78	151.55	160.51
รวม		22	22	568.04	607.45	613.34	651.86

หมายเหตุ: SLP คือการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ , PL คือการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต

ตารางที่ 6 : ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ฐาน	การไหล	ขั้นตอน		ระยะทางรวม (เมตร/คน)		เวลารวม (นาที/คน)	
		SLP	PL	SLP	PL	SLP	PL
งานไม้	S-T1-S	3	3	93.13	99.68	151.92	159.98
งานเครื่องกล	S-T2-M5-M6-M12-T1-S	11	11	218.45	212.66	154.50	151.34
งานเชื่อม	S-M1-T1-S	5	5	160.98	197.28	151.27	175.92
งานตะไบ	S-T1-S	3	3	93.28	99.69	151.95	159.01
รวม		22	22	565.84	609.31	609.64	646.25

หมายเหตุ: SLP คือการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ , PL คือการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต

4) ผลการดำเนินงาน

หลังจากทำการเก็บข้อมูล วิเคราะห์ความสัมพันธ์ การจัดกลุ่มของเครื่องจักร/อุปกรณ์ และออกแบบผังของโรงประลองทางวิศวกรรมเพื่อจัดวางพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยให้มีการไหลในการปฏิบัติงานของการเข้าฝึกปฏิบัติงานที่ดี จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลของการไหลการเข้าปฏิบัติงาน และผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังนี้

4.1) ผลของการไหลการเข้าปฏิบัติงาน

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการไหลเข้าปฏิบัติงานตามฐานของผังโรงงานอย่างมีระบบและผังโรงงานตามกระบวนการผลิตโดยวัดจากนิสิตหนึ่งคนในการเข้าปฏิบัติงานไปกลับจนครบทุกฐานในสถานที่จริง ดังรูปที่ 10 เพื่อเปรียบเทียบขั้นตอนระยะทางรวม และเวลารวมที่ใช้ในการเข้าปฏิบัติงาน แสดงผลดังตารางที่ 5 พบว่าของผังโรงงานอย่างมีระบบมีระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 568.04 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 613.34 นาที/คน ซึ่งน้อยกว่าผังโรงงานตามกระบวนการผลิตที่ระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 607.45 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 651.86 นาที/คน

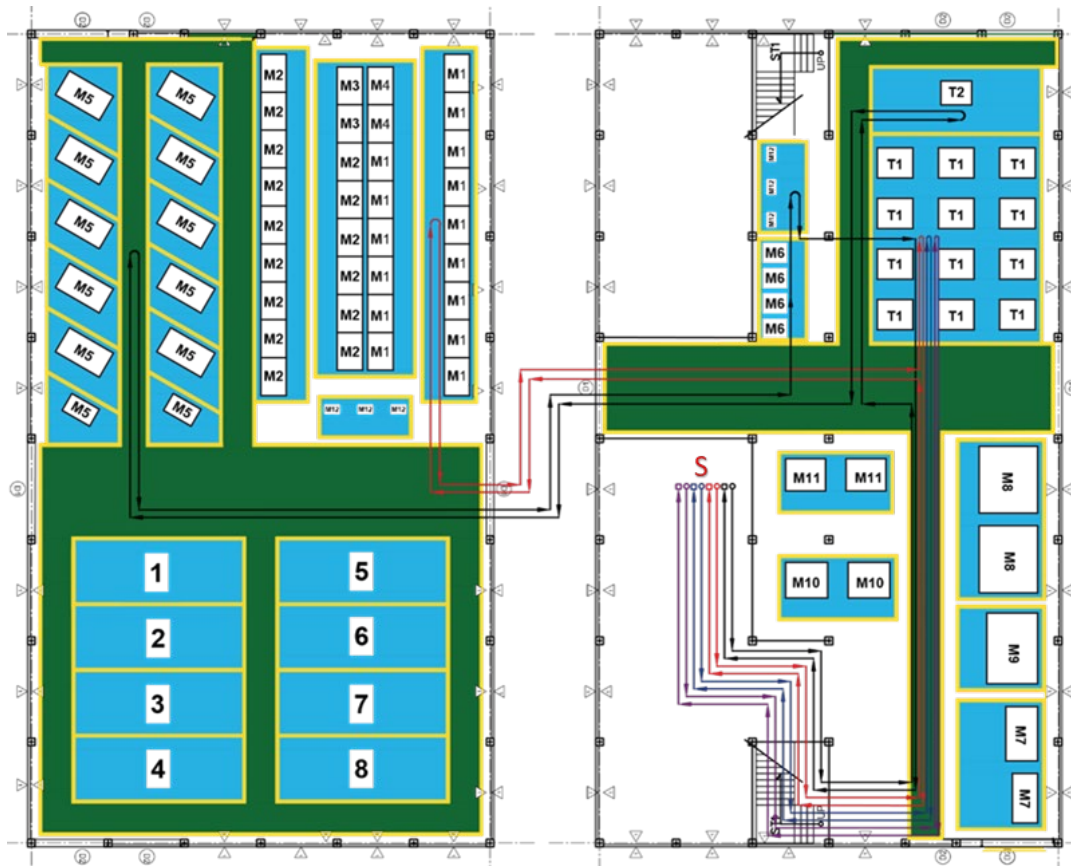
จากรูปที่ 10 แสดงการไหลหลังของโรงประลองวิศวกรรมโดยกำหนดฐานงานไม้เส้นสีน้ำเงิน ฐานงานเครื่องกลเส้นสีดำ ฐานงานเชื่อมเส้นสีแดง และฐานงานตะไบเส้นสีม่วง ซึ่งมีจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดแต่ละงานที่จุด S

4.2) ผลการจำลองสถานการณ์

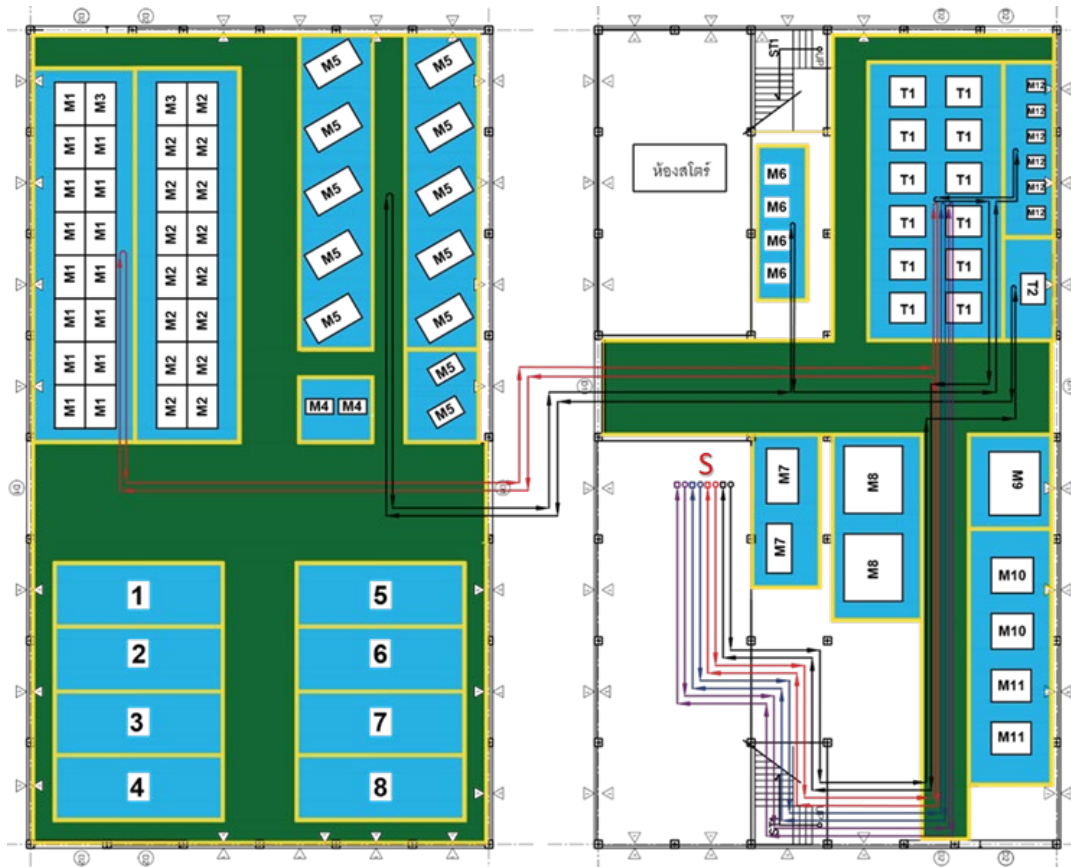
เมื่อออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามการวางผังโรงงานอย่างมีระบบและกระบวนการผลิตแล้ว ผู้วิจัยนำผังที่ได้ไปทำการจำลองสถานการณ์ของการไหลของผู้เข้าปฏิบัติการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำนวน 1 รอบของการเข้าปฏิบัติงานหนึ่งคนต่อเนื่องจนครบทุกฐาน ดังตารางที่ 6 ซึ่งพบว่าการจำลองสถานการณ์ของผังโรงงานอย่างมีระบบมีระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 565.36 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 609.64 นาที/คน ซึ่งน้อยกว่าผังโรงงานตามกระบวนการผลิตที่ระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 609.31 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 646.25 นาที/คน

4.3) การเปรียบเทียบผัง

หลังจากทำการเปรียบเทียบผลของระยะทางรวมในการเข้าปฏิบัติงาน เวลารวมในการเข้าปฏิบัติงาน และการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยจะนำผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้มาทำการเปรียบเทียบผังด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของแต่ละผังโดยทำการประเมินคะแนนร่วมกันโดยการประชุมหารือกับผู้สอนในแต่ละฐานปฏิบัติงานทั้ง 4 ฐาน จำนวน 4 คน และผู้บริหารสถานศึกษาจำนวน 2 คน เพื่อการตัดสินใจเลือกผังที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังตารางที่ 7 แสดงผลของการเปรียบเทียบผังด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ออกมาในรูปแบบของคะแนน



1) แผนผังโรงงานอย่างมีระบบ (มาตราส่วน 1:250 เมตร)



2) แผนผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (มาตราส่วน 1:250 เมตร)

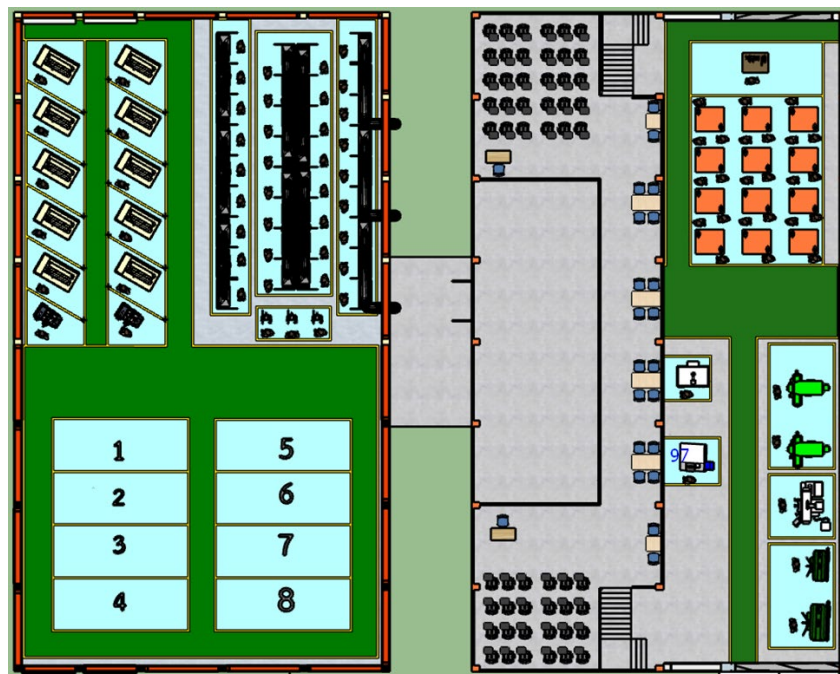
รูปที่ 10 : แผนภาพการไหลหลังของโรงประลองวิศวกรรม

ตารางที่ 7 : การเปรียบเทียบผังด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบ

องค์ประกอบ	น้ำหนัก	Ratings and Weighted Rating			
		SLP		PL	
1. ระยะทางในการปฏิบัติงาน	10	A	40	E	30
2. เวลาในการปฏิบัติงาน	10	A	40	E	30
3. การไหลในการปฏิบัติงาน	9	E	27	E	27
4. การจัดวางเครื่องจักร/อุปกรณ์	9	E	27	I	18
5. ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน	8	E	24	E	24
6. การใช้พื้นที่	7	I	14	I	14
7. ความยืดหยุ่น	6	I	12	I	12
รวม		184		155	

หมายเหตุ : A = ดีเลิศ มีค่าคะแนน 4, E = ดีมาก มีค่าคะแนน 3, I = ดี มีค่าคะแนน 2, O = ดี มีค่าคะแนน 1 และ U = เลวร้ายมีค่าคะแนน 0

โดยหาได้จากผลของค่าคะแนน (A E I O U) คูณด้วยค่าน้ำหนัก ที่ผลของคะแนนรวมพบว่าผังโรงประลองทางวิศวกรรมอย่างมีระบบให้คะแนนรวมที่สูงกว่าผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามกระบวนการผลิต กล่าวคือการออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมตามการวางผังอย่างมีระบบถึงแม้ว่าการจัดวางของกลุ่มของเครื่องจักร/อุปกรณ์ลงโรงประลองทางวิศวกรรม 1 และ 2 จะมีกลุ่มของเครื่องจักร/อุปกรณ์ที่คล้ายกันในบางกลุ่มกับการวางผังตามกระบวนการผลิต แต่ตำแหน่งและทิศทางในการจัดวางแตกต่างกัน และเมื่อนำผังที่ได้ไปจำลองสถานการณ์พบว่าผังโรงประลองทางวิศวกรรมอย่างมีระบบให้ระยะทางในการปฏิบัติงานและเวลาในการปฏิบัติงานที่ต่ำกว่าจึงทำให้ได้คะแนนในองค์ประกอบของระยะทางในการปฏิบัติงาน เวลาในการปฏิบัติงาน และการจัดวางเครื่องจักร/อุปกรณ์ที่มากกว่าผังตามกระบวนการผลิต ส่วนในองค์ประกอบของการไหล ความปลอดภัย การใช้พื้นที่ และความยืดหยุ่น ทางผู้ประเมินให้คะแนนเท่ากันทุกองค์ประกอบ ผู้วิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่าการวางผังโรงประลองทางวิศวกรรมอย่างมีระบบให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต สามารถแสดงผังดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 : ผังโรงประลองทางวิศวกรรม (มาตราส่วน 1:250 เมตร)

5) สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการออกแบบและจัดผังโรงประลองทางวิศวกรรมของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ในปัจจุบันมี

ความต้องการออกแบบและจัดผังโรงประลองทางวิศวกรรม (Fabrication Laboratory: FABLAB) ที่ซึ่งรวบรวมอุปกรณ์และเครื่องมือทางวิศวกรรม ให้นิสิตได้ฝึกทำการทดลอง และลงมือ

สร้างชิ้นงานจากความคิดและจินตนาการ ตลอดจนใช้ในการเรียนการสอนวิชาฝึกปฏิบัติทางวิศวกรรม ภายใต้การไหลของกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้ใช้ระยะทางและเวลาในการเข้าปฏิบัติงานสั้นลงไปด้วย ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและจัดวางผังด้วยการประยุกต์ใช้หลักการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ (Systematic Layout Planning: SLP) และการวางผังโรงงานตามกระบวนการผลิต (Process Layout: PL) ร่วมกับการจำลองสถานการณ์ (simulation) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วเปรียบเทียบผลพบว่าผังโรงประลองทางวิศวกรรมอย่างมีระบบให้ระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 565.84 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 609.64 นาที/คน ซึ่งน้อยกว่าผังโรงงานตามกระบวนการผลิตที่ระยะทางรวมของการเข้าปฏิบัติงาน 609.31 เมตร/คน และเวลารวมในการเคลื่อนที่ 646.25 นาที/คน หรือคิดเป็นร้อยละ 7.13 ของระยะทางรวม และร้อยละ 5.66 ของเวลารวมในการเคลื่อนที่

จากนั้นทำการเปรียบเทียบด้วยวิธีการวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบร่วมกับผู้สอนและผู้บริหารของสถานศึกษาต้นแบบ พบว่าผังโรงประลองทางวิศวกรรมอย่างมีระบบได้คะแนนรวมมากกว่าผังตามกระบวนการผลิตในองค์ประกอบของระยะทางของการเข้าปฏิบัติงาน เวลาในการปฏิบัติงาน และการจัดวางเครื่องจักร/อุปกรณ์ เนื่องจากมีการจัดวางตำแหน่งของเครื่องจักร/อุปกรณ์สำหรับการเข้าปฏิบัติงานที่เหมาะสมมากกว่า และเมื่อนำผังที่ได้ไปทำการจำลองสถานการณ์ทำให้ได้ผลลัพธ์ของระยะทางและเวลารวมที่สั้นกว่า จึงส่งผลทำให้ได้คะแนนรวมที่มากกว่าผังตามกระบวนการผลิต จึงสามารถสรุปได้ว่าผังโรงประลองทางวิศวกรรมอย่างมีระบบคือผังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางผังโรงประลองทางวิศวกรรมของสถานศึกษาต้นแบบ

6) ข้อเสนอแนะ

1) การออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมยังไม่ได้คำนึงข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายของ ระบบน้ำ ระบบไฟฟ้า ระบบการระบายอากาศมาพิจารณาเป็นทางเลือกในการตัดสินใจของการเลือกผังโรงประลอง ดังนั้นจึงควรนำข้อจำกัดดังกล่าวมาพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อประกอบการตัดสินใจ

2) เนื่องจากเป็นการนำข้อมูลของการเข้าปฏิบัติงานของสถานศึกษาต้นแบบเพียงบางส่วนมาใช้ในการวิเคราะห์และจำลองสถานการณ์ จึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้อาจเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของข้อมูล

3) ด้วยข้อจำกัดในการเข้าถึงข้อมูลทำให้ไม่สามารถประมวลผลได้อย่างชัดเจน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนจึงจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลเพิ่มทั้งในส่วนของคุณภาพและข้อมูลเชิงปริมาณ

4) เนื่องจากสถานการณ์ของโรคระบาดในปัจจุบันอาจส่งผลต่อการเข้าปฏิบัติงานและข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจต้องทำการเก็บข้อมูลเพิ่มขึ้นหรือจัดทำข้อมูลใหม่ในบางส่วนสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการออกแบบผังโรงประลองทางวิศวกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความร่วมมือในการเก็บและให้ข้อมูลเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยการผลิตและวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

REFERENCES

- [1] C. Porsing, S. Amphutsa, J. Kanchana-anothai, and P. Tharawetcharak, "Process and plant layout improvement using industrial engineering techniques: A case study sample LED light factory," (in Thai), *Thai Sci. Technol. J.*, vol. 27, no. 6, pp. 1132–1146, 2019.
- [2] T. Kongtong, P. Phanritdum, and C. Chamnanlor, "Simulation modeling to improve the efficiency of the steamed stuffed buns production," (in Thai), *SWU Eng. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 71–80, 2020.
- [3] K. B. Bagaskara, L. Gozali, and L. Widodo, "Redesign layout planning of raw material area and production area using systematic layout planning (SLP) methods (case study of CV Oto Boga Jaya)," in *Proc. 2nd Tarumanagara Int. Conf. Appl. Technol. and Eng. (TICATE)*, Jakarta, Indonesia, Nov. 2019, pp. 1–8.
- [4] P. Tearwattanarattikal, U. Kampoorn, and S. Charoenvilaisiri, "Design of plant layout alternatives for the fruit and vegetable processing industry," (in Thai), *Sripatum Chonburi J.*, vol. 16, no. 4, pp. 28–38, 2020.

- [5] S. Chaisurayakarn, N. Limsuwan, B. Kabklon, R. Tiandum, R. Nannun, and R. Suwantechasit, "Business layout improvement with systematic layout planning concept: A case study of engine repair business," (in Thai), *J. Logistics and Supply Chain College*, vol. 7, no. 2, pp. 64–80, 2021.
- [6] P. Homsri, "A plant layout improvement to increasing productivity: A case study downlight manufacturer," (in Thai), *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 9, no. 2, pp. 25–36, 2021.
- [7] R. Chanphaeng, M. Thumjaroen, and C. Pomsing, "Production layout using group technology for a medical device factory," (in Thai), *Thai Sci. Technol. J.*, vol. 26, no. 5, pp. 855–865, 2018.
- [8] K. Thatphet and P. Ruangchoengchum, "An elimination of non-value added movement by organizing production process layout: A case study of fresh coffee shop business in Khon Kaen province," (in Thai), *J. Manag. Sci. Ubon Ratchathani Univ.*, vol. 10, no. 2, pp. 1–24, 2021.
- [9] C. Bunterngchit, "Simulation-based application in warehouse layout design for reducing material handling time," (in Thai), *Kasem Bundit Eng. J.*, vol. 8, no. 3, pp. 1–14, 2018.
- [10] P. Sresracoo and K. Chantarasamai, "Simulation for improving service effectiveness of the medicine clinic at outpatient building, Mahasarakham hospital," (in Thai), *Kasem Bundit Eng. J.*, vol. 9, no. 3, pp. 184–200, 2019.
- [11] P. Manmor and T. Wasusri, "The reduction of patient's waiting time at an outpatient department using simulation modeling : A community hospital in Suphanburi province," (in Thai), *Isan J. Pharm. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 51–62, 2019.
- [12] T. Kongthong and C. Chamnanlor, "Simulation modeling to increasing the efficiency semi-trailer production," (in Thai), *KKU Res. J. (Graduate Stud.)*, vol. 21, no. 3, pp. 13–26, 2021.
- [13] *Standards for Industrial Products: Paints and Safety Signs*, TIS 635–2554, Royal Thai Government Gazette, Ministry of Industry, Mar. 1 , 2012. [Online]. Available: <https://www.supakornsafety.com/wp-content/uploads/2018/12/unlocked.pdf>

การจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบ การจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในองค์กร กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยในกำกับ ของรัฐแห่งหนึ่ง

มะลิวรรณ พุฒมารา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม, ประเทศไทย

ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : maliwan.phu@mahidol.ac.th

รับต้นฉบับ : 9 ธันวาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข : 22 มกราคม 2566; ตอบรับบทความ : 28 กุมภาพันธ์ 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอกรอบการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Document Management Systems: EDMS) มาใช้ในองค์กร โดยประยุกต์วิธีการการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์จากการทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง สามารถระบุปัจจัยอุปสรรคการนำระบบ EDMS ได้จำนวน 12 ปัจจัย และแนวทางเอาชนะอุปสรรค ได้จำนวน 10 ปัจจัย งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์น้ำหนักของปัจจัยอุปสรรค ด้วยน้ำหนักประสม (combine weights) โดยผสมผสานระหว่างน้ำหนักอัตวิสัย (subjective weights) และ น้ำหนักภววิสัย (objective weights) การคำนวณน้ำหนักอัตวิสัย ประยุกต์ใช้วิธีการ “Decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL)” ในขณะที่น้ำหนักภววิสัย คำนวณโดยการประยุกต์ใช้วิธี สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation: COV) จากนั้นประยุกต์ใช้วิธี “Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)” ในการจัดอันดับแนวทางการเอาชนะอุปสรรค สุดท้ายทดสอบความน่าเชื่อถือ (reliability) ของกรอบงานวิจัยที่เสนอโดยการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลโดยใช้กรณีศึกษาของ มหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐแห่งหนึ่ง นอกจากนั้น องค์กรอื่น ๆ ที่มีแผนจะนำระบบ EDMS มาใช้ในองค์กร สามารถประยุกต์ใช้กรอบงานวิจัยที่เสนอในการประเมินการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรค ได้เช่นกัน

คำสำคัญ : ปัจจัยอุปสรรค ระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ แนวทางการเอาชนะอุปสรรค



Prioritizing Overcoming Organizational Barriers to Implementing Electronic Document Management Systems: Case Study of an Autonomous University

Maliwan Phuttara

Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand

Corresponding Author. E-mail address: maliwan.phu@mahidol.ac.th

Received: 9 December 2022; Revised: 22 January 2023; Accepted: 28 February 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

This research proposes a framework for prioritizing overcoming organizational barriers in implementing electronic document management systems (EDMS) by applying multi-criteria decision-making approach. Twelve barriers and ten overcoming solutions are identified through extensive relevant literature review. In this study, the combination weights by integrating subjective weights and objective weights are used to calculate the importance weights of barriers factors. Subjective weights are computed by “Decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL)”, while objective weights are computed by “Coefficient of Variation (COV)”. “Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)” approach is utilized to prioritize the overcoming solutions. A sensitivity analysis is conducted to verify the reliability of the proposed framework. One of the autonomous universities is used as a case study to collect the required data. Furthermore, other organizations that aim to implement EDMS system can similarly apply the proposed framework in this study to prioritize their overcoming solutions.

Keywords: Barriers factors, Electronic Document Management Systems: EDMS, Multi-criteria decision making, Overcoming solutions

1) บทนำ

ในยุคดิจิทัลและยุคสารสนเทศ องค์กรต่าง ๆ ทั่วโลก ต้องเผชิญความท้าทายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในการเปลี่ยนผ่านกระบวนการทางธุรกิจขององค์กรไปสู่ดิจิทัล เพื่อรักษาความสามารถในการแข่งขันไว้ ในด้านกระบวนการธุรกิจทั้งหมด ระบบการจัดการเอกสารเป็นหนึ่งในกระบวนการพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับองค์กรที่ต้องเปลี่ยนผ่านไปสู่ดิจิทัล เนื่องจากองค์กรมีการสร้างและแลกเปลี่ยนเอกสารจำนวนมากในการทำธุรกรรมของธุรกิจ เช่น อีเมล แฟกซ์ จดหมายเวียน เอกสารสัญญา ฯลฯ แต่เกือบทั้งหมดอยู่ในระบบที่เป็นกระดาษ ส่งผลให้เกิดปัญหาตามมาหลายประการ [1] เช่น ค่าใช้จ่ายสูง พื้นที่จัดเก็บไม่เพียงพอ ความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหาย ปัญหาด้านความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัว การตรวจสอบย้อนกลับ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังทำให้ไม่เกิดความเชื่อมโยงทางกระบวนการทางธุรกิจ ไม่สามารถจัดการการไหลของเอกสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งนำไปสู่การจำกัดการสื่อสารและการทำงานร่วมกันทั้งภายในและระหว่างองค์กร [2] แนวทางการจัดการกับปัญหาดังกล่าว องค์กรส่วนใหญ่ได้พยายามที่จะเปลี่ยนผ่านจากระบบที่ใช้กระดาษไปสู่ระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Document Management System: EDMS) งานวิจัยโดย Ahmad และคณะ ชี้ให้เห็นว่าประโยชน์ของการนำระบบ EDMS มาช่วยการจัดการเอกสารในองค์กร ลดเวลาในการค้นหาเอกสาร ลดจำนวนเจ้าหน้าที่ในการปฏิบัติการ อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อทรัพยากร ในการจัดการเอกสาร ลดจำนวนเจ้าหน้าที่ในการปฏิบัติการ มีความปลอดภัยและกำหนดสิทธิในการจัดการได้และยังช่วยลดปริมาณขยะ ลดการตัดต้นไม้ อันก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนอีกด้วย [3] การนำระบบ EDMS มาใช้ในองค์กรถือเป็นหนึ่งในกลยุทธ์หลักที่ต้องพิจารณาในยุคดิจิทัล ถึงแม้ว่าระบบ EDMS จะมีประโยชน์มากมาย แต่ทว่าที่ผ่านมาหลายองค์กรที่พยายามจะนำระบบ EDMS มาใช้กลับประสบความล้มเหลว เนื่องจากต้องเผชิญอุปสรรคมากมาย ในแง่มุมของการวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาประเด็นดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยมุ่งที่จะปิดช่องว่างงานวิจัย (bridge the gap) โดยได้เสนอกรอบการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในองค์กร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) โดยการบูรณาการเทคนิคเครื่องมือในศาสตร์นี้ ได้แก่ DEMATEL (Decision Making Trial And Evaluation Laboratory),

COV (Coefficient of Variation) และ TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดย DEMATEL ประยุกต์ใช้ในการคำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัย (subjective weights) ของปัจจัยอุปสรรคของการพัฒนาระบบ EDMS เหตุผลที่นำ DEMATEL มาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเครื่องมือ MCDM อื่น ๆ ที่ใช้คำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัย เช่น AHP (Analytical Hierarchy Process), SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis), Simple Multi-attribute Rating Technique (SMART) และ CFPR (Consistent Fuzzy Preference Relation) เป็นต้น โดยวิธีทั้งหมดที่กล่าวมามีจุดอ่อนหลัก (major weak point) คือ ปัจจัย/ตัวแปรที่พิจารณาต้องมีความสัมพันธ์ที่เป็นอิสระต่อกัน (independent relation) ซึ่งในความจริงปัญหาส่วนใหญ่ในเชิงวิศวกรรมหรือธุรกิจอุตสาหกรรม ปัจจัย/ตัวแปรที่พิจารณาอาจไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งในส่วนของเทคนิค DEMATEL พิจารณาอิทธิพลและปฏิสัมพันธ์ (influence and interaction) ระหว่างปัจจัย/ตัวแปรที่พิจารณา อีกทั้ง DEMATEL สามารถวิเคราะห์แบ่งกลุ่ม ปัจจัย/ตัวแปรที่พิจารณา ออกเป็น กลุ่มของสาเหตุ (causal group) และ กลุ่มของผลที่ตามมา (effect group) ซึ่งจะทำให้ผู้ที่นำผลลัพธ์ไปใช้ สามารถเข้าใจความสัมพันธ์ของปัจจัย/ตัวแปร และนำไปสู่การจัดลำดับความสำคัญในการแก้ปัญหาได้ [4]

ในส่วน of เครื่องมือ COV งานวิจัยนี้ ประยุกต์ใช้ในการคำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัย (objective weights) ของปัจจัยอุปสรรคของการพัฒนาระบบ EDMS ข้อได้เปรียบของการใช้วิธีนี้เมื่อเทียบกับเครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้คำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัย เช่น Entropy weight, CRITIC (CRiteria Importance Through Inter-criteria Correlation) และ MEREC (MethoD based on the Removal Effects of Criteria) เป็นต้น ซึ่งวิธีดังกล่าวข้างต้น จะใช้วิธีการคำนวณตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และเสียเวลาในการคำนวณมาก ซึ่งในส่วน of COV มีการคำนวณที่ง่ายโดยใช้ฟังก์ชันสถิติพื้นฐานไม่ต้องใช้ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยาก แต่ให้ผลลัพธ์การคำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัย เป็นที่น่าพอใจ [5]

ในส่วน of เครื่องมือ TOPSIS งานวิจัยนี้ ประยุกต์ใช้ในการลำดับความสำคัญ (ranking) ของปัจจัย/ตัวแปรแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบ EDMS มาใช้ในองค์กร ข้อได้เปรียบของการใช้วิธีนี้เมื่อเทียบกับเครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้ในการ Ranking ปัจจัย/ตัวแปร เช่น AHP, ANP (Analytical Network Process),

PROMETHEE (the Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation) เป็นต้น ซึ่งวิธีดังกล่าวข้างต้น จะใช้การเปรียบเทียบปัจจัย/ตัวแปร เป็นคู่ ๆ (pairwise comparison) ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากเสียเวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก ไม่เหมาะกับปัญหาที่มีจำนวนปัจจัย/ตัวแปรจำนวนมาก ข้อได้เปรียบของการใช้ TOPSIS คือ การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างปัจจัย/ตัวแปรในอุดมคติ (ideal solution) กับ ปัจจัย/ตัวแปรที่ศึกษา จึงไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการ Pairwise comparison ทำให้ได้คำตอบที่รวดเร็วกว่า อีกทั้ง TOPSIS ยังเป็นวิธีที่เหมาะสมกับปัญหาการตัดสินใจที่มีจำนวนปัจจัย/ตัวแปร เป็นจำนวนมาก [6]

จากการวิจัยและทดสอบตามกรอบการศึกษาทั้งหมด ได้ใช้มหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐแห่งหนึ่ง เป็นกรณีศึกษา กรอบงานวิจัยที่เสนอสามารถประยุกต์ใช้กับองค์กรอื่น ๆ ที่มีแผนจะนำเอาระบบ EDMS มาใช้สนับสนุนการบริหารงานเอกสารในอนาคตได้อีกด้วย

2) วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

1. เพื่อระบุปัจจัยอุปสรรค และแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในองค์กร
2. เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ โดยประยุกต์วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ โดยใช้มหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐแห่งหนึ่ง เป็นกรณีศึกษา

3) ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือที่ใช้

งานวิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ DEMATEL, COV และ TOPSIS มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1) เทคนิค DEMATEL

DEMATEL ถูกพัฒนาขึ้นโดยสถาบัน “Battelle Memorial Institute of Geneva” ภายใต้โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษยศาสตร์และวิทยาศาสตร์ เพื่อใช้สำหรับการแก้ปัญหาการตัดสินใจที่ซับซ้อน โดยมีรากฐานการพัฒนาเชิงคณิตศาสตร์จากทฤษฎีกราฟ (graph theory) และ ทฤษฎีเมทริกซ์ (matrix theory) วิธีนี้สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงสาเหตุและผล (casual relation) ระหว่างตัวแปรที่ศึกษา และสามารถแบ่งกลุ่มของตัวแปรที่ศึกษาเป็น กลุ่มสาเหตุ (casual group) และ กลุ่มผลที่ตามมา (effect group) รวมถึง สามารถหาน้ำหนักอัตวิสัย (subjective weights) ของตัวแปรที่ศึกษา ได้อีกด้วย DEMATEL

เป็นเทคนิคที่ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและทางธุรกิจอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ตัวอย่าง เช่น การวิเคราะห์ปัจจัยอุปสรรคของการพัฒนาโซ่อุปทานที่ยั่งยืน [7], การวิเคราะห์ความเสี่ยงการดำเนินการจัดการสินค้าบรรทุกน้ำมัน [8], ปัจจัยอุปสรรคการดำเนินงานของโซ่อุปทานหมุนเวียนในอุตสาหกรรมอลูมิเนียม [9] เป็นต้น ขั้นตอนการคำนวณของ DEMATEL มีดังต่อไปนี้ [10]

3.1.1) ขั้นตอนที่ 1: คำนวณหาเมทริกซ์เฉลี่ยรวม (Aggregate Matrix)

เก็บรวบรวมข้อมูลความสัมพันธ์เชิงอิทธิพลระหว่างตัวแปรที่ศึกษาจากผู้เชี่ยวชาญ โดยการเปรียบเทียบเป็นคู่ของตัวแปรที่ศึกษา (pairwise comparison) โดยใช้ตารางที่ 1 ในการเก็บข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่าน ซึ่งจะนำมาสร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์เริ่มต้น (initial matrix) ซึ่งกำหนด โดย $Z_k = [z_k^{ij}]_{n \times n}$ ในสมการที่ (1) ต่อจากนั้น เมทริกซ์ความสัมพันธ์เริ่มต้นของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนในขั้นตอนที่ 1 จะถูกนำมาคำนวณหาเมทริกซ์เฉลี่ยรวม (aggregate matrix) ซึ่งกำหนดโดย $x = [x_{ij}]_{n \times n}$ โดยใช้สมการที่ (2)

$$Z_k = \begin{bmatrix} z_k^{11} & \dots & z_k^{1j} & \dots & z_k^{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_k^{i1} & \dots & z_k^{ij} & \dots & z_k^{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_k^{n1} & \dots & z_k^{nj} & \dots & z_k^{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดย z_k^{ij} แสดงถึง ระดับความมื่ออิทธิพลของปัจจัยในแถวที่ i ต่อ ปัจจัยในสดมภ์ที่ j ที่ประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ k โดย i และ j คือจำนวนตัวแปรที่ศึกษา ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$) และ k คือผู้เชี่ยวชาญคนที่ k^{th} ($k = 1, 2, \dots, l$) และ l คือจำนวนผู้เชี่ยวชาญ

$$X = \frac{\sum_{k=1}^l Z_k}{l} \quad (2)$$

โดย x_{ij} คือค่าเฉลี่ยของสมาชิกที่อยู่แถวที่ i สดมภ์ที่ j และ l คือจำนวนผู้เชี่ยวชาญ

ตารางที่ 1 : ระดับอิทธิพลระหว่างตัวแปร

ระดับอิทธิพล	คำย่อภาษาอังกฤษ	คะแนน
ไม่มีอิทธิพล	NI	1
มีอิทธิพลต่ำมาก	VLI	2
มีอิทธิพลต่ำ	LI	3
มีอิทธิพลสูง	HI	4
มีอิทธิพลสูงมาก	VHI	5

3.1.2) ขั้นตอนที่ 2: สร้างนอร์มอลไลซ์เมทริกซ์ (Construct Normalized Matrix)

จากเมทริกซ์เฉลี่ยรวม (aggregate matrix) ในขั้นตอนที่ 1 จะถูกนอร์มอลไลซ์ เพื่อจะทำให้ตัวแปรที่ศึกษาทั้งหมดไม่มีหน่วย (dimensionless) โดยใช้สมการ (3)-(4) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือนอร์มอลไลซ์เมทริกซ์ (normalized matrix) ซึ่งกำหนด โดย $D = [d_{ij}]_{n \times n}$

$$D = S * X \quad (3)$$

$$S = \min \left[\frac{1}{\max_i \sum_{j=1}^n x_{ij}}, \frac{1}{\max_j \sum_{i=1}^n x_{ij}} \right] \quad (4)$$

โดย $\max_i \sum_{j=1}^n x_{ij}$ คือ ค่าที่สูงที่สุดของผลรวมของสมาชิกในแถวที่ i และ $\max_j \sum_{i=1}^n x_{ij}$ คือค่าที่สูงที่สุดของผลรวมของสมาชิกในสตมภ์ที่ j ของเมทริกซ์เฉลี่ยรวม X และ S คือค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $\max_i \sum_{j=1}^n x_{ij}$ และ $\max_j \sum_{i=1}^n x_{ij}$

3.1.3) ขั้นตอนที่ 3: สร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (Total Relation Matrix)

จากนอร์มอลไลซ์เมทริกซ์ (normalized matrix) ในขั้นตอนที่ 2 นำมาสร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (total relation matrix) ซึ่งกำหนดโดย $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ โดยใช้สมการที่ (5)-(7)

$$T = \lim_{\phi \rightarrow \infty} (D + D^2 + \dots + D^\phi) \quad (5)$$

$$T = D(I - D)^{-1} \quad (6)$$

$$I_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (7)$$

โดยที่ D คือนอร์มอลไลซ์เมทริกซ์ และ I คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) ซึ่งมีมิติ $n \times n$ (จำนวนแถวเท่ากับจำนวนสตมภ์) และ สมาชิกทุกตัวบนเส้นทแยงมุมมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนสมาชิกที่เหลือมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนค่า $(I - D)^{-1}$ คือ อินเวอร์สเมทริกซ์ของ $I - D$ และ $\lim_{\phi \rightarrow \infty} (D + D^2 + \dots + D^\phi)$ คือ ค่าคู่เข้าหากัน (convergence) ของผลรวมยกกำลังของเมทริกซ์ D

3.1.4) ขั้นตอนที่ 4: คำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัย (Subjective Weight)

จากเมทริกซ์ความสัมพันธ์รวมในขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่าผลรวมของทุกสมาชิกในแถวแถว (r_i) และผลรวมของทุกสมาชิกในแนวสตมภ์ (c_j) ของเมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (T) โดยใช้สมการที่ (8) และสมการที่ (9) ตามลำดับ จากนั้นคำนวณค่าน้ำหนักอ้อมวิสัย (w_j^s) โดยใช้สมการที่ (10)-(11)

$$r_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, \text{ โดย } \begin{pmatrix} r_{i1} \\ r_{i2} \\ \vdots \\ r_{in} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$c_j = \sum_{i=1}^n t_{ij}, \text{ โดย } (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}) \quad (9)$$

โดย r_i คือ ผลรวมของทุกเซลล์ในแนวแถว และ c_j คือ ผลรวมของทุกเซลล์ในแนวสตมภ์ ของเมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (T)

$$\theta_j^s = [(r_i + c_j)^2 + (r_i - c_j)^2]^{1/2} \quad (10)$$

โดย θ_j^s คือ น้ำหนักอ้อมวิสัยขั้นต้นของตัวแปร j ก่อนการนอร์มอลไลซ์

$$w_j^s = \theta_j^s / \sum_{j=1}^n \theta_j^s \quad (11)$$

3.2) เทคนิค COV

เทคนิค COV เป็นเครื่องมือทางสถิติหนึ่งที่ใช้วัดค่าการกระจายของข้อมูล โดยในศาสตร์ของการตัดสินใจหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision-Making: MCDM) นำมาประยุกต์ใช้ในการหาน้ำหนักอ้อมวิสัย (Objective weights) ของเกณฑ์หรือตัวแปรที่ศึกษา โดยงานวิจัยพบว่า การกระจายของข้อมูลมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับน้ำหนักความสำคัญของตัวแปร ซึ่งข้อมูลที่มีการกระจายตัวน้อยจะมีน้ำหนักต่อการตัดสินใจต่ำ [11] ดังนั้น COV สามารถนำมาใช้คำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัยของเกณฑ์หรือตัวแปรที่ศึกษา ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ COV ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและทางธุรกิจอุตสาหกรรม ได้แก่ การเลือกเทคโนโลยีการจัดการขยะพลาสติกที่ยั่งยืน [12] ขั้นตอนการคำนวณของ COV มีดังต่อไปนี้ [11]

3.2.1) ขั้นตอนที่ 1: ผนวกข้อมูลการประเมิน

โดยใช้ตารางที่ 2 เพื่อสร้างเมทริกซ์การประเมิน โดยเมทริกซ์ประกอบด้วยทางเลือกจำนวน m ทางเลือก ที่อยู่ในเซตจำกัด $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ ที่อยู่ในแนวแถวของเมทริกซ์ ($i = 1, 2, \dots, m$) และ เกณฑ์การประเมินอยู่ในเซตจำกัด $C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ที่อยู่ในแนวสตมภ์ของเมทริกซ์ ($j = 1, 2, \dots, n$) ซึ่งกำหนดโดย $X^k = [x_{ij}]_{m \times n}$ โดยใช้สมการที่ (12) และนำมาผนวกชุดข้อมูลการประมวลของผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด ด้วยสมการที่ (13)

$$X^k = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

โดยที่ X^k คือ เมทริกซ์การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ k^{th} ($k = 1, 2, \dots, l$) และ x_{ij} คือคะแนนการประเมินของ ทางเลือกที่ i โดยใช้เกณฑ์การประเมินที่ j

$$\bar{X} = \frac{\sum_{k=1}^l X}{l} \quad (13)$$

โดยที่ $\bar{X}$ คือค่าเฉลี่ยของผนวกรวมชุดข้อมูลการประเมินของทุกผู้เชี่ยวชาญ

ตารางที่ 2 : คะแนนประเมินทางเลือก

ระดับการประเมินแนวทางชนะ อุปสรรค	คำย่อ ภาษาอังกฤษ	คะแนน
น้อยมาก	VL	1
น้อย	L	2
ค่อนข้างน้อย	ML	3
ปานกลาง	M	4
ค่อนข้างมาก	MH	5
มาก	H	6
มากที่สุด	VH	7

3.2.2) ขั้นตอนที่ 2: คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

จากเมทริกซ์การประเมินในขั้นตอนที่ 1 นำมาคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของเกณฑ์การประเมินแต่ละเกณฑ์ โดยใช้สมการที่ (13)

$$SD_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \mu_j)^2}{(m-1)}} \quad (13)$$

โดยที่ SD_j คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกณฑ์การประเมินที่ j และ μ_j คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของของเกณฑ์การประเมินที่ j และ x_{ij} คือคะแนนการประเมินของทางเลือกที่ i ที่ประเมินด้วยเกณฑ์ j ($i = 1, 2, \dots, m$ และ $j = 1, 2, \dots, n$)

3.2.3) ขั้นตอนที่ 3: คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation: COV_j)

นำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกณฑ์การประเมิน ในขั้นตอนที่ 2 มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation: COV_j) โดยใช้สมการที่ (14)

$$COV_j = \frac{SD_j}{\mu_j} \quad (14)$$

โดย COV_j แสดงถึงระดับการกระจายของข้อมูลของเกณฑ์การประเมินที่ j

3.2.4) ขั้นตอนที่ 4: คำนวณน้ำหนักภววิสัยของเกณฑ์การประเมิน

นำค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation: COV_j) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 มาคำนวณน้ำหนักภววิสัย (objective weight) ของเกณฑ์การประเมิน โดยใช้สมการที่ (15)

$$w_j^o = \frac{COV_j}{\sum_{j=1}^n COV_j} \quad (15)$$

w_j^o คือ น้ำหนักภววิสัยของเกณฑ์ประเมิน j ซึ่งจะเห็นว่าเกณฑ์ใดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันสูง (มีการกระจายข้อมูลมาก) จะมีน้ำหนักความสำคัญภววิสัยที่สูง

3.3) การคำนวณน้ำหนักประสม (Combination Weight)

ค่าน้ำหนักอภววิสัย (w_j^s) ที่ได้จากกระบวนการ DEMATEL และน้ำหนักภววิสัย (w_j^o) ที่ได้จากกระบวนการ COV นำมาคำนวณน้ำหนักประสม (combination weight) ของแต่ละเกณฑ์ประเมิน โดยใช้สมการที่ (16)-(17)

$$\omega_j = \alpha * w_j^s + \beta * w_j^o \quad (16)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (17)$$

โดยที่ ω_j คือ น้ำหนักประสมของเกณฑ์การประเมินที่ j และ α และ β คือสัมประสิทธิ์น้ำหนักความเชื่อมั่นที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนักระหว่าง น้ำหนักอภววิสัย และภววิสัย

3.4) เทคนิค TOPSIS

TOPSIS เป็นเทคนิคจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกพัฒนาขึ้น [13] โดยแนวคิดหลักของเทคนิคนี้ จะมีการกำหนดเป้าหมายในอุดมคติไว้ (ideal point methods) และทางเลือกไหนมีระยะทางค่าเข้าใกล้เป้าหมายในอุดมคติมากที่สุด และระยะทางไกลจากจุดอุดมคติเชิงลบมากที่สุด ถือเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด [14] ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ TOPSIS ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและทางเทคโนโลยีดิจิทัล ได้แก่ การเลือกการทดสอบที่มีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ [15], การตัดสินใจการนำการผลิตอัจฉริยะมาใช้ [16] เป็นต้น ขั้นตอนการคำนวณของ TOPSIS มีดังต่อไปนี้ [14]

3.4.1) ขั้นตอนที่ 1: สร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ (Normalized Matrix)

จากเมทริกซ์การประเมิน (ขั้นตอนที่ 1 หัวข้อ 3.2) นำมาสร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ (normalized matrix) กำหนดโดย $X^{nor} = [x_{ij}^{nor}]_{m \times n}$, $i = 1, 2, \dots, m$ และ $j = 1, 2, \dots, n$ เพื่อจะทำ

ให้เกณฑ์การประเมินทั้งหมดไม่มีหน่วย (dimensionless) โดยใช้สมการ (16)

$$X_{ij}^{nor} = [\max(x_j) - x_{ij}] / [\max(x_j) - \min(x_j)] \quad (16)$$

โดย $\max(x_j)$ คือ ค่าสูงสุดของเกณฑ์การประเมิน j และ $\min(x_j)$ คือ ค่าต่ำสุดของเกณฑ์การประเมิน j และ x_{ij} ค่าคะแนนของทางเลือก i ที่ประเมินโดยเกณฑ์ j

3.4.2) ขั้นตอนที่ 2: สร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ถ่วงน้ำหนัก (Weighted Normalized Matrix)

จากเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ ในขั้นตอนที่ 1 นำน้ำหนักเกณฑ์มาถ่วงน้ำหนัก เพื่อสร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ถ่วงน้ำหนัก กำหนดโดย $V = [v_{ij}]_{m \times n}$, $i = 1, 2, \dots, m$ และ $j = 1, 2, \dots, n$ โดยใช้สมการที่ (17)

$$V = X^{nor} \times \omega_j \quad (17)$$

โดย X^{nor} คือ เมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ และ ω_j คือ น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน j

3.4.3) ขั้นตอนที่ 3: การกำหนดเป้าหมายในอุดมคติ (Ideal Point Methods)

จากเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ถ่วงน้ำหนัก ในขั้นตอนที่ 2 สามารถกำหนด เป้าหมายในอุดมคติทางบวก (Positive ideal solution: A^+) และทางลบ (Negative ideal solution: A^-) ได้ตามสมการที่ (18) และ สมการที่ (19) ตามลำดับ

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+), \text{ โดยที่ } v_j^+ = \max_i(v_{ij}) \quad (18)$$

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-), \text{ โดยที่ } v_j^- = \min_i(v_{ij}) \quad (19)$$

v_j^+ คือค่าสูงสุดของสมาชิกในแถว i ที่ถูกประเมินโดยเกณฑ์ i และ v_j^- คือค่าต่ำสุดของสมาชิกในแถว i ที่ถูกประเมินโดยเกณฑ์ i

3.4.4) ขั้นตอนที่ 4: คำนวณระยะทางทางเลือกกับเป้าหมายในอุดมคติ

คำนวณหาระยะทางระหว่างทางเลือกกับเป้าหมายในอุดมคติเชิงบวก (A^+) และระยะทางระหว่างทางเลือกกับเป้าหมายในอุดมคติเชิงลบ (A^-) โดยใช้ สมการที่ (20) และสมการที่ (21) ตามลำดับ

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

โดย S_i^+ คือ ระยะทางระหว่างทางเลือก i กับ เป้าหมายในอุดมคติเชิงบวก และ S_i^- คือ ระยะทางระหว่างทางเลือก i กับ เป้าหมายในอุดมคติเชิงลบ

3.4.5) ขั้นตอนที่ 5: คำนวณหาสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์

คำนวณหาสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ของแต่ละทางเลือก โดยใช้สมการที่ (22)

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (22)$$

โดย C_i คือสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ของทางเลือกที่ i

3.4.6) ขั้นตอนที่ 6: จัดลำดับความสำคัญ

ลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก พิจารณาโดยใช้ ค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ (C_i) ถ้าค่า C_i สูงแสดงว่า ทางเลือกนั้นสำคัญมาก แต่ถ้าค่า C_i ต่ำแสดงว่า ทางเลือกนั้นสำคัญน้อย

4) กระบวนการวิจัย

กระบวนการวิจัย แบ่งออกเป็น 8 ระยะการดำเนินงาน (phases) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Phase I: ระบุปัจจัยอุปสรรคและแนวทาง โดยงานวิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปสรรค และ แนวทางการเอาชนะอุปสรรค การนำระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในองค์กร ทั้งจากวารสารในและต่างประเทศ

Phase II: นำผลการทบทวนวรรณกรรมที่ได้จาก Phase I มาพัฒนาแบบสอบถามเพื่อนำไปเก็บข้อมูลจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ (panel of experts) ของกรณีศึกษามหาวิทยาลัย โดยแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 เพื่อหาน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยอุปสรรค และ ชุดที่ 2 เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรค

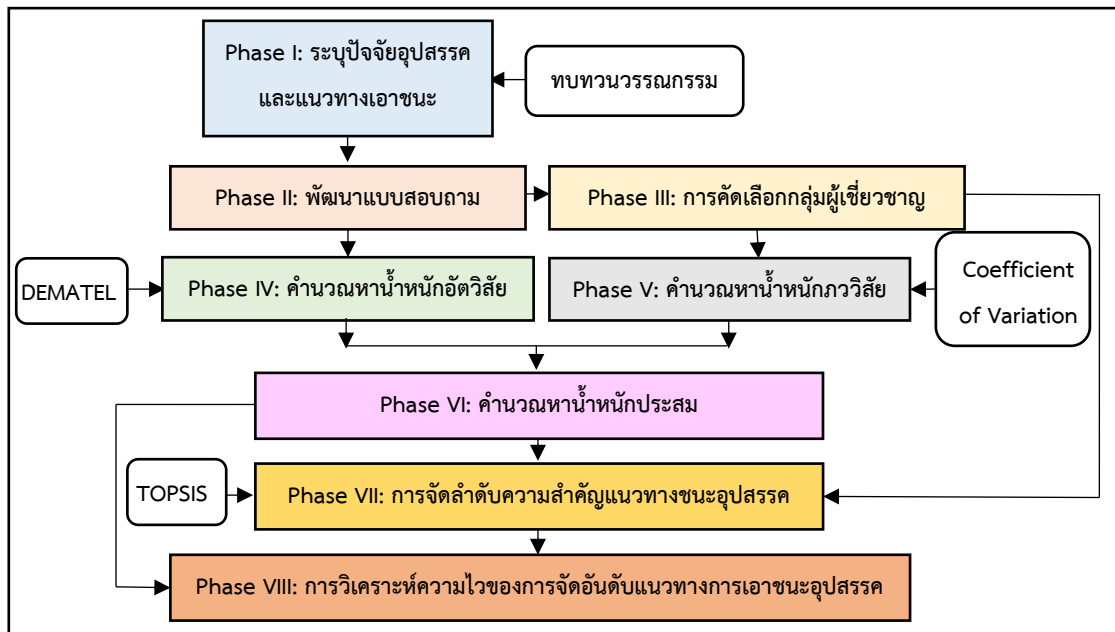
Phase III: คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้และประสบการณ์ด้านระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ อย่างน้อย 5 ปี จากมหาวิทยาลัย กรณีศึกษา โดยผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดเคยผ่านการทำงาน “โครงการพัฒนาระบบการจัดการเอกสารอิเล็กทรอนิกส์” และ เป็นผู้ตอบแบบสอบถามในงานวิจัยนี้

Phase IV: คำนวณหาน้ำหนักอัตถิวิสัย โดยนำแบบสอบถามแบบสอบถามชุดที่ 1 ที่เก็บข้อมูลจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญใน Phase III มาประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิควิธี DEMATEL

Phase V: คำนวณหาน้ำหนักภววิสัย โดยนำแบบสอบถามในส่วนที่ 2 ที่เก็บข้อมูลจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญใน Phase III มาประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิควิธี COV

Phase VI: คำนวณหาน้ำหนักประสม โดยใช้ผลการคำนวณหาน้ำหนักอัตถิวิสัย (Phase IV) และน้ำหนักภววิสัย (Phase V)

Phase VII: การจัดลำดับความสำคัญแนวทางชนะอุปสรรค โดยนำแบบสอบถามในชุดที่ 2 มาประมวลผลข้อมูลด้วยวิธี TOPSIS



รูปที่ 1 : กระบวนการวิจัย

Phase VIII: การวิเคราะห์ความไวของการจัดอันดับแนวทางการเอาชนะอุปสรรค เพื่อทดสอบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักประสมในช่วงต่าง ๆ จะทำให้อันดับแนวทางการเอาชนะอุปสรรคเปลี่ยนไปหรือไม่อย่างไร

5) ผลงานวิจัย

ผลงานวิจัยแสดงตามระยะการดำเนินงาน 8 Phases โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

5.1) Phase I: การระบุปัจจัยอุปสรรคและแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการพัฒนาระบบ EDMS

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ เพื่อรวบรวมปัจจัยอุปสรรค (barriers) และแนวทางการเอาชนะอุปสรรค (solutions) ของการพัฒนาระบบ EDMS ซึ่งสามารถระบุปัจจัยอุปสรรคที่สำคัญ จำนวน 12 ปัจจัย และแนวทางการเอาชนะอุปสรรค จำนวน 10 แนวทาง ดังแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 : ปัจจัยอุปสรรคของการพัฒนาระบบ EDMS

รหัสปัจจัย (Code)	ปัจจัยอุปสรรค (Barriers)	อ้างอิง (Reference)
B1	กระบวนการทำงานระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ ปัจจุบันมีการทำงานแยกส่วน ขาดการบูรณาการ	[17], [18]
B2	บุคลากรขาดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์	[17], [19]
B3	ขาดมาตรฐานกระบวนการระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การทำงานของหน่วยงานต่างๆ ไม่เป็นไปในทางเดียวกัน	[2], [19]
B4	การต่อต้านของพนักงานในการเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ใหม่	[17], [20]
B5	ขาดนโยบายการขับเคลื่อนจากระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ ทีมผู้บริหารองค์กรที่ชัดเจน และอย่างต่อเนื่อง	[2], [3]
B6	ขาดความสามารถในการบริหารโครงการพัฒนาระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ใหม่	[21]
B7	ขาดวัฒนธรรมองค์กรด้านดิจิทัล	[2], [19], [20]
B8	ขาดการความร่วมมือระหว่างหน่วยงานข้ามสายงาน	[19], [22]
B9	ขาดการมีส่วนร่วมของพนักงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในการพัฒนาระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ใหม่	[2], [17]
B10	ขาดความมุ่งมั่นจากผู้บริหารที่เกี่ยวข้องในการขับเคลื่อนโครงการ	[19], [22]
B11	ขาดการจัดสรรทรัพยากรในการขับเคลื่อนโครงการที่เพียงพอและเหมาะสม	[3], [18], [22]
B12	ขาดโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบเทคโนโลยีที่สนับสนุน	[2], [18]

ตารางที่ 4 : แนวทางการเอาชนะอุปสรรค

รหัสปัจจัย (Code)	แนวทางชนะอุปสรรค (Overcomes)	อ้างอิง (Reference)
S1	การสร้างช่องทางการสื่อสารเพื่อให้เกิดวิสัยทัศน์ร่วมกันในการเปลี่ยนผ่านไปสู่การพัฒนาระบบงานใหม่	[23], [24]
S2	จัดโปรแกรมการฝึกอบรมพนักงานทุกคนและทุกระดับที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนาระบบงานใหม่	[23], [24]
S3	จัดทำเป้าหมายระยะสั้น กลาง และยาว พร้อมทั้งกำหนดทรัพยากรที่จำเป็นและจัดสรรตามลำดับความสำคัญ	[3], [24]
S4	ส่งเสริมการมีส่วนร่วมและเปิดอภิปรายโดยพนักงานทุกคน และทุกระดับที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนาระบบงานใหม่	[25]
S5	ส่งเสริมวัฒนธรรมในการยอมรับนวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ ๆ	[25], [26]
S6	การจัดตั้งโครงสร้างองค์กรแบบเมทริกซ์ในการบริหารโครงการการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนาระบบงานใหม่	[25], [26]
S7	การสรรหาผู้จัดการโครงการที่มีประสบการณ์และหัวหน้าทีมโครงการมืออาชีพ	[3], [24]
S8	การจัดเตรียมแผนการบริหารความขัดแย้งการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนาระบบงานใหม่	[21], [23], [25]
S9	การจัดเตรียมแผนการบริหารความเสี่ยงการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนาระบบงานใหม่	[25], [27]
S10	การให้พนักงานที่เกี่ยวข้องมีส่วนร่วมในการพัฒนาระบบงานใหม่	[22], [24]

5.2) Phase II: การพัฒนาแบบสอบถาม (Questionnaire Development)

นำปัจจัยอุปสรรคและแนวทางการแก้ไข ที่ได้จาก Phase I มาพัฒนาแบบสอบถาม แล้วส่งให้ผู้เชี่ยวชาญด้าน EDMS ของมหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐแห่งหนึ่ง เป็นกรณีศึกษา จำนวน 3 คน เพื่อทวนสอบความถูกต้อง ก่อนส่งแบบสอบถามเพื่อเก็บข้อมูล ผู้วิจัยได้ส่งแบบสอบถามที่พัฒนาขึ้น เพื่อขออนุมัติจริยธรรมการวิจัยในคนจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคนชุดกลางของมหาวิทยาลัยมหิดล (MU Central-IRB) นอกจากนั้นแบบสอบถามยังระบุเป็นลายลักษณ์อักษรว่าข้อมูลส่วนบุคคลและคำตอบทั้งหมด

ของผู้ตอบจะถูกเก็บเป็นความลับและใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการเท่านั้น รวมถึงข้อมูลจะสรุปและรายงานโดยรวม ซึ่งไม่สามารถสอบกลับไปยังผู้ตอบแบบสอบถามได้

5.3) Phase III: การคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญ (Experts) ที่ให้ข้อมูลและตอบแบบสอบถามสำหรับงานวิจัย

การคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญในงานวิจัยนี้พิจารณาจากความรู้ ความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ในการพัฒนาระบบ EDMS ของมหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐแห่งหนึ่ง กรณีศึกษา โดยมีจำนวนผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 7 คน รายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 : รายละเอียดผู้เชี่ยวชาญ

รหัสผู้เชี่ยวชาญ (Code)	ตำแหน่ง (Position)	ประสบการณ์ (ปี)	ความเชี่ยวชาญ
E1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์	6	การบริหารโครงการการพัฒนาระบบ EDMS
E2	หัวหน้างานบริหารเอกสาร (ผู้ชำนาญการ)	28	ผู้ใช้งานระบบ EDMS
E3	นักวิชาการสารสนเทศ (ผู้ชำนาญการ)	21	ผู้ใช้งานระบบ EDMS
E4	เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป (ผู้ชำนาญการ)	27	ผู้ใช้งานระบบ EDMS
E5	นักวิชาการคอมพิวเตอร์	10	ผู้พัฒนาระบบ EDMS
E6	นักวิชาการคอมพิวเตอร์ (ผู้ชำนาญการ)	30	ผู้พัฒนาระบบ EDMS
E7	เจ้าหน้าที่ระบบงานคอมพิวเตอร์	9	ผู้พัฒนาระบบ EDMS

5.4) Phase IV: คำนวณหาน้ำหนักอัตวิสัย (Subjective Weights) ของปัจจัยอุปสรรค

ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 คน ขอให้ตอบแบบสอบถามชุดที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบความมีอิทธิพลระหว่างคู่ปัจจัยอุปสรรค (pairwise comparison) โดยใช้ระดับอิทธิพลระหว่างตัวแปรใน ตารางที่ 1 หัวข้อ 3.1 จากนั้นรวบรวมแบบสอบถามที่ตอบกลับมาทั้งหมด นำมาประมวลผลชุดข้อมูล เพื่อคำนวณหาน้ำหนักอัตวิสัยของปัจจัยอุปสรรคแต่ละปัจจัย (w_j^s) โดยใช้วิธีการ DEMATE ที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1

5.4.1) ขั้นตอนที่ 1: คำนวณหาเมทริกซ์เฉลี่ยรวม (Aggregate Matrix) ข้อมูลการเปรียบเทียบความมีอิทธิพลระหว่างคู่ปัจจัยอุปสรรคนำมาประมวลผลโดยใช้สมการที่ (1) และสมการที่ (2)

และนำมาคำนวณหาเมทริกซ์เฉลี่ยรวม (aggregate matrix) ดังแสดงในตารางที่ 6

5.4.2) ขั้นตอนที่ 2: สร้างนอร์มอลไลซ์เมทริกซ์ (Construct Normalized Matrix) ของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอุปสรรค นอร์มอลไลซ์เมทริกซ์ (construct normalized matrix) ของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอุปสรรค สามารถสร้างได้โดยใช้สมการที่ (3)-(4) ดังแสดงผลในตารางที่ 7

5.4.3) ขั้นตอนที่ 3: สร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (Total Relation Matrix) เมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (total relation matrix) สามารถสร้างได้โดยใช้สมการที่ (5)-(7) ดังแสดงผลในตารางที่ 8

ตารางที่ 6 : เมทริกซ์เฉลี่ยรวม (aggregate matrix)

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
B1	1.00	2.43	3.00	1.86	2.57	2.29	2.00	2.29	1.71	2.57	2.57	2.43
B2	3.00	1.00	2.29	3.14	2.57	2.71	2.86	2.29	2.57	2.29	1.29	1.29
B3	3.00	3.29	1.00	1.86	2.57	2.71	2.43	2.29	2.86	1.71	2.14	2.57
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
B10	2.43	2.29	2.57	2.14	3.86	3.00	2.71	2.14	2.29	0.86	3.00	3.14
B11	2.00	1.86	2.14	1.71	2.14	2.43	2.00	1.57	1.86	2.29	1.00	3.57
B12	1.71	1.71	2.43	1.71	2.43	2.57	2.14	1.86	2.14	2.29	3.14	1.00

ตารางที่ 7 : นอร์มอลไลซ์เมทริกซ์

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
B1	0.03	0.07	0.08	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07
B2	0.08	0.03	0.06	0.09	0.07	0.07	0.08	0.06	0.07	0.06	0.04	0.04
B3	0.08	0.09	0.03	0.05	0.07	0.07	0.07	0.06	0.08	0.05	0.06	0.07
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
B10	0.07	0.06	0.07	0.06	0.11	0.08	0.07	0.06	0.06	0.02	0.08	0.09
B11	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	0.06	0.04	0.05	0.06	0.03	0.10
B12	0.05	0.05	0.07	0.05	0.07	0.07	0.06	0.05	0.06	0.06	0.09	0.03

ตารางที่ 8 : เมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (total relation matrix)

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
B1	0.27	0.30	0.33	0.27	0.32	0.32	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.31
B2	0.33	0.27	0.32	0.31	0.33	0.34	0.32	0.30	0.32	0.30	0.27	0.28
B3	0.34	0.34	0.30	0.28	0.33	0.34	0.31	0.30	0.33	0.29	0.30	0.32
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
B10	0.35	0.33	0.36	0.31	0.39	0.37	0.34	0.32	0.33	0.28	0.35	0.36
B11	0.28	0.27	0.29	0.25	0.29	0.30	0.27	0.25	0.27	0.27	0.24	0.31
B12	0.28	0.27	0.30	0.25	0.30	0.31	0.28	0.26	0.28	0.28	0.30	0.25

5.4.4) ขั้นตอนที่ 4: คำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัย (Subjective Weight) โดยคำนวณผลรวมของทุกสมาชิกในแนวแถว (r_i) และผลรวมของทุกสมาชิกในแนวสดมภ์ (c_j) ของเมทริกซ์ความสัมพันธ์รวม (T) โดยใช้สมการที่ (8) และสมการที่ (9) ต่อจากนั้น คำนวณน้ำหนักอ้อมวิสัยของแต่ละปัจจัยอุปสรรค (Subjective weight: w_j^s) โดยใช้สมการที่ (10)-(11) ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 9

5.5) Phase V: คำนวณน้ำหนักภววิสัย (Objective Weights) ของปัจจัยอุปสรรค

ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 คน ตอบแบบสอบถามชุดที่ 2 เพื่อประเมินแนวทางการชนะอุปสรรค (overcoming barriers) ในตารางที่ 4 ตามแต่ละเกณฑ์ปัจจัยอุปสรรค โดยใช้ตารางคะแนนประเมินแนวทางชนะอุปสรรค ในตารางที่ 2 (ในหัวข้อ 3.2) นำมาประมวลผลชุดข้อมูลเพื่อคำนวณน้ำหนักภววิสัย ของปัจจัยอุปสรรคแต่ละปัจจัย (w_j^o) โดยใช้วิธีการสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation: COV_j) ดังมีขั้นตอนต่อไปนี้ [28]

5.5.1) ขั้นตอนที่ 1: ผนวกรวมชุดข้อมูลการประเมินแนวทางชนะอุปสรรค ผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านประเมินแนวทางการชนะอุปสรรค โดยใช้ตารางที่ 2 หลังจากนั้น ข้อมูลของผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 7 ชุดที่ได้จากแบบสอบถามทั้งหมด นำมาผนวกรวมให้เป็น 1 ชุดข้อมูล โดยใช้สมการที่ (12)-(13) และผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 10

5.5.2) ขั้นตอนที่ 2: คำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของปัจจัยอุปสรรค จากข้อมูลในตารางที่ 10 นำมาคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD_j) ของแต่ละปัจจัยอุปสรรค โดยใช้สมการที่ (13) และ แสดงผลตามตารางที่ 11

5.5.3) ขั้นตอนที่ 3: คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation: COV_j) ของปัจจัยอุปสรรค คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COV_j) ของปัจจัยอุปสรรค โดยใช้สมการที่ (14) และผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 9 : แสดงค่าน้ำหนักอ้อมวิสัยของแต่ละปัจจัยอุปสรรค (Subjective weight: w_j^s)

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
r_i	3.58	3.69	3.79	4.03	4.79	3.88	3.98	4.13	3.60	4.08	3.28	3.37
c_j	3.98	3.84	4.10	3.54	4.05	4.11	3.75	3.68	3.87	3.68	3.75	3.86
$r_i + c_j$	7.56	7.53	7.89	7.58	8.85	8.00	7.72	7.80	7.47	7.75	7.04	7.23
$r_i - c_j$	-0.39	-0.15	-0.31	0.49	0.74	-0.23	0.23	0.45	-0.26	0.40	-0.47	-0.49
σ_j^s	7.32	7.28	7.64	7.34	8.59	7.74	7.47	7.56	7.23	7.54	6.81	7.00
w_j^s	0.082	0.081	0.085	0.082	0.096	0.086	0.083	0.084	0.081	0.084	0.076	0.078

ตารางที่ 10 : แสดงการผนวกรวมชุดข้อมูลการประเมินแนวทางชนะอุปสรรค

แนวทางชนะอุปสรรค (Overcomes)	ปัจจัยอุปสรรค (Barriers)											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
S1	5.00	4.14	4.86	4.71	4.29	3.43	4.57	5.00	5.29	4.71	4.43	4.86
S2	5.00	5.43	4.71	5.71	3.29	4.00	5.14	4.71	4.57	3.57	3.29	3.43
S3	4.43	5.00	5.29	4.86	5.29	4.86	4.71	5.14	4.57	4.57	5.86	5.14
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
S8	4.43	4.57	4.57	5.71	4.57	4.86	4.43	5.29	5.14	4.86	4.43	4.57
S9	4.00	4.00	4.86	4.57	4.57	4.71	4.29	4.86	5.14	4.71	4.43	5.14
S10	6.14	5.00	5.86	5.86	4.14	4.14	5.43	5.43	5.86	4.71	4.71	4.43

ตารางที่ 11 : น้ำหนักภววิสัยของปัจจัยอุปสรรค

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
SD_j	0.63	0.66	0.48	0.53	0.59	0.68	0.51	0.29	0.54	0.48	0.72	0.64
μ_j	4.79	4.87	5.14	5.33	4.26	4.49	4.70	5.14	5.20	4.43	4.56	4.53
COV_j	0.13	0.14	0.09	0.10	0.14	0.15	0.11	0.06	0.10	0.11	0.16	0.14
w_j^o	0.093	0.095	0.065	0.069	0.097	0.106	0.077	0.039	0.072	0.076	0.111	0.100

5.5.4) ขั้นตอนที่ 4: คำนวณน้ำหนักภววิสัยของปัจจัยอุปสรรค จากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COV_j) นำมาคำนวณน้ำหนักภววิสัยของปัจจัยอุปสรรค (w_j^o) โดยใช้ สมการที่ (15) และผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 11

5.6) Phase VI: คำนวณน้ำหนักประสม (Combine Weights) ของปัจจัยอุปสรรค

จากค่าน้ำหนักอภวิสัย (w_j^s) และน้ำหนักภววิสัย (w_j^o) นำมาคำนวณค่าน้ำหนักประสม ของปัจจัยอุปสรรค โดยใช้ สมการที่ (16)-(17) โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ $\alpha = 0.5$ และ $\beta = 0.5$ โดยผลการคำนวณน้ำหนักประสม (ω_j) ของปัจจัยอุปสรรค แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 12

จากตารางที่ 12 พบว่าสามารถจัดอันดับความสำคัญของปัจจัยอุปสรรคตามน้ำหนักความสำคัญประสม ได้ดังนี้ $B5=B6>B11>B12>B2>B1>B7=B10>B4=B9>B3>B8$

5.7) Phase VII: การจัดลำดับความสำคัญแนวทางชนะอุปสรรค

สำหรับการจัดลำดับความสำคัญแนวทางชนะอุปสรรค ($S1, S2, \dots, S10$) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์วิธีการ TOPSIS ที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.4 ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [28]

5.7.1) ขั้นตอนที่ 1: สร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ (Normalized Matrix) จากผลรวมชุดข้อมูลการประเมินแนวทางชนะอุปสรรค ที่แสดงในตารางที่ 10 นำมาสร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ โดยใช้ สมการที่ (16) และผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 12 : แสดงน้ำหนักประสมของปัจจัยอุปสรรค

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
w_j^s	0.082	0.081	0.085	0.082	0.096	0.086	0.083	0.084	0.081	0.084	0.076	0.078
w_j^o	0.093	0.095	0.065	0.069	0.097	0.106	0.077	0.039	0.072	0.076	0.111	0.100
ω_j	0.087	0.088	0.075	0.076	0.096	0.096	0.080	0.062	0.076	0.080	0.094	0.089
อันดับ	5	4	8	7	1	1	6	9	7	6	2	3

ตารางที่ 13 : แสดงเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ (normalized matrix)

แนวทางชนะอุปสรรค (Overcomes)	ปัจจัยอุปสรรค (Barriers)											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
S1	0.53	0.94	0.80	0.91	0.50	1.00	0.70	0.67	0.58	0.11	0.56	0.17
S2	0.53	0.38	0.90	0.27	1.00	0.76	0.30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
S3	0.80	0.56	0.50	0.82	0.00	0.41	0.60	0.50	1.00	0.22	0.00	0.00
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
S8	0.80	0.75	1.00	0.27	0.36	0.41	0.80	0.33	0.67	0.00	0.56	0.33
S9	1.00	1.00	0.80	1.00	0.36	0.47	0.90	0.83	0.67	0.11	0.56	0.00
S10	0.00	0.56	0.10	0.18	0.57	0.71	0.10	0.17	0.25	0.11	0.44	0.42

ตารางที่ 14 : แสดงค่าเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ถ่วงน้ำหนัก

แนวทางชนะ อุปสรรค (Overcomes)	ปัจจัยอุปสรรค (Barriers)											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
S1	0.05	0.08	0.06	0.07	0.05	0.10	0.06	0.04	0.04	0.01	0.05	0.01
S2	0.05	0.03	0.07	0.02	0.10	0.07	0.02	0.06	0.08	0.08	0.09	0.09
S3	0.07	0.05	0.04	0.06	0.00	0.04	0.05	0.03	0.08	0.02	0.00	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
S8	0.07	0.07	0.08	0.02	0.03	0.04	0.06	0.02	0.05	0.00	0.05	0.03
S9	0.09	0.09	0.06	0.08	0.03	0.05	0.07	0.05	0.05	0.01	0.05	0.00
S10	0.00	0.05	0.01	0.01	0.06	0.07	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04

5.7.2) ขั้นตอนที่ 2: สร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ถ่วงน้ำหนัก (Weighted Normalized Matrix) จากนอร์มอลไลซ์เมทริกซ์ในตารางที่ 13 นำน้ำหนักประสม (ω_j) ที่ได้จากตารางที่ 12 ของแต่ละปัจจัยอุปสรรคมาถ่วงน้ำหนักเพื่อสร้างเมทริกซ์นอร์มอลไลซ์ถ่วงน้ำหนัก โดยใช้สมการที่ (17) ซึ่งผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 14

5.7.3) ขั้นตอนที่ 3: กำหนดแนวทางชนะอุปสรรคในอุดมคติ (Ideal Solutions) จากตารางที่ 14 สามารถกำหนดแนวทางชนะอุปสรรคในอุดมคติทางบวก (positive ideal solution: A^+) และทางลบ (negative ideal solution: A^-) ได้ตามสมการที่ (18) และ สมการที่ (19) ตามลำดับ ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 15

5.7.4) ขั้นตอนที่ 4: คำนวณระยะทางระหว่างแนวทางชนะอุปสรรคกับแนวทางแก้ไขในอุดมคติ การหาระยะทางระหว่างแนวทางชนะอุปสรรคกับแนวทางแก้ไขในอุดมคติเชิงบวก และแนวทางแก้ไขในอุดมคติเชิงลบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (20) และสมการที่ (21) ตามลำดับ ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 16-17

5.7.5) ขั้นตอนที่ 5: คำนวณสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ของแต่ละแนวทางเอาชนะอุปสรรค สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (22) และผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 18 โดยพบว่าสามารถจัดอันดับแนวทางการชนะอุปสรรค ได้ดังนี้ $S2 > S6 > S1 > S9 > S8 > S4 > S5 > S7 > S3 > S10$

ตารางที่ 15 : แนวทางชนะอุปสรรคในอุดมคติทางบวกและทางลบ

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
A^+	0.087	0.088	0.075	0.076	0.096	0.096	0.080	0.062	0.076	0.080	0.094	0.089
A^-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 16 : ระยะทางระหว่างแนวทางชนะอุปสรรคกับแนวทางแก้ไขในอุดมคติเชิงบวก

แนวทางชนะ อุปสรรค (Overcomes)	ปัจจัยอุปสรรค (Barriers)											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
S1	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.005	0.002	0.005
S2	0.002	0.003	0.000	0.003	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S3	0.000	0.001	0.001	0.000	0.009	0.003	0.001	0.001	0.000	0.004	0.009	0.008
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
S8	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.003	0.000	0.002	0.001	0.006	0.002	0.004
S9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.000	0.000	0.001	0.005	0.002	0.008
S10	0.008	0.001	0.005	0.004	0.002	0.001	0.005	0.003	0.003	0.005	0.003	0.003

ตารางที่ 17 : ระยะทางระหว่างแนวทางชนะอุปสรรคกับแนวทางแก้ไขในอุดมคติเชิงลบ

แนวทางชนะ อุปสรรค (Overcomes)	ปัจจัยอุปสรรค (Barriers)											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
S1	0.002	0.007	0.004	0.005	0.002	0.009	0.003	0.002	0.002	0.000	0.003	0.000
S2	0.002	0.001	0.005	0.000	0.009	0.005	0.001	0.004	0.006	0.006	0.009	0.008
S3	0.005	0.002	0.001	0.004	0.000	0.002	0.002	0.001	0.006	0.000	0.000	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
S8	0.005	0.004	0.006	0.000	0.001	0.002	0.004	0.000	0.003	0.000	0.003	0.001
S9	0.008	0.008	0.004	0.006	0.001	0.002	0.005	0.003	0.003	0.000	0.003	0.000
S10	0.000	0.002	0.000	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001

ตารางที่ 18 : สัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์แต่ละแนวทางเอาชนะอุปสรรค

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
S_i^+	0.136	0.107	0.196	0.182	0.169	0.130	0.187	0.159	0.149	0.204
S_i^-	0.197	0.237	0.154	0.183	0.158	0.189	0.165	0.170	0.203	0.119
$S_i^+ + S_i^-$	0.333	0.344	0.350	0.365	0.327	0.320	0.352	0.328	0.352	0.323
C_i	0.591	0.689	0.439	0.501	0.484	0.593	0.470	0.517	0.577	0.368
Rank	3	1	9	6	7	2	8	5	4	10

5.8) Phase VIII: การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของการจัดอันดับแนวทางเอาชนะอุปสรรค

การวิเคราะห์ความไว เป็นการวิเคราะห์ว่าเมื่อน้ำหนักของปัจจัยอุปสรรคเปลี่ยนไป การจัดอันดับของแนวทางเอาชนะอุปสรรคจะเปลี่ยนไปหรือไม่ กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงการจัดอันดับแบบมีนัยสำคัญ แสดงว่าแบบจำลองที่เสนอมีความไวต่อน้ำหนักของปัจจัยอุปสรรค แต่ถ้าการจัดอันดับไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงว่า แบบจำลองที่เสนอมีความน่าเชื่อถือ (reliability) ต่อการนำไปใช้ สำหรับงานวิจัยนี้ จะวิเคราะห์ความไว โดยเปลี่ยนแปลงค่า α และ β ของน้ำหนักประสม (ω_j) ซึ่งสามารถจำลองสถานการณ์ ได้ 9 สถานการณ์ และทำการคำนวณการจัดอันดับของแนวทางเอาชนะอุปสรรคใหม่ด้วยวิธี TOPSIS ใหม่ ซึ่งผลลัพธ์

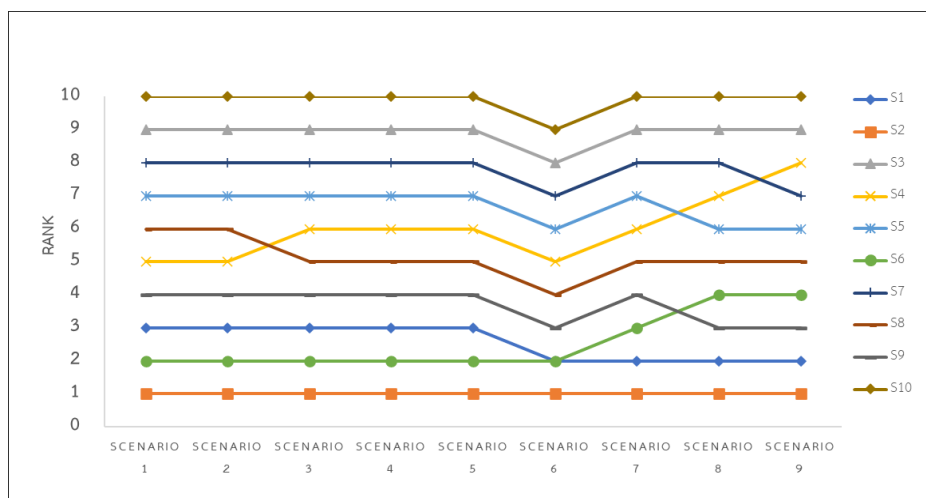
แสดงในตารางที่ 19 และรูปที่ 2 จากผลลัพธ์จะเห็นว่า “จัดโปรแกรมการฝึกอบรมพนักงานทุกคนและทุกระดับที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนากระบวนการใหม่” (S2) ยังมีความสำคัญเป็นอันดับแรก ในส่วนอันดับสองและอันดับสามสลับกันระหว่าง “การสร้างช่องทางการสื่อสารเพื่อให้เกิดวิสัยทัศน์ร่วมกัน ในการเปลี่ยนผ่านไปสู่การพัฒนากระบวนการใหม่” (S1) “การจัดตั้งโครงสร้างองค์กรแบบเมทริกซ์ในการบริหารโครงการการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนากระบวนการใหม่” (S6) และการเปลี่ยนแปลงอันดับของแนวทางเอาชนะอุปสรรคอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นสามารถสรุปว่าโมเดลที่เสนอในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 19 : ผลการวิเคราะห์ความไวของการจัดอันดับแนวทางเอาชนะอุปสรรค

แนวทางชนะ อุปสรรค	สถานการณ์ (Scenarios)																	
	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
	0.1	0.9	0.2	0.8	0.3	0.7	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.7	0.3	0.8	0.2	0.9	0.1
	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank
S1	0.587	3	0.588	3	0.589	3	0.589	3	0.591	3	0.591	2	0.593	2	0.594	2	0.595	2
S2	0.692	1	0.691	1	0.691	1	0.690	1	0.698	1	0.689	1	0.689	1	0.688	1	0.688	1
S3	0.422	9	0.426	9	0.431	9	0.435	9	0.439	9	0.444	8	0.448	9	0.452	9	0.457	9

ตารางที่ 19 : ผลการวิเคราะห์ความไวของการจัดอันดับแนวทางการเอาชนะอุปสรรค (ต่อ)

แนวทาง ชนะ อุปสรรค	สถานการณ์ (Scenarios)																	
	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
	0.1	0.9	0.2	0.8	0.3	0.7	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.7	0.3	0.8	0.2	0.9	0.1
	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank	C_i	Rank
S4	0.524	5	0.518	5	0.513	6	0.507	6	0.501	6	0.496	5	0.490	6	0.484	7	0.478	8
S5	0.477	7	0.479	7	0.480	7	0.482	7	0.484	7	0.486	6	0.488	7	0.490	6	0.492	6
S6	0.598	2	0.597	2	0.596	2	0.595	2	0.593	2	0.591	2	0.588	3	0.585	4	0.582	4
S7	0.454	8	0.458	8	0.462	8	0.466	8	0.470	8	0.474	7	0.478	8	0.482	8	0.486	7
S8	0.519	6	0.518	6	0.518	5	0.518	5	0.517	5	0.517	4	0.516	5	0.515	5	0.515	5
S9	0.564	4	0.567	4	0.570	4	0.573	4	0.577	4	0.580	3	0.583	4	0.587	3	0.590	3
S10	0.386	10	0.381	10	0.377	10	0.372	10	0.368	10	0.363	9	0.358	10	0.353	10	0.348	10



รูปที่ 2 : การวิเคราะห์ความไวของการจัดอันดับแนวทางการเอาชนะอุปสรรค

6) การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการจัดลำดับความสำคัญ

ด้วยวิธี MCDM อื่น ๆ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรค ด้วยเทคนิค TOPSIS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กับ MCDM สองกลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มจัดลำดับความสำคัญโดยใช้ระยะทาง (ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับ TOPSIS) โดยเปรียบเทียบผลกับเทคนิค CODAS (Combinative Distance-Based Assessment) และ 2) กลุ่มจัดลำดับความสำคัญโดยใช้น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ โดยเปรียบเทียบผลกับสองเทคนิควิธี ได้แก่ WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) และเทคนิค CoCoSo (A Combined Compromise Solution) โดยแสดงผลการจัดลำดับความสำคัญแนวทางการเอาชนะอุปสรรคในตารางที่ 20 และตารางที่ 21 โดยจากการเปรียบเทียบพบว่า เทคนิคทั้ง 4 วิธีให้ผลลัพธ์การจัดอันดับ S2

(จัดโปรแกรมการฝึกอบรมพนักงานทุกคนและทุกระดับที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนาระบบงานใหม่) เป็นแนวทางการเอาชนะอุปสรรคที่มีความสำคัญเป็นอันดับหนึ่งเหมือนกัน ในส่วนผลการจัดลำดับความสำคัญอันดับที่สอง และอันดับที่สาม วิธี TOPSIS, CODAS และ WASPAS ให้ผลที่เหมือนกัน คือ อันดับสอง ได้แก่ S6 (การจัดตั้งโครงสร้างองค์กรแบบเมทริกซ์ในการบริหารโครงการการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนาระบบงานใหม่) และ อันดับที่สาม ได้แก่ S1 (การสร้างช่องทางการสื่อสารเพื่อให้เกิดวิสัยทัศน์ร่วมกันในการเปลี่ยนผ่านไปสู่การพัฒนาระบบงานใหม่) นอกจากนั้นงานวิจัยได้วัดสหสัมพันธ์ของการจัดลำดับของเทคนิควิธีทั้ง 4 โดยใช้วิธีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน ดังสมการที่ (23) โดยแสดงผลการวัดสหสัมพันธ์ไว้ใน ตารางที่ 21 โดยพบว่า การจัดลำดับด้วยเทคนิค TOPSIS มีผลการจัดลำดับที่สัมพันธ์กับ เทคนิค CODAS ($R =$

0.975) และเทคนิค WASPAS ($R = 0.842$) ในระดับสูงมาก สำหรับเทคนิค CoCoSo ($R = 0.793$) ในระดับสูง โดยแปลผลการวัดสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน ในตารางที่ 21 จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่เสนอในงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์การจัดลำดับความสำคัญ

ของแนวทางการเอาชนะอุปสรรค มีความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ และ ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับวิธี MCDM ที่เสนอมาร

$$R = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2-1)} \quad (23)$$

ตารางที่ 20 : เปรียบเทียบผลการจัดลำดับความสำคัญแนวทางการเอาชนะอุปสรรคด้วยวิธี MCDM ต่าง ๆ

แนวทางการเอาชนะอุปสรรค	วิธีการจัดลำดับความสำคัญ			
	TOPSIS	CODAS	WASPAS	CoCoSo
S1	3	3	3	2
S2	1	1	1	1
S3	9	8	9	8
S4	6	7	10	10
S5	7	6	6	6
S6	2	2	2	4
S7	8	9	8	9
S8	5	5	5	5
S9	4	4	4	3
S10	10	10	7	7

ตารางที่ 21 : แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของวิธี MCDM ต่าง ๆ

	TOPSIS	CODAS	WASPAS	CoCoSo
TOPSIS	1.00	0.975	0.842	0.793
CODAS	-	1.00	0.878	0.854
WASPAS	-	-	1.00	0.951
CoCoSo	-	-	-	1.00

ตารางที่ 22 : การแปลผลระดับความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน	ระดับความสัมพันธ์
$R < 0.2$	อ่อนมาก
$0.2 \leq R < 0.4$	อ่อน
$0.4 \leq R < 0.6$	ปานกลาง
$0.6 \leq R < 0.8$	แข็งแรง
$R \geq 0.8$	แข็งแรงมาก

7) สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เสนอกรอบแนวทางการเอาชนะอุปสรรคดังกล่าว โดยประยุกต์วิธีการการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ในการแก้ปัญหา ซึ่งใช้มหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐแห่งหนึ่งเป็นกรณีศึกษา จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และทวนสอบยืนยันโดยผู้เชี่ยวชาญ สามารถระบุปัจจัยอุปสรรคได้จำนวน 12 ปัจจัย และแนวทางการเอาชนะอุปสรรคได้ 10 ปัจจัย โดยการประยุกต์

วิธีการ DEMATEL และวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน สามารถหาน้ำหนักความสำคัญประสม (combination weights) ของปัจจัยอุปสรรคได้ โดยพบว่าปัจจัยอุปสรรค “ขาดนโยบายการขับเคลื่อนจากระบบสารบรรณอิเล็กทรอนิกส์ ทีมผู้บริหารองค์กรที่ชัดเจน และอย่างต่อเนื่อง” (B5) และ “ขาดความสามารถในการบริหารโครงการการพัฒนาระบบสารบรรณอิเล็กทรอนิกส์ใหม่” (B6) มีน้ำหนักความสำคัญเป็นอันดับหนึ่ง

ส่วนอันดับสองและอันดับสาม ได้แก่ “ขาดการจัดสรรทรัพยากรในการขับเคลื่อนโครงการที่เพียงพอและเหมาะสม” (B11) และ “ขาดโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบเทคโนโลยีที่สนับสนุน” (B12) ตามลำดับ ส่วนปัจจัยอุปสรรคสามอันดับท้ายที่มีความสำคัญอันดับสาม ได้แก่ “การต่อต้านของพนักงานในการเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ใหม่” (B4) และ “ขาดการมีส่วนร่วมของพนักงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในการพัฒนาระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ใหม่” (B9) ซึ่งมีความสำคัญเท่ากัน อันดับสอง ได้แก่ “ขาดมาตรฐานกระบวนการระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การทำงานของหน่วยงานต่าง ๆ ไม่เป็นไปในทางเดียวกัน” (B3) และอันดับแรก ได้แก่ ขาดการความร่วมมือระหว่างหน่วยงานข้ามสายงาน (B8) ในส่วนของการจัดลำดับของแนวทางการเอาชนะอุปสรรค โดยวิธีการ TOPSIS พบว่า แนวทางการเอาชนะอุปสรรคที่สำคัญที่สุด อันดับแรก ได้แก่ “จัดโปรแกรมการฝึกอบรมพนักงานทุกคนและทุกระดับที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนากระบวนการใหม่” (S2) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [21] ที่กล่าวว่า ความรู้ความเข้าใจของพนักงานที่เกี่ยวข้องในทุกระดับเป็นปัจจัยแห่งความสำเร็จที่สำคัญต่อการนำ ระบบ EDMS มาใช้ในองค์กร เนื่องจากจะลดแรงต่อต้านของพนักงานในการเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบใหม่ นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่า การฝึกอบรมควรมีการทำให้สม่ำเสมอให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีด้านระบบ EDMS ในส่วนของอันดับที่สอง ได้แก่ “การจัดตั้งโครงสร้างองค์กรแบบเมทริกซ์ในการบริหารโครงการการเปลี่ยนแปลงสู่การพัฒนากระบวนการใหม่” (S6) ประเด็นดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ [29] ซึ่งเน้นว่า โครงสร้างองค์กรแบบเมทริกซ์จะช่วยให้การบริหารโครงการ ICT ที่มีความซับซ้อนและมีสเกลขนาดใหญ่ ควรต้องดึงพนักงานที่เกี่ยวข้องออกจากงานประจำเพื่อมาทำงานโครงการโดยเฉพาะเพื่อให้พนักงานสามารถมีเวลาและให้ความสนใจต่อการพัฒนาโครงการ ICT ได้อย่างเต็มที่ สำหรับงานวิจัยให้ข้อคิดเห็นเพิ่มเติมว่า สำหรับหน่วยงานในลักษณะมหาวิทยาลัย ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างองค์กรที่ตายตัวและไม่ยืดหยุ่น ขาดมาตรฐานการประเมินผลงานของพนักงานที่มาทำงานเต็มเวลากับโครงการที่ชัดเจน อีกทั้งหน่วยงานต้นสังกัดก็ไม่อยากเสียพนักงานที่ทำงานประจำไปเพราะจะเป็นภาระของพนักงานคนอื่น ๆ ทำให้โครงสร้างองค์กรแบบเมทริกซ์สำหรับการพัฒนา ICT เกิดขึ้นยากหรือเกิดขึ้นได้ แต่ส่วนใหญ่มักจะขาดเอกภาพและประสิทธิภาพ

ในการดำเนินโครงการ ในส่วนของอันดับที่สาม ได้แก่ “การสร้างช่องทางการสื่อสารเพื่อให้เกิดวิสัยทัศน์ร่วมกันในการเปลี่ยนผ่านไปสู่การพัฒนาระบบงานใหม่” (S1) ซึ่งสอดคล้องและสนับสนุนจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดย [30] ที่เน้นถึงความสำคัญของการสื่อสารจะทำให้พนักงานทุกระดับขององค์กร มีความเข้าใจถึงความสำคัญของการเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบ ICT ใหม่ ทำให้เกิดการดำเนินงานไปในทิศทางเดียวกัน งานวิจัยนี้มีข้อคิดเห็นเพิ่มเติมในประเด็นนี้ว่า นอกจากจะสร้างช่องทางการสื่อสารแล้วควรมีการช่องทางการรับข้อมูลย้อนกลับ (feedback) จากพนักงานมาปรับปรุงการดำเนินงานของระบบ EDMS อีกด้วย สำหรับผลของการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักประสมของปัจจัยอุปสรรคไม่มีนัยสำคัญมากต่อการจัดอันดับของแนวทางการชนะอุปสรรค และจากการเปรียบเทียบกับวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์อื่น ๆ ให้ผลการจัดลำดับที่สอดคล้องกันยังมีนัยสำคัญ จึงสรุปว่าโมเดลตัวแบบที่เสนอนี้มีความน่าเชื่อถือ

8) ประโยชน์ของงานวิจัย

สามารถแบ่งประโยชน์ของงานวิจัยได้เป็น ประโยชน์เชิงวิชาการ (academic contributions) และ ประโยชน์ในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ (practical contributions) ดังนี้

8.1) ประโยชน์เชิงวิชาการ (Academic Contributions)

1. งานวิจัยนี้รวบรวมปัจจัยอุปสรรค และแนวทางการเอาชนะอุปสรรค ของการนำระบบ EDMS มาใช้ในองค์กร โดยการสังเคราะห์จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ
2. งานวิจัยนี้ได้พัฒนารอบการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบ EDMS มาใช้ในองค์กร โดยประยุกต์วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษามาก่อน
3. งานวิจัยนี้ใช้น้ำหนักประสมระหว่างน้ำหนักอัตวิสัย (subjective weight) และน้ำหนักภววิสัย (objective weights) ในการคำนวณหาน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยอุปสรรค ซึ่งทำให้น้ำหนักที่ได้มีความเที่ยงตรง (accuracy) มากกว่าการใช้น้ำหนักประเภทใดประเภทหนึ่ง

8.2) ประโยชน์ในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ (Practical Contributions)

1. มหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐแห่งหนึ่ง กรณีศึกษา สามารถนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการเอาชนะอุปสรรคการนำระบบ EDMS มาใช้ในองค์กร
2. องค์กรอื่น ๆ ที่มีแผนการนำระบบ EDMS มาใช้ สามารถประยุกต์ใช้กรอบงานวิจัยนี้ไปประเมินองค์กรของตนเองได้ในลักษณะเดียวกัน

REFERENCES

- [1] A. Zaky and I. G. B. B. Nugraha, "Increase activity time efficiency in official documents management using blockchain-based distributed data storage," in *Proc. 2019 Int. Conf. Elect. Eng. and Inform. (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, Jul. 2019, pp. 81–86, doi: 10.1109/ICEEI47359.2019.898
- [2] N. Nizamuddin, K. Salah, M. Ajmal Azad, J. Arshad, and M. H. Rehman, "Decentralized document version control using ethereum blockchain and IPFS," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 76, pp. 183–197, Jun. 2019.
- [3] H. S. Ahmad, I. M. Bazlamit, and M. D. Ayoush, "Investigation of document management systems in small size construction companies in Jordan," *Procedia Eng.*, vol. 182, pp. 3–9, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.101.
- [4] M. Murugan and S. Marisamynathan, "Analysis of barriers to adopt electric vehicles in India using fuzzy DEMATEL and Relative importance Index approaches," *Case Stud. Transp. Policy*, vol. 10, no. 2, pp. 795–810, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cstp.2022.02.007.
- [5] P. Ji, H. Y. Zhang, and J. Q. Wang, "Selecting an outsourcing provider based on the combined MABAC–ELECTRE method using single-valued neutrosophic linguistic sets," *Comput. Indus. Eng.*, vol. 120, pp. 429–441, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.cie.2018.05.012.
- [6] B. Yang, J. Zhao, and H. Zhao, "A robust method for avoiding rank reversal in the TOPSIS," *Comput. Indus. Eng.*, vol. 174, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108776.
- [7] A. Vishwakarma, G. S. Dangayach, M. L. Meena, and S. Gupta, "Analysing barriers of sustainable supply chain in apparel & textile sector: A hybrid ISM-MICMAC and DEMATEL approach," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 5, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.clscn.2022.100073.
- [8] F. Gao, "An integrated risk analysis method for tanker cargo handling operation using the cloud model and DEMATEL method," *Ocean Eng.*, vol. 266, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113021.
- [9] A. Kashyap, C. Kumar, V. Kumar, and O. J. Shukla, "A DEMATEL model for identifying the impediments to the implementation of circularity in the aluminum industry," *Decis. Analytics J.*, vol. 5, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.dajour.2022.100134.
- [10] P.-H. Tsai, Y.-W. Wang, and H.-S. Kao, "Applying DEMATEL-ANP approach to explore the intention to hold roadside wedding banquets in Penghu: A consumers' perspective," *Eval. Program Plan.*, vol. 95, Dec. 2022, Art. no. 102172, doi: 10.1016/j.evalprogplan.2022.102172.
- [11] Y. Meng, X. Tian, Z. Li, W. Zhou, Z. Zhou, and M. Zhong, "Exploring node importance evolution of weighted complex networks in urban rail transit," *Phys. A: Stat. Mech. Appl.*, vol. 558, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.physa.2020.124925.
- [12] N. A. Al-Thani, T. Al-Ansari, and M. Haouari, "Integrated TOPSIS-COV approach for selecting a sustainable PET waste management technology: A case study in Qatar," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, Aug. 2022, Art. no. e10274, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10274.
- [13] K. Yoon and C. L. Hwang, "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey," in *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol. 186, Berlin, Germany: Springer, 1981.
- [14] H. Deng, C. H. Yeh, and R. J. Willis, "Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights," *Comput. Oper. Res.*, vol. 27, no. 10, pp. 963–973, Sep. 2000.
- [15] V. Singh, V. Kumar, and V. B. Singh, "A hybrid novel fuzzy AHP-TOPSIS technique for selecting parameter-influencing testing in software development," *Decis. Analytics J.*, vol. 6, Mar. 2023, Art. no. 100159, doi: 10.1016/j.dajour.2022.100159.
- [16] P. Bhatia and N. Diaz-Elsayed, "Facilitating decision-making for the adoption of smart manufacturing technologies by SMEs via fuzzy TOPSIS," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 257, Mar. 2023, Art. no. 108762, doi: 10.1016/j.ijpe.2022.108762.
- [17] R. Yang *et al.*, "Public and private blockchain in construction business process and information integration," *Autom. Constr.*, vol. 118, pp. 1–20, Oct. 2020.

- [18] B. E. Munkvold and I. Zigurs, "Integration of e-collaboration technologies: Research opportunities and challenges," *Int. J. e Collab.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–24, 10.4018/jec.2005040101.
- [19] B. Björk, "Electronic document management in temporary project organisations: Construction industry experiences," *Online Inf. Rev.*, vol. 30, no. 6, pp. 644–655, doi: 10.1108/14684520610716144.
- [20] C. Devanand, "Importance of electronic document/information management systems in modern architectural, engineering and construction projects," *IRJET*, vol. 2, no. 3, pp. 2197–2204, 2015.
- [21] C. Devece, D. Palacios, and D. Martinez-Simarro, "Effect of information management capability on organizational performance," *Serv. Bus.*, vol. 11, no. 3, pp. 563–580, 2017.
- [22] F. Carmichael, D. Palacios-Marques, and I. Gil-Pechuan, "How to create information management capabilities through web 2.0," *Serv. Ind. J.*, vol. 31, no. 10, pp. 1613–1625, 2011.
- [23] M. Hjelt and B. C. Björk, "Experiences of EDM usage in construction projects," *Electron. J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 11, no. 1, pp. 113–125, 2006.
- [24] K. E. Huang, J. H. Wu, S. Y. Lu, and Y. C. Lin, "Innovation and technology creation effects on organizational performance," *J. Bus. Res.*, vol. 69, no. 6, pp. 2187–2192, 2016.
- [25] S. Y. Hung, K. Z. Tang, C. M. Chang, and C. D. Ke, "User acceptance of intergovernmental services: An example of electronic document management system," *Gov. Inf. Q.*, vol. 26, no. 2, pp. 387–397, 2009.
- [26] M. Jervisand and M. Masoodian, "How do people attempt to integrate the management of their paper and electronic documents?," *Aslib J. Inf. Manag.*, vol. 66, no. 2, pp. 134–155, 2014.
- [27] J. Luo, M. Fanand, and H. Zhang, "Information technology and organizational capabilities: A longitudinal study of the apparel industry," *Decis. Support Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 186–194, 2012.
- [28] K. Yoon and C. L. Hwang, "Multiple attribute decision making," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 287–288, 1995.
- [29] S. Senaratne and J. Mayuran, "Documentation management based on ISO for construction industries in developing countries," *J. Constr. Dev. Ctries.*, vol. 20, no. 2, pp. 81–95, 2015.
- [30] T. Zhang, X. Wang, and G. Zhuang, "Building channel power: The role of IT resources and information management capability," *J. Bus. Ind. Mark.*, vol. 32, no. 8, pp. 1217–1227, 2017.

Sensitivity Analysis of Suspension Parameters of the Critical Velocity of a Railway Bogie on a Tangent Track Using Standardized Regression Coefficients

Thanaporn Talingthaisong¹ Sedthawatt Sucharitpwatskul² Anchalee Manonukul³
Panya Kansuwan^{4*}

^{1,2,3}*National Metal and Materials Technology Center,
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, Thailand*

^{4*}*Department of Mechanical Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: panya.ka@kmitl.ac.th

Received: 26 November 2022; Revised: 1 March 2023; Accepted: 28 April 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

This paper presents the sensitivity analysis using standardized regression coefficients (SRC) to enumerate an important factor of each suspension parameter on the critical velocity of a bogie. Due to uncertain parameters, the semi-global sensitivity analysis benefits both designers and maintenance engineers in controlling the risk levels of the screened components. The bogie represents a two-axle railway truck of the State Railway of Thailand (SRT). Six-degree-of-freedom motion equations describe its dynamic behaviors traveling on a tangent track. In a stochastic model, the stiffness and damping coefficients of suspension components are considered random variables with presumed Gaussian distribution. A probability distribution obtained, where the SRCs were derived, shows that the speed strongly correlates with the longitudinal yaw stiffness value of the primary suspension system. The secondary suspension system's lateral and longitudinal yaw damping coefficients appear equally influential on the critical speed.

Keywords: Monte Carlo method, Probability safety assessment, Railway bogie, Reliability analysis, Vehicle dynamics

I. INTRODUCTION

Recently, the railway industry has faced the challenges of reducing manufacturing costs while maintaining marginal engineering safety. Operators first provide conceptual requirements to engineering teams to design the vehicles with constructed infrastructures expected to be in service for predefined service life against relevant damage mechanisms. After the vehicle is fabricated, it must pass safety requirements according to applicable railway safety standards. However, critical items deteriorate at different rates, and the defects that occur further degrade operating performance. Monitoring the key performance indicators can help maintenance engineers identify the parts to be inspected and keep the damage within a safe range. This defect-tolerance design strategy partly leaves the safety issues to maintenance departments to inspect based on time or risk measurements. In either method, knowledge management along the engineering design process on the sensitive parts is inevitable. To ensure safe operation, railway engineers must understand the rank of the influential parameters of the railway vehicles on the critical speed to set railway operating windows of the vehicles. Overlooking the life-critical components may lead to a severe accident that could cost human lives.

A railway system's safe and economic operation depends on the railway vehicles' running performance in service. The acceptable conditions of the vehicles are described in EN14363 [1] and UIC 518 [2]. One of the safety issues is the safety against derailment as quantified by a limiting ratio of the lateral to vertical forces at a flange contact due to lateral oscillation motion. The hunting motion, arising from non-conservative forces, causes vehicle instability beyond a critical velocity. The further the operation speed, the more violent the oscillation and eventually causes severe flange wear, wheel climbing, and derailment.

Since stability is essential to the safe operation of railway vehicles, the oscillation motion on tangent tracks has been the subject of intense investigations using four, six, or ten degrees of freedom models. Wheelsets' lateral displacement and yaw angle are the state variables in 4-DOF systems [3]-[7]. When the bogie's lateral displacement and yaw angle are considered, the 6-DOF models were investigated in different aspects [8]-[13]. Up to 10 DOF systems consider more on each wheelset's vertical and roll angle [14], [15]. The works relied on linearizing a system of governing differential equations to study the bogie's dynamic behaviors traveling on a straight track. In particular, the suspension parameters and wheel conicity are two categories of parameters in consideration. Wickens [6] showed that a model required at least 6-DOF for realistic stability analysis. Flexibility between the wheelset and the frame and wheel/rail profile should be considered in the design of high-speed railway vehicles. More flexible damped or stiffer suspension is preferable [10], [11]. The effect of nonlinear yaw dampers on the behavior was studied by Mehdi and Shaopu [10] using the Bogoliubov averaging method. A local sensitivity, as a result, suggests the influence of the secondary suspension parameters. Due to existing nonlinear creep forces at the interface, two-axle trucks indicate subcritical Hopf bifurcation dynamic behaviors [3], [5], [8], [16], [17]. They found that the critical velocity on a tangent track strongly depended on characteristics of the wheel/rail interface expressed as conicity.

A central point of the present study is to determine the critical velocity and the sensitivity of each parameter on the velocity of a railway bogie of SRT. The physical parameters of primary and secondary suspension, including conicity, are provided with a predetermined probability distribution. The sensitivity analysis method is a hybrid local-global scheme on the

linearized model. The Monte Carlo method [18] is implemented to generate the parameters as random variables to be distributed normally about their specific operative means with a standard deviation of 10% of the means. The condition for critical velocity data acquirement is when the real part of each root of the characteristic equation derived from the six-DOF bogie truck system is recognized as positive at which the bifurcation points are located. The distribution of the obtained critical velocity is assessed as an influence measure by the normalized factor's standard deviation compared to those influenced by other parameters. Classification of these parameters benefits designers and service engineers in discriminating between critical and less critical parameters. Delaying damage mechanisms that compromise the elements relevant to the vital parameters will then prolong the safe operating lifetime of the system. Keeping the part fitted in service with a risk-based maintenance strategy needs a quick calculation of the sensitivity of the parameters. Less distributed measurements of the parameter can mitigate risk. The standardized regression coefficients (SRC) conducted is the method that includes both the effect of physical behavior and the uncertainty of the measured parameters.

II. METHODOLOGY

A. Equations of Motion of a Wheelset on a Tangent Track

A wheelset is a crucial component that governs the dynamic behaviors of railway vehicles. This study employs wheelset motion equations based on an equilibrium track coordinate system to specify a bogie mathematical model [10], [14]. The wheelset dynamic equation describes the system when the bogie travels on a tangent track at a constant speed. Figure 1 illustrates the free-body diagram of the wheelset in which F_{ix} and F_{iy} are creep forces in the longitudinal and lateral direction on the left ($i = L$) and right ($i = R$) wheel/rail contact points. M_{iz} is the creep moments about the vertical direction. Equations for lateral and vertical motions in the equilibrium axes derived from Newton's law are:

$$m\ddot{y} = F_{Ly} + F_{Ry} + N_{Ry} + N_{Ly} + F_{sy} - F_T \quad (1)$$

$$m\ddot{z} = F_{Lz} + F_{Rz} + N_{Rz} + N_{Lz} + F_{sz} - W_A \quad (2)$$

$$I_x \ddot{\phi} - (I_y - I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} = R_{Ry}(F_{Rz} + N_{Rz}) - R_{Rz}(F_{Ry} + N_{Ry}) + R_{Ly}(F_{Lz} + N_{Lz}) - R_{Lz}(F_{Ly} + N_{Ly}) \quad (3)$$

$$I_z \ddot{\psi} - (I_{wx} - I_{wy}) \dot{\phi} \dot{\theta} = R_{Rx}(F_{Ry} + N_{Ry}) - R_{Ry}F_{Rx} + R_{Lx}(F_{Ly} + N_{Ly}) - R_{Ly}F_{Lx} + M_{Lz} + M_{Rz} + M_{sz} \quad (4)$$

in which $\vec{N}_L = N_L \cos(\delta_L + \phi) \hat{i} + N_L \sin(\delta_L + \phi) \hat{j}$, $\vec{N}_R = N_R \cos(\delta_R - \phi) \hat{i} - N_R \sin(\delta_R - \phi) \hat{j}$. N_i is the normal contact force and δ_i is contact angle. ϕ and ψ are roll angle and yaw angle, respectively.

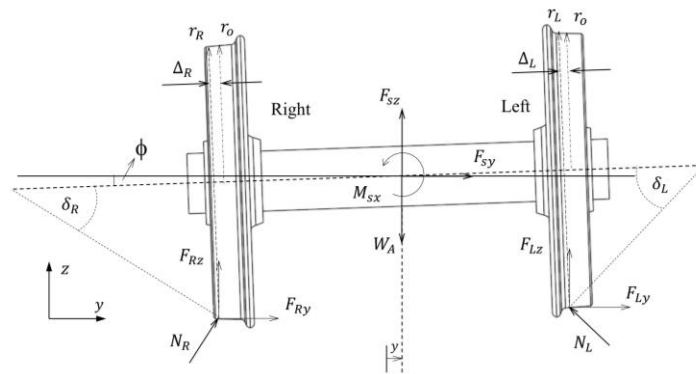


Figure 1: The free-body diagram of a wheelset

For small perturbation from the wheelset's equilibrium position, the magnitude of normal contact forces are

$$N_L \cos(\delta_L + \phi) \approx \frac{1}{2}(W_A - F_{sz}) - (2a)^{-1}(r_R F_{Ry} + r_L F_{Ly}) \quad (5)$$

$$N_R \cos(\delta_R - \phi) \approx \frac{1}{2}(W_A - F_{sz}) + (2a)^{-1}(r_R F_{Ry} + r_L F_{Ly}) \quad (6)$$

According to Kalker's linear creep theory, creep forces as functions of creepages are:

Longitudinal creep force:

$$F_x = -f_{33}\xi_x \quad (7)$$

Lateral creep force:

$$F_y = -f_{11}\xi_y - f_{12}\xi_{sp} \quad (8)$$

Spin creep moment:

$$M_z = f_{12}\xi_y - f_{22}\xi_{sp} \quad (9)$$

in which ξ_x, ξ_y, ξ_{sp} are longitudinal, lateral, and spin creepages in Table 1 [14]. f_x, f_y, f_{sp} are creep coefficients as provided in [10].

The determination of the lateral suspension forces and the vertical suspension moment are presented in Eq. (10). Moreover, Eq. (11) applied to the 6-DOF model (Figure 2) in terms of lateral and longitudinal stiffness (K_w) and damp coefficient (C_w).

Longitudinal creep force:

$$F_{s,y} = -2K_{wy}y - 2C_{wy}\dot{y} \quad (10)$$

Vertical suspension moment:

$$M_{s,z} = -2K_{wx}b_1^2 - 2C_{wx}b_2^2 \quad (11)$$

Table 1: Creepage at the Left/Right Wheel/Rail Contact Points [14]

Left Wheel/Rail Contact Point
$\xi_{xL} = \frac{1}{V} \left(V - \frac{r_L}{r_o} - a\psi \right)$
$\xi_{yL} = \frac{1}{V} (\dot{y} + r_L \dot{\phi} - V\psi) \cos(\delta_L + \phi)$
$\xi_{spL} = \frac{1}{V} \{ \dot{\psi} \cos(\delta_L + \phi) - \Omega \sin(\delta_L) \}$
Right Wheel/Rail Contact Point
$\xi_{xR} = \frac{1}{V} \left(V - \frac{r_R}{r_o} + a\psi \right)$
$\xi_{yR} = \frac{1}{V} (\dot{y} + r_R \dot{\phi} - V\psi) \cos(\delta_R - \phi)$
$\xi_{spR} = \frac{1}{V} \{ \dot{\psi} \cos(\delta_R - \phi) + \Omega \sin(\delta_R) \}$

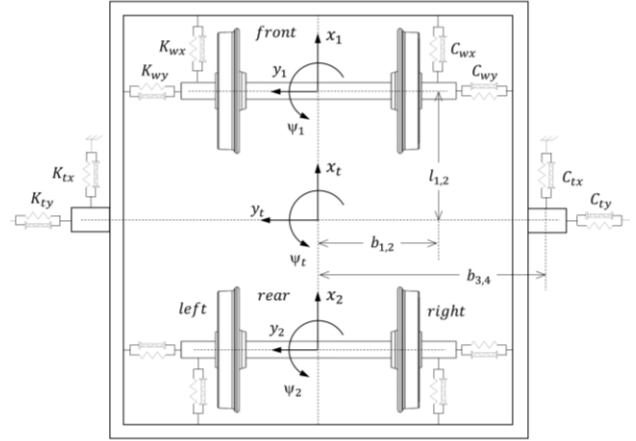


Figure 2: Two-axle bogie configuration

To prevent derailment of the vehicle operating at a velocity higher than a critical speed, a nonlinear flange contact force is

$$F_T = \begin{cases} K_r(y - \delta) & y > \delta \\ 0 & -\delta \leq y \leq \delta \\ K_r(y + \delta) & y < -\delta \end{cases} \quad (12)$$

in which K_r is the wheel/rail contact lateral stiffness. δ is the flange clearance determined when the first abrupt change of rolling radius difference values occurs, as indicated in Figure 3, using the semi-analytical method [1]. The wheelset is shifted laterally to create a contact locus to determine a yaw-angle that satisfies the criteria of an equi-vertical distance between each pair of left/right wheel and rail profiles. The wheel profile is Vidura provided by SRT, while the 54E1 rail profile refers to EN13674-1 [2].

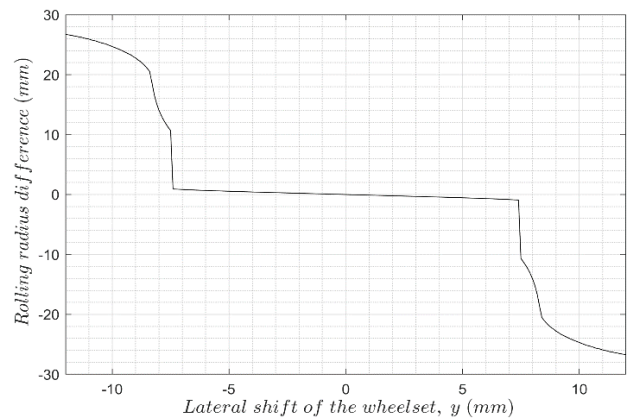


Figure 3: Determination of flange clearance

By substituting Eq. (5) and (6) into Eq. (1) and Eq. (4) for normal contact force, the motion equations of the wheelset become Eq. (13) and Eq. (14), respectively, when further using Eq. (15) and neglecting high-order terms.

$$m_w \ddot{y} + \frac{2f_{11}}{V} \left(\dot{y} + \frac{r_L + r_R}{2} \dot{\phi} - V\psi \right) + 2f_{33} \psi \left(1 - \frac{r_L + r_R}{2R_o} \right) + 2f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}}{V} - \frac{\delta_L - \delta_R}{2R_o} \right) + m_w g \left(\frac{\delta_L - \delta_R}{2} + \phi \right) = F_{s,y} - F_T \quad (13)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi} + (I_{wy} - I_{wx}) \frac{V}{R_o} \dot{\phi} + \frac{2af_{33}}{R_o} \frac{r_L - r_R}{2} - \frac{2f_{12}}{V} \left(\dot{y} + \frac{r_L + r_R}{2} \dot{\phi} - V\psi \right) + \frac{2a^2 f_{33}}{V} \dot{\psi} - 2f_{22} \frac{\delta_L - \delta_R}{2R_o} - am_w g \frac{\delta_L + \delta_R}{2} \psi + \frac{2f_{22}}{V} \dot{\psi} = M_{s,z} \quad (14)$$

$$\delta_L = \delta_R = \lambda, \frac{1}{2}(r_L - r_R) = \lambda y, \frac{1}{2}(r_L + r_R) = r_o, \phi = \lambda \frac{y}{d} \quad (15)$$

The linearized differential equations of wheelsets when $i = 1$ represents the front axle and $i = 2$ represents the rear axle are Eq. (16) and (17).

$$m_w \ddot{y}_i + \frac{2f_{11}}{V} \left[\left(1 + r_o \frac{\lambda}{d} \right) \dot{y}_i - V\psi_i \right] + \frac{2f_{12}}{V} \dot{\psi}_i + W_A \frac{\lambda}{d} y_i = F_{s,yi} - F_{Ti} \quad (16)$$

$$- \frac{2f_{12}}{V} \left[\left(1 + r_o \frac{\lambda}{d} \right) \dot{y}_i - V\psi_i \right] + \frac{2a^2 f_{33}}{V} \dot{\psi}_i - aW_A \lambda \psi_i + \frac{2f_{12}}{V} \dot{\psi}_i = M_{s,zi} \quad (17)$$

The governing differential equations of the motion of the bogie frame for lateral and yaw movement are

$$m_t \ddot{y}_t = -F_{sy1} - F_{sy2} - 2K_{ty} y_t - 2C_{ty} \dot{y}_t \quad (18)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_t = -2K_{wy} [y_1 - y_t + l_1 \psi_t] l_1 + 2K_{wy} [y_2 - y_t - l_1 \psi_t] l_1 - 2C_{wy} [\dot{y}_1 - \dot{y}_t + l_2 \dot{\psi}_t] l_2 + 2C_{wy} [\dot{y}_2 - \dot{y}_t - l_2 \dot{\psi}_t] l_2 - 2K_{tx} b_3^2 \psi_t - 2C_{tx} b_4^2 \dot{\psi}_t + 2K_{wx} b_1^2 (\psi_1 + \psi_2 - 2\psi_t) + 2C_{wx} b_2^2 (\dot{\psi}_1 + \dot{\psi}_2 - 2\dot{\psi}_t) \quad (19)$$

Eq. (16)-(19) complete the 6-DOF system of motion for the two-axle bogie on a straight track considered in this paper. Table 2 provides the nomenclatures and operative values of system parameters.

Table 2: Nomenclature and system parameters used for numerical analysis [10]

Parameter	Symbol	[10]	SRT	Unit
Half of the track gauge	a	0.7176	0.5000	m
Lateral rail stiffness	K_r	1.617E7	1.617E7	N/m
Flange clearance	δ	0.00923	0.00740	m
Wheel radius	r_o	0.5330	0.4255	m
Wheel conicity	λ	0.0500	0.0536	-
Wheelset mass	m_w	1800	1542	kg
Moment of inertia of the wheelset – roll component	I_{wx}	625.7	272.2	$kg \cdot m^2$
Moment of inertia of the wheelset – pitch component	I_{wy}	133.90	73.15	$kg \cdot m^2$
Moment of inertia of the wheelset – yaw component	I_{wz}	625.7	272.2	$kg \cdot m^2$
Total bogie mass	m	-	5500	kg
Axle load	W_A	38492	42620	N
Mass of bogie frame	m_t	4255.6	2439.0	kg
Moment of inertia of bogie frame in yaw	I_{tz}	10314	1998	$kg \cdot m^2$
Primary suspension - Lateral stiffness	K_{wy}	8.67E4	1.87E5	N/m
Primary suspension - Lateral damping coefficient	C_{wy}	2.10E4	-	$N \cdot s/m$
Primary suspension – Longitudinal yaw spring stiffness	K_{wx}	8.67E4	1.87E5	N/m
Primary suspension - Longitudinal yaw damping coefficient	C_{wx}	1.92E4	-	$N \cdot s/m$
Secondary suspension - Lateral stiffness	K_{ty}	1.532E5	8.0E5	N/m
Secondary suspension - Lateral damping coefficient	C_{ty}	5.254E4	2.5E4	$N \cdot s/m$
Secondary suspension - Longitudinal yaw spring stiffness	K_{tx}	2.189E5	8.0E5	N/m
Secondary suspension - Longitudinal yaw damping coefficient	C_{tx}	6.129E5	2.5E5	$N \cdot s/m$
Half of the primary longitudinal yaw spring arm	b_1	1.0000	0.7875	m
Half of the primary longitudinal yaw damper arm	b_2	1.2700	0.7875	m
Half of the secondary longitudinal yaw spring arm	b_3	0.7940	0.7875	m
Half of the secondary longitudinal yaw damper arm	b_4	0.889	1.095	m
Half of the longitudinal distance of the lateral secondary spring	l_1	1.295	1.15	m
Half of the longitudinal distance of the lateral secondary dampers	l_2	1.295	1.15	m

B. Sensitivity Analysis Using Standardized Regression Coefficient (SRC) [3]

Sensitivity analysis is typically implemented to assess model input factor's relative importance. To the first intuition, sensitivity can be evaluated by computing partial derivatives of an output variable concerning other dependent parameters. A parameter giving a higher value of the derivative shows more the extent of output change per unit change of the input when other variables are constant. The principle represents local sensitivity that is independent of the factor's uncertainty. The sensitivity analysis can be performed in a deterministic or probabilistic way. A type of sensitivity analysis performed in the context of stochastic analysis provides information regarding the distribution of random variables. A better measure for such an analysis is considering the factor's standard deviation according to Eq. (20). Due to the calculation, assumptions must be made about the range of variation of the element; thus, Eq. (20) is a hybrid local-global measure.

$$S_x^y = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \frac{\partial y}{\partial x} \quad (20)$$

where S_x^y is the sensitivity of output y to the factor parameter x , σ_j is the standard deviation of the parameter. The suspension parameters of interest are those mentioned in the last sections. To express their sensitivity to critical velocity, we assume a normal distribution of each parameter with a standard deviation of 10% of its operating design value. Also, to consider the influence of uncertainty, the standard deviation of K_{wx} varies at 5%, 10% and 20%. Normally, Eq. (20) is commonly not used for sensitivity analysis because the coefficients, $\frac{\partial y}{\partial x}$, are dimensioned. As a result, the practice is to compute the standardized regression coefficients, SRC (β_x), defined in a regression model as:

$$\tilde{y} = \frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} = \beta_x \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}; \quad (21)$$

in which $\tilde{y}$ is the vector of regression model prediction. Eq. (21) insinuates that $\beta_x = S_x^y$ under the linear model assumption.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Numerical Analysis of the Critical Speed of the Two-axle Bogie

We solved the eigenvalue problems numerically to determine the critical velocity of the bogie. The state-space equations of the motion are transformed in the form of Eq. (22)–(23) below

$$\dot{X} = A(V)X + F(X) \quad (22)$$

in which $A(V)X$ represents the linear term and $F(X)$ represent the nonlinear term. $X(t)$ is a 12-column matrix of state variables describing the lateral and yaw motion of the wheelsets and bogie frame.

$$X = \{y_1, \dot{y}_1, \psi_1, \dot{\psi}_1, y_2, \dot{y}_2, \psi_2, \dot{\psi}_2, y_t, \dot{y}_t, \psi_t, \dot{\psi}_t\}^t \quad (23)$$

At different velocities, an eigenvalue and eigenvector problem of $A(V)$ is solved repeatedly. The system becomes unstable when at least one resolved eigenvalue is a positive real number. However, it is undetermined when a pair of the eigenvalues is imaginary. Consequently, the critical velocity (V_c) is the highest velocity at which all the eigenvalues associated with the matrix are negative real numbers. The numerical method results in Figure 4, in which the dot marker represents the critical velocity at 43.3 m/s with the contact conicity of 0.0536. The conicity was calculated from the contact pair profile configuration of the Vidura wheel profile and 54E1 rail profile. When using the same parameters presented by Mehdi and Shaopu [4], we obtain the same critical velocity of the bogie is 32.8 m/s at a conicity of 0.05.

For demonstrating the hunting phenomena of the vehicle, Eq. (16)–(19) are solved numerically using the

4th order Runge-Kutta integration scheme [5]. Lateral displacements of each wheelset (y_1, y_2) and of the truck (y_t) oscillating with time are presented in Figure 5a) at the velocity of 40 m/s located in undamped regime and in Figure 5b) at the velocity of 45 m/s located on the other side. Initial lateral displacement of the front wheelset (y_1) is set to be 5 mm, while all other initial values are zeros.

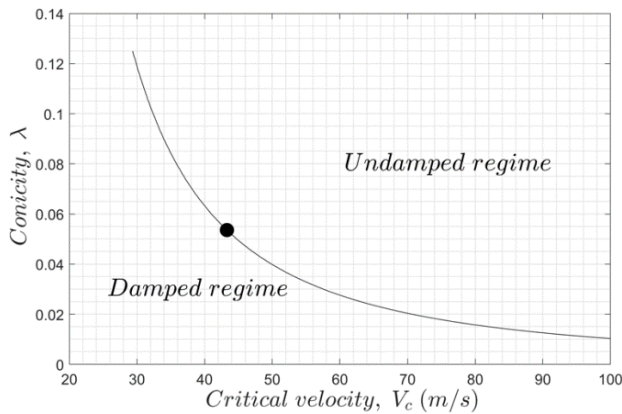


Figure 4: Numerical calculation of V_c versus λ

At velocities less than V_c , the amplitudes of lateral displacements asymptotically vanish in the absence of track irregularity. The dynamic behavior is an underdamped system where the magnitude of the negative real part of system eigenvalues specifies the decay rate. Upon increasing the velocities above V_c , the vehicle vibrates as an undamped system but is limited by the wheel flange constraint with the rail. The amplitude of wheelset displacement is greater than 7.4 mm possessing a risk of a flange climb. Preventing a flange climb that leads to derailment is paramount for safe operations. Consequently, a derailment ratio is denoted as Y/Q in which Y and Q are the lateral and vertical forces in the flange contact, respectively. According to Nadal's theory in UIC 518 regulation, Y/Q is limited to 0.8 when the flange angle is 65° when using the coefficient of friction of 0.5.

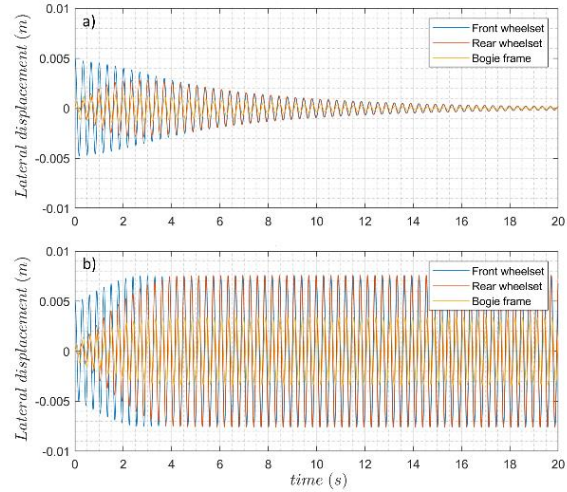


Figure 5: Time response of lateral displacement
a) 40 m/s b) 45 m/s

B. The Relationship of Each Suspension System Parameter on the Critical Velocity

Suspension systems of the two-axle bogie usually consist of two-stage primary and secondary suspension. The main components are springs and dampers arranged to secure a stable running behavior and safety. Springs and dampers between the bogie frame and the wheelset are of primary suspension. The lateral motion of the wheelset is controlled by two pairs of springs and dampers on both sides. The other two pairs, oriented in a longitudinal direction, assist in securing the yaw motion of the wheelset. The car body is connected to the bogie via the secondary suspension system, in which two pairs of springs and dampers orient in the lateral and longitudinal directions.

Figure 6 exhibits stability diagrams for spring stiffness and the damping coefficient of springs and dampers in the primary suspension. Two regions separated by the resulting curves are typically recognized. When operating in the left region of the curve, the vehicle is in subcritical bifurcation phenomena with vanishing displacement amplitude with time. However, when operating in the right area, the vehicle exhibits supercritical Hopf

bifurcation and oscillates till constrained by flange contact forces. K_{wy} and K_{wx} increase with the critical velocity about the operating stiffness. If the spring stiffness is greater than $4.5E5$ N/m, the critical velocity decreases with increasing K_{wy} . It should be noted that our range of consideration may be unrealistically wide but just for an intuitive point. For comparison, each figure has a filled dot representing the operating physical parameter (Table 2) and its corresponding critical velocity.

Figure 7 demonstrates the monotonic relationship of the secondary suspension parameters with critical velocity. Increasing K_{ty} , C_{ty} , K_{tx} , C_{tx} increases the critical velocity. However, the correlations become obscure in the comparative aspects of the parameters.

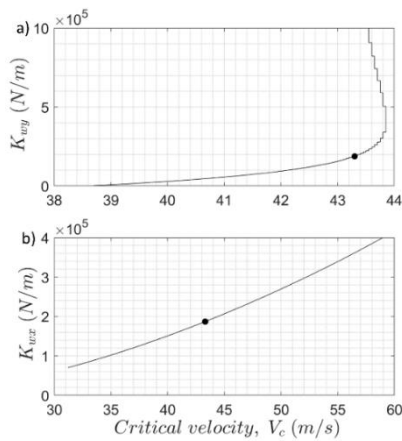


Figure 6: The effect of primary suspension parameters on limited speed

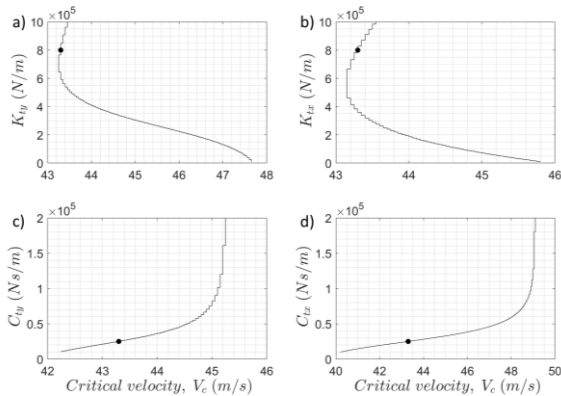


Figure 7: The effect of secondary suspension parameters on limited speed

C. Sensitivity Analysis of Two-axle Bogie's Stability

To classify the relative importance, we perform a Monte Carlo experiment on the model for sensitivity analysis to create scatter plots of the normalized critical velocity versus normalized physical parameters of each component in Figure 8–Figure 10. The model parameters are generated in a column matrix for 10000 data sets according to their distribution before being substituted into the mathematical model to compute critical velocity. The number of data sets is large enough to provide meaningful statistical results without too much loading on our computational resources. The normal distribution of calculated critical velocity obtained after substituting the random parameter matrix into the dynamic model is shown in Figure 11. Averaged critical velocity is 43.44 m/s with a standard deviation of 2.28.

$\tilde{K}_{wx}$ is recognized immediately in Figure 8a as the most influential factor when compared to $\tilde{K}_{wy}$ in Figure 8b and $\tilde{K}_{ty}$, $\tilde{C}_{ty}$, $\tilde{K}_{tx}$, $\tilde{C}_{tx}$ in Figure 9. The aggregated data in circular-like bounded shapes on the x-y plane characterize weak correlations in contrast to the case in which the scattered data are bound in the tilted band. Nevertheless, the local dependency of K_{wy} in Figure 6b and K_{ty} , C_{ty} , K_{tx} , C_{tx} in Figure 7 are smeared out due to the variation of the measured data. The other strong influence similar to $\tilde{K}_{wx}$ is also observed for the conicity in Figure 10, but in negative correlation, i.e., the increase of the conicity reduces the critical velocity. This qualitative recognition is invaluable for understanding the system but hard to be implemented as an input to commercial probability safety assessment programs if numeric values are required. When the quantitative sense is necessary, the stiffness value should be paid to control vehicle safety and performance. The important factor of both primary and secondary suspension elements, including conicity, are

determined quantitatively using the linear regression method of the distributed data according to Eq. (20).

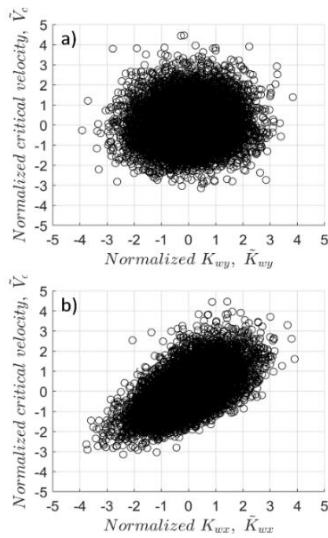


Figure 8: Scatter plot of $\tilde{y}$ versus $\tilde{V}_c$ using $\sigma_x = 10\%$

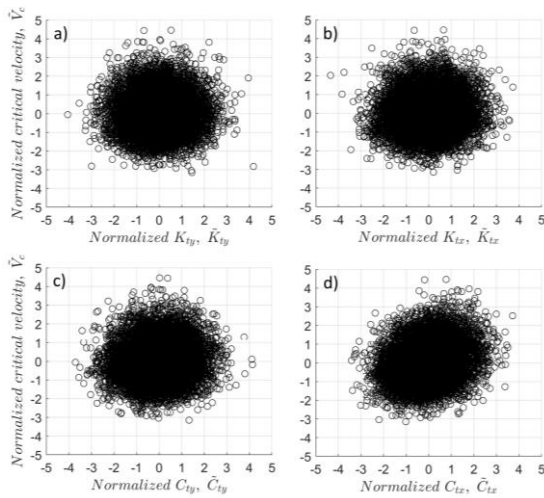


Figure 9: Scatter plot of $\tilde{y}$ versus $\tilde{V}_c$ using $\sigma_x = 10\%$

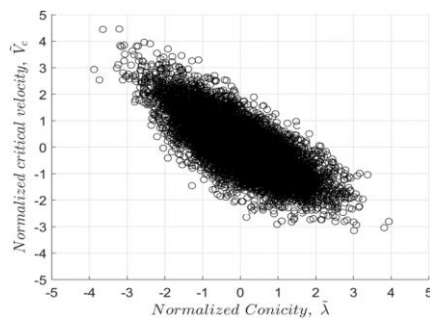


Figure 10: Scatter plots for $\tilde{\lambda}$ versus $\tilde{V}_c$ using $\sigma_x = 10\%$

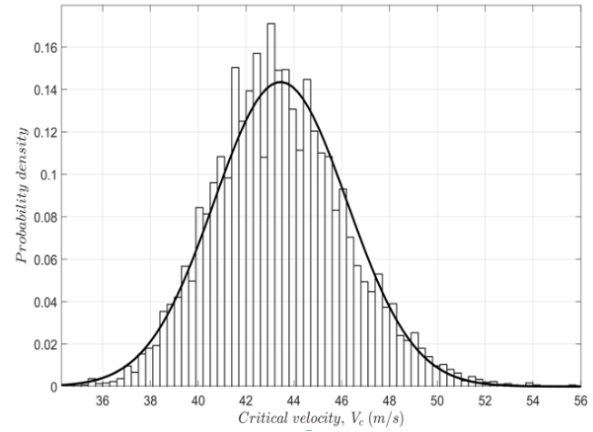


Figure 11: Output distribution from a Monte Carlo simulation of 10000 experiments, employing nine input parameters with individual $\sigma_x = 10\%$

Error! Reference source not found. 3 summarizes the results from the SRC sensitivity analysis method. The sign in front of the SRC indicates each element positive or negative influences. According to the table, primary suspension – longitudinal yaw stiffness (K_{wx}) appears to have the most substantial on increasing the critical speed. Bigoni *et al.* [6] indicated the same result, while Gao *et al.* [7] suggested the importance of the secondary lateral damper of a Chinese railway bogie. Global sensitivity analysis showed that the rear wheelset's stiffness is more significant than that of the front wheelset. Unfortunately, the primary suspension parameters are not considered variables in the work of Mehdi and Shaopu (1998) [4]. Of primary suspension parameters are K_{wx} that have more impact than K_{wy} .

Table 3: SRC of each suspension parameter and conicity

Parameter	K_{wy}	K_{wx}	K_{ty}	C_{ty}
SRC (β_x)	0.06311	0.60140	0.01177	0.06703
Parameter	λ	K_{tx}	C_{tx}	
SRC (β_x)	- 0.76400	0.03967	0.21501	

The variation of K_{tx} in the secondary suspension is insignificant to the system's dynamic behaviors. We found a strong influence of longitudinal dampers over the lateral damper in the secondary suspension system. The impact is also recognized by Mehdi and Shaopu [4]. The knowledge that the yaw dampers stabilize the vehicles is common to railway engineers. We enlist them as our significant parameters. However, the parameter is not considered essential [8] due to the selected probability distribution. The uncertainty is significant to both hybrid-global and global analysis. At different standard deviation values of 5%, 10%, and 20% on K_{wx} alone, the calculated SRC increases with uncertainty. The SRC values of K_{wx} are 0.3219, 0.60140, and 0.8213, respectively. More precise measurements can dramatically change the result. This concept allows maintenance engineers to mitigate the sensitive components' risk values by measuring their parameters more precisely and accurately.

In addition to the above analysis, we examine SRC of the equivalent conicity. Its highest value substantiates railway engineers' recognition of the limited value of the conicity when considering safety issues.

IV. CONCLUSION

This study presents the effect of suspension parameters and conicity on the critical velocity for a linearized model of a two-axle bogie. The numerical method in solving the derived eigenvalue problem indicates that the velocity locates at the bifurcation point, beyond which lateral displacement of the vehicle rigorously oscillates until limited by flange contact forces. The hybrid-global sensitivity analysis using SRC is implemented to screen for the essential parameters. Specifying the significance of the parameter will assist involved engineers in improving the hunting behaviors of the vehicle. Longitudinal yaw stiffness of

the primary suspension is critical to preventing excessive flange contact on a tangent track leading to flange wear and derailment. Other less important parameters are K_{wy} of primary suspension and K_{ty} , C_{ty} , K_{tx} , C_{tx} of secondary suspension. In addition to suspension parameters, we found the most decisive influence of conicity on the value of critical velocity. These findings guided us to design suspension systems and rail systems better when the right-most attention was paid only to the essential parameters that matter to safety and maintenance issues.

ACKNOWLEDGEMENT

This work (P1950662) is supported by Research Development Innovation Management for National Strategic and Network Division, National Science and Technology Development Agency, Thailand.

REFERENCES

- [1] *Railway applications - Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running Behaviour and stationary tests*, EN 14363:2016, Mar. 2016.
- [2] *Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behaviour - Safety - Track Fatigue - Ride Quality*, UIC 518 (E), Sep. 2009.
- [3] R. V. Dukkipati, S. Narayanaswamy, and M. O. M. Osman, "Comparative performance of unconventional railway trucks," *Int. J. Vehicle Des.*, vol. 19, no. 3, pp. 326–339, 1998.
- [4] A. M. Whitman, "On the lateral stability of a flexible truck," *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, vol. 105, no. 2, pp. 120–125, Jun. 1983, doi: 10.1115/1.3149642.
- [5] A. M. Whitman and J. E. Molyneux, "Limit cycle behavior of a flexible truck," *J. Appl. Mech.*, vol. 54, no. 4, pp. 930–934, Dec. 1987, doi: 10.1115/1.3173141.
- [6] A. H. Wickens, "The dynamic stability of railway vehicle wheelsets and bogies having profiled wheels," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 1, no. 3, pp. 319–341, 1965, doi: 10.1016/0020-7683(65)90037-5.



- [7] A. H. Wickens, "Static and dynamic instabilities of bogie railway vehicles with linkage steered wheelset," *Vehicle Syst. Dyn.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–16, 1996, doi: 10.1080/00423119608969299.
- [8] R. V. Dukkipati and S. N. Swamy, "Lateral stability and steady state curving performance of unconventional rail trucks," *Mech. Mach. Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 577–587, 2001, doi: 10.1016/S0094-114X(01)00006-4.
- [9] D. Horak and D. N. Wormley, "Nonlinear stability and tracking of rail passenger truck," *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, vol. 104, no. 3, pp. 256–263, 1982, doi: 10.1115/1.3139705.
- [10] A. Mehdi and Y. Shaopu, "Effect of system nonlinearities on locomotive bogie hunting stability," *Vehicle Syst. Dyn.*, vol. 29, no. 6, pp. 366–384, 1998, doi: 10.1080/00423119808969380.
- [11] M. No and J. K. Hedrick, "High speed stability for rail vehicles considering varying conicity and creep coefficients," *Vehicle Syst. Dyn.*, vol. 13, no. 6, pp. 299–313, 1984, doi: 10.1080/00423118408968780.
- [12] J. Piotrowski, "Stability of freight vehicles with the H-frame 2-axle cross-braced bogies. Simplified theory," *Vehicle Syst. Dyn.*, vol. 17, no. 1-2, pp. 105–125, 1988, doi: 10.1080/00423118808968897.
- [13] H. M. Sedighi and K. H. Shirazi, "Bifurcation analysis in hunting dynamical behavior in a railway bogie: Using novel exact equivalent functions for discontinuous nonlinearities," *Scientia Iranica*, vol. 19, no. 6, pp. 1493–1501, 2012, doi: 10.1016/j.scient.2012.10.028.
- [14] V. K. Garg, and R. V. Dukkipati, *Dynamics of Railway Vehicle Systems*. Ontario, Canada: Academic Press, 1984.
- [15] S.-Y. Lee and Y.-C. Cheng, "Hunting stability analysis of high-speed railway vehicle trucks on tangent tracks," *J. Sound Vib.*, vol. 282, no. 3-5, pp. 881–898, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.03.050>.
- [16] H. True, "Dynamics of a rolling wheelset," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 46, no. 7, pp. 438–444, 1993, doi: 10.1115/1.3120372.
- [17] N. K. Cooperrider, "The Hunting Behavior of Conventional Railway Trucks," *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 94, no. 2, pp. 752–762, 1972, doi: 10.1115/1.3428240.
- [18] J. S. Liu, *Monte Carlo strategies in scientific computing*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2008.
- [19] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2001.
- [20] *Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*, EN 13674-1:2011+A1:2017, May 2017.
- [21] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto, *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. West Sussex, U.K.: John Wiley & Sons, 2004.
- [22] D. Bigoni, H. True, and A. P. Engsig-Karup, "Sensitivity analysis of the critical speed in railway vehicle dynamics," *Vehicle Syst. Dyn.*, vol. 52, no. sup1, pp. 272–286, 2014, doi: 10.1080/00423114.2014.898776.
- [23] X.-j. Gao, H. True, and Y.-h. Li, "Sensitivity analysis of the critical speed in a railway bogie system with uncertain parameters," *Vehicle Syst. Dyn.*, vol. 59, no. 2, pp. 224–244, 2021, doi: 10.1080/00423114.2019.1674.

การเลือกขนาดของโมดูลพีวี/ทีและถังเก็บน้ำเย็นสำหรับเครื่องผลิตน้ำร้อน ปั๊มความร้อนเสริมพีวี/ที : กรณีศึกษาประเทศไทย

กรกช อุตมะ¹ ณัฐ วรยศ^{2*} ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์³ ธรรณิศจ์ ดิทยาพา⁴

¹สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

¹บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

^{2*,3,4}ห้องปฏิบัติการระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : nat.v@cmu.ac.th

รับต้นฉบับ : 25 ตุลาคม 2565; รับบทความฉบับแก้ไข : 27 ธันวาคม 2565; ตอบรับบทความ : 6 กุมภาพันธ์ 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อนแบบอัดไอทำงานร่วมกับโมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อน (พีวี/ที) โดยปั๊มความร้อนมีความสามารถในการทำความร้อนสูงสุดที่ 3,000 วัตต์ ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากโมดูลพีวี/ที โดยแต่ละโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 200 วัตต์ และมีพื้นที่รับรังสี 1.326 ม² การศึกษาจะพิจารณาขนาดของโมดูลพีวี/ที และขนาดของถังน้ำเย็นที่เหมาะสมในการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350, 500 และ 700 ลิตร ให้มีอุณหภูมิวันละวัน 60 °C และพิจารณาปริมาณพลังงานความร้อน และไฟฟ้าที่ผลิตได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมดูล และขนาดถังน้ำเย็น รวมถึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า ภายใต้สภาวะอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ผลการศึกษาพบว่าการผลิตน้ำร้อนปริมาณดังกล่าว ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายได้มากกว่าร้อยละ 90, 90 และ 70 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 8, 8 และ 10 โมดูล ตามลำดับ โดยมีขนาดถังน้ำเย็นที่ 300, 300 และ 50 ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.70, 3.95 และ 4.83 ปี ตามลำดับ

คำสำคัญ : การประหยัดพลังงาน ปั๊มความร้อน โมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อน การผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์

Sizing of PV/T Module and Its Cool Water Tank for PV/T-boosted Heat Pump Water Heating: A Case Study of Thailand

Korakote Utama¹ Nat Vorayos^{2*} Tanongkiat Kiatsiriroat³ Thoranis Deethayat⁴

¹Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

¹Graduate School, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

²Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: nat.v@cmu.ac.th

Received: 25 October 2022; Revised: 27 December 2022; Accepted: 6 February 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

The research aims to investigate the potential for hot water production of vapor compression heat pump together with photovoltaic/thermal (PV/T). The heat pump with a maximum heating capacity of 3,000 W extracted heat from each PV/T module of 1.326 m² in parallel connection that generated a maximum heating capacity of 200 Wp. This study was considered the suitable sizes of PV/T module and cool water tank for hot water production volumes of 350, 500, and 700 liters at 60 °C every day. The amount of heat and electrical energy generated with various PV/T modules, and cool water sizing including the saving of electrical energy from transmission line compare with that from electrical coil for hot water production were investigated under Chiang Mai, Khon Kaen, Bangkok, and Songkhla climates. The result showed that the presented unit could save electrical energy over 90, 90, 70% of the transmission line, respectively. In term of economic analysis, the suitable numbers of PV/T modules with 300, 300, 50 L of cool water tank, respectively, were found and the payback periods were 5.70, 3.95, 4.83 years, respectively.

Keywords: Energy saving, Heat pump, Photovoltaic/thermal module, Solar hot water

1) บทนำ

โมดูลโฟโตโวลเทอิก (พีวี) จะเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้าโดยตรง สมรรถนะในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิโมดูลสูงขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม [1] จึงมีการหาวิธีการในการระบายความร้อนจากโมดูล โดยใช้อากาศหรือน้ำในการระบายความร้อน Lungkadee และ Asanakham [2] ได้ติดตั้งครีบบที่ด้านหลังของโมดูล และมีการเป่าอากาศผ่านพื้นที่ผิวดังกล่าวช่วยในการลดอุณหภูมิของโมดูล Wilson [3] ได้ทำการฝังท่อด้านหลังโมดูล โดยมีน้ำช่วยในการระบายความร้อน ทั้งนี้อากาศหรือน้ำร้อนที่ได้ ถ้านำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทางความร้อนจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น เมื่อเทียบกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ในลักษณะการทำงานเช่นนี้ อุปกรณ์จะเรียกว่าโมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อน (พีวี/ที) ในกรณีที่ทำการผลิตไฟฟ้า และนำร้อนไปใช้ประโยชน์ จะมีการเชื่อมต่อโมดูลพีวี/ทีกับถังเก็บน้ำร้อน ในช่วงแรกของการทำงานเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนยังมีค่าต่ำ น้ำจะช่วยระบายความร้อนจากโมดูลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามีค่าสูง แต่เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนขึ้นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลง แนวทางหนึ่งในการลดอุณหภูมิของโมดูลพีวี/ที และสามารถผลิตน้ำร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ คือ การใช้ปั๊มความร้อนแบบอัดไอดึงความร้อนจากโมดูลพีวี/ที และความร้อนดังกล่าวจะถูกเพิ่มคุณภาพความร้อนไปผลิตน้ำร้อนที่คอนเดนเซอร์ของระบบอัดไอ เช่นเดียวกับระบบปั๊มความร้อนทำงานเสริมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน [4] อุณหภูมิของโมดูลจะลดลงทำให้ผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น ในขณะเดียวกันจะได้น้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลพีวี/ที จะถูกนำมาใช้ในการเดินเครื่องปั๊มความร้อน Obalanlege และคณะ [5] ได้วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิของน้ำที่ไหลในโมดูลพีวี/ที ความเข้มรังสีอาทิตย์ ขนาดของถังเก็บน้ำร้อน และอัตราการไหลของน้ำในโมดูลที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พบว่าเมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิในโมดูลพีวี/ทีเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของโมดูลพีวี/ทีลดลง และขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) ของระบบปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาตรถังน้ำร้อนให้มีค่าสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิโมดูลพีวี/ทีลดลงด้วย ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมของโมดูลพีวี/ที นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลของน้ำในโมดูลพีวี/

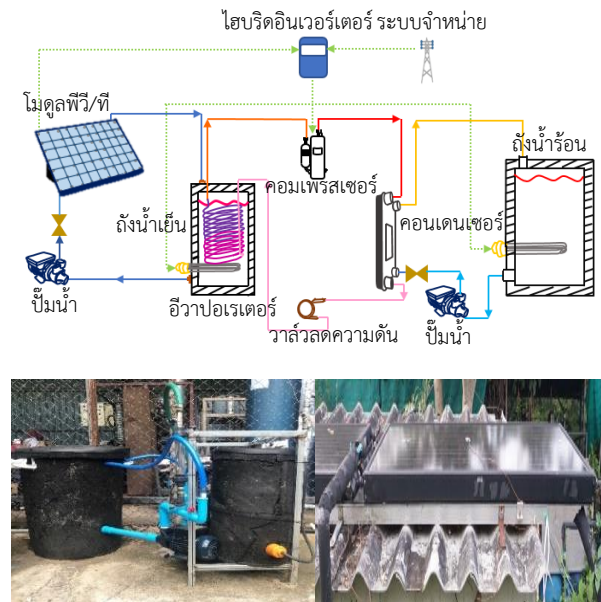
ที่จากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพรวมของโมดูลพีวี/ทีสูงขึ้นอีก Vaishak และ Bhale [6] ได้แนะนำให้ใช้ R134a และ R410A เป็นสารทำงานในปั๊มความร้อน เนื่องจากมีเสถียรภาพทางเคมี และค่าความร้อนแฝงสูง รวมถึงความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม Kosan และคณะ [7] ได้วิเคราะห์สมรรถนะของโมดูลพีวี/ทีทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้งใบมินต์ โมดูลพีวี/ทีจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน และมีโมดูลพีวีจ่ายไฟฟ้าให้กับพัดลม และหลอดไฟเพื่ออบแห้งใบมินต์ ผลการวิจัยพบว่ามีประสิทธิภาพด้านไฟฟ้าต่ำสุด 11.9% และสูงสุด 14.02% ประสิทธิภาพความร้อนมีค่าต่ำสุด 38.51% และสูงสุด 70.56% ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ โมดูลพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับการอบแห้งนี้มีค่า COP เฉลี่ยเท่ากับ 4.18 และมีระยะเวลาคืนทุน 2.32 ปี Evangelos และคณะ [8] ได้ทำการประเมินระบบที่ประกอบด้วยโมดูลพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อน พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายตลอดทั้งปีได้ถึง 67% และราคาค่าไฟฟ้ามีอิทธิพลอย่างมากต่อความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งในประเทศที่มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสูง จะยิ่งเหมาะกับการนำโมดูลพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อนมาใช้ประโยชน์ Bai และคณะ [9] ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโมดูลพีวี/ทีทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนใช้ในศูนย์กีฬาขนาดใหญ่ โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามที่ ฮองกง ปารีส ลียง และนิช พบว่านิชสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด 75.63% เมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนแบบขดลวดไฟฟ้า เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูง และระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดที่ 8.40 ปี

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการทำงานร่วมกันของโมดูลพีวี/ที และปั๊มความร้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลพีวี/ที และเพิ่มสมรรถนะในการผลิตความร้อนของปั๊มความร้อน อย่างไรก็ตามการเลือกขนาดถังเก็บน้ำเย็น การควบคุมอุณหภูมิของโมดูลพีวี/ที และจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เหมาะสม สอดคล้องกับขนาดของปั๊มความร้อนเพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้า และภาระความร้อนได้ตามที่ต้องการ ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง โดยเฉพาะในประเทศไทยจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

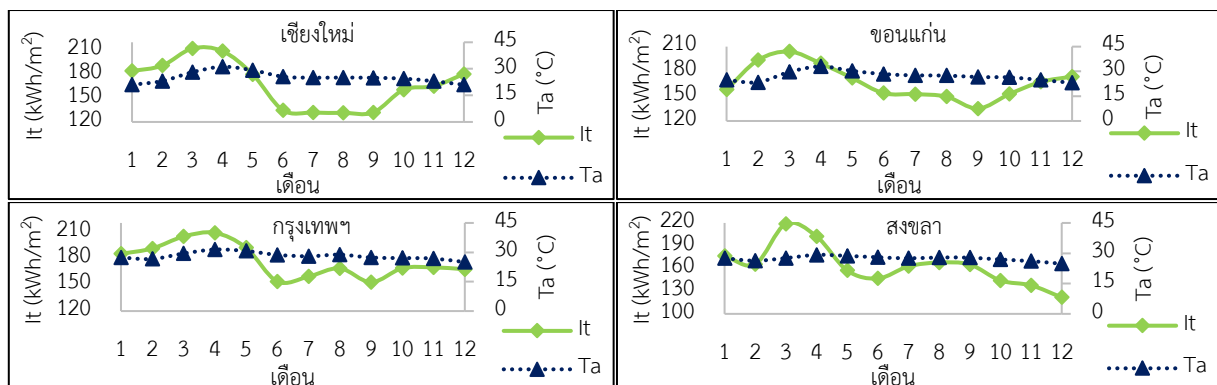
สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ปั๊มความร้อนขนาดความสามารถในการทำความร้อนสูงสุด 3,000 วัตต์ ที่ใช้สารทำงาน R134a เป็นสารทำงาน เพื่อผลิตน้ำร้อนในเวลากลางวัน น้ำร้อนที่ได้จะถูก

นำไปใช้ทั้งหมดในเวลากลางคืน โดยโมดูลพีวี/ทีเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับคอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน และลดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ถังฮีวโปเรเตอร์ไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C ตลอดการทำงานในตอนกลางวัน เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของโมดูลพีวี/ทีต่ำเกินไปจนเกิดการควบแน่นของไอน้ำ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งยังทำให้ค่า COP ของปั๊มความร้อนมีค่าต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิแตกต่างระหว่างคอนเดนเซอร์ และฮีวโปเรเตอร์ที่สูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิที่ถังคอนเดนเซอร์ จะถูกควบคุมไม่ให้ต่ำกว่า 60 °C เมื่อสิ้นสุดการทำงานในตอนเย็นของแต่ละวัน ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้จะมีกำลังไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายร่วมจ่ายให้กับระบบทั้งหมดในกรณีที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ไม่เพียงพอ ข้อมูลรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศโดยรอบจะใช้ข้อมูลของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ในแต่ละภูมิภาค ซึ่งค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมแต่ละจังหวัดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้า โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สูงจะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ขณะเดียวกันอุณหภูมิโมดูลที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลง ทำให้มีผลต่อการเลือกขนาดของโมดูลพีวี/ทีที่เหมาะสม ในการศึกษาจะพิจารณาจำนวนโมดูลพีวี/

ทีที่มีความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ที่สภาวะมาตรฐาน 200 วัตต์ และโมดูลพีวี/ทีจะต่อขนานกันทางความร้อน และพิจารณาขนาดของถังน้ำเย็นที่ฮีวโปเรเตอร์ของปั๊มความร้อนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350, 500, 700 ลิตร ในแต่ละวัน จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 1 : ระบบผลิตน้ำร้อนพีวี/ทีร่วมกับปั๊มความร้อน



รูปที่ 2 : ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ (It) และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ta) ในแต่ละจังหวัด [10]

2) ระบบทำน้ำร้อนแบบปั๊มความร้อนเสริมพีวี/ที

จากรูปที่ 1 ชุดโมดูลพีวี/ที ขนาดความสามารถสูงสุดในการผลิตไฟฟ้า 200 วัตต์ กำหนดให้หันไปทางทิศใต้ โดยมีมุมเอียงเท่ากับมุมละติจูดของจังหวัดที่ติดตั้ง โมดูลพีวี/ทีจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบปั๊มความร้อนขนาดความสามารถในการทำความร้อนสูงสุด 3 กิโลวัตต์ ซึ่งใช้สารทำความเย็น R134a โดยมีถังน้ำเย็นที่ฮีวโปเรเตอร์ของปั๊มความร้อน โดยมีลดความร้อน 2 กิโลวัตต์

ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C ขณะที่ปั๊มความร้อนทำงาน โดยมีอัตราการไหลของน้ำในโมดูลพีวี/ที และถังน้ำเย็นฮีวโปเรเตอร์ 6 ลิตรต่อวินาที ที่คอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อนจะมีการปลดปล่อยความร้อน โดยมีอัตราการไหลของน้ำที่คอนเดนเซอร์ 3 ลิตรต่อวินาที มารับความร้อนที่คอนเดนเซอร์ไปจ่ายที่ถังน้ำร้อน โดยจะมีการให้ความร้อนเสริมด้วยลวดไฟฟ้าในกรณีที่อุณหภูมิสูงสุดของน้ำไม่ถึง 60 °C เมื่อสิ้นสุดการทำงานในตอนเย็นของแต่ละวัน

ละวัน ทั้งนี้จะไม่มีการนำน้ำร้อนไปใช้งานในตอนกลางวัน และ น้ำร้อนที่ได้จะถูกนำไปใช้หมดในเวลากลางคืน

2.1) โมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน

โมดูลพีวี/ที ทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนในรูปน้ำร้อน และพลังงานไฟฟ้า ในกรณีการผลิตน้ำร้อน โมดูลพีวี/ที ทำหน้าที่เช่นเดียวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งอัตรา ความร้อน [11] จะคำนวณจาก

$$\dot{Q}_{PV/T} = F_R(\alpha)I_tA_c - F_RU_LA_c(T_{fi} - T_a) \quad (1)$$

กำลังไฟฟ้าสูงสุด [11] จะคำนวณจาก

$$P_m = P_{m,sc} \cdot (1 - \gamma(T_{PV} - 25)) \cdot \left(\frac{I_T}{1000}\right) \quad (2)$$

อุณหภูมิโมดูล สามารถคำนวณจาก

$$T_{PV} = T_a + (NOCT - 20) \left(\frac{I_T}{800}\right) \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } NOCT = 800F_R \cdot \frac{T_{fi} - T_a}{I_T} + \frac{(\alpha)}{U_L} \cdot (1 - F_R)800 + 20 \quad (4)$$

โมดูลพีวี/ทีที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเช่นเดียวกับ S. Vat และคณะ [11] โดยข้อมูลอุปกรณ์วัด และข้อมูลทางเทคนิคแสดง ในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 : ข้อมูลอุปกรณ์วัดของโมดูลพีวี/ที

Sensor	Characteristics and Measured Range	Accuracy
K-type thermocouple	Measures PV module temperature, inlet/outlet temperature, and ambient temperature Range: -270 to 1260 °C	±0.5 °C
Pyranometer MS-602 with data logger Hukseflux LI19	Measures solar irradiation. Range: 0–2000 W/m ²	±1.5%
Range: 0–2000 W/m ²	0–60 V 0.01–12 A	±1% ±1%
Rotameter	Measures water flow rate Range: 1- 10 LPM	±4%

ตารางที่ 2 : ข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลพีวี/ที [11]

Cell type	Mono-crystalline
Dimensions	828 mm x 1601 mm x 90 mm
Aperture area	1.326m ²
Maximum power, P _m	200 Wp
Electrical efficiency of module, η_{sc}	15.08%
Temperature coefficients of P _m , γ	0.45%/°C
$\dot{m}_{PV/T}$	6 LPM
F_RU_L	10.16
$F_R(\tau\alpha)$	0.46

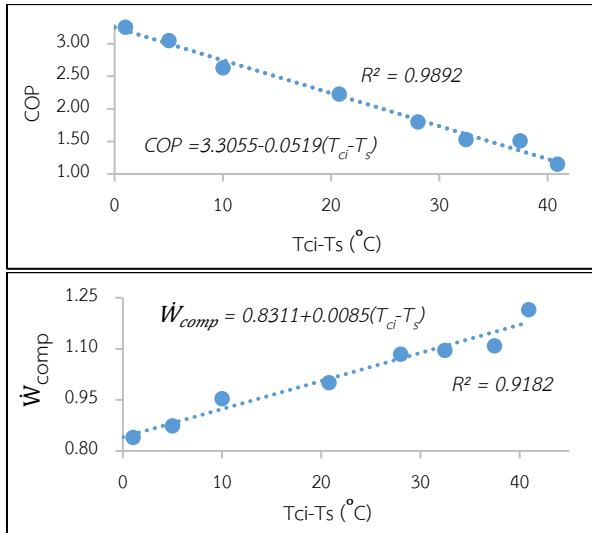
2.2) ปั๊มความร้อน พร้อมถังน้ำร้อนและถังน้ำเย็น

ปั๊มความร้อนที่ใช้ในการศึกษา จะเป็นปั๊มความร้อนขนาดเล็ก ของ Utama [12] ซึ่งได้มีการทดสอบในการนำมาผลิตน้ำร้อน โดยข้อมูลอุปกรณ์วัดแสดงในตารางที่ 3 และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้คอมเพรสเซอร์ของปั๊มความร้อน, $\dot{W}_{comp}$ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนในถังน้ำร้อน และอุณหภูมิน้ำเย็นในถังน้ำเย็นที่คอนเดนเซอร์ และอีวาพอเรเตอร์ของปั๊มความร้อน, $(T_{ci} - T_s)$ ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{W}_{comp}} \quad (5)$$

ตารางที่ 3 : ข้อมูลอุปกรณ์วัดของปั๊มความร้อน

Sensor	Characteristics and measured range	Accuracy
K-type thermocouple	Measures water temperature and ambient temperature Range: -270 to 1260 °C	±0.5 °C
Rotameter	Measures water flow rate Range: 1- 10 LPM	±4%
Power meter with clamp sensor	Measures compressor power consumption Range: 10-600 ACV, 0.2-1200 ACA	±1%



รูปที่ 3 : COP และ W_{comp} ที่แปรผันตามอุณหภูมิแตกต่างของน้ำร้อนในถังน้ำร้อนและน้ำเย็นในถังน้ำเย็น

สำหรับปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานนี้ จะมีกำลังความสามารถในการทำความร้อนสูงสุดที่ 3 กิโลวัตต์ โดย ค่า COP และกำลังไฟฟ้าที่คอมเพรสเซอร์ (สมมุติมีค่าเท่ากับกำลังงานที่คอมเพรสเซอร์) จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแตกต่างของน้ำในถังน้ำเย็น และถังน้ำร้อน ดังรูปที่ 3 โดย

$$COP = 3.3055 - 0.0519(T_{ci} - T_s) \quad (6)$$

$$W_{comp} = 0.8311 + 0.0085(T_{ci} - T_s) \quad (7)$$

อุณหภูมิของน้ำร้อนในถังน้ำร้อน และอุณหภูมิน้ำเย็นในถังน้ำเย็น เมื่อเวลาผ่านไป Δt , $T_{ci}^{t+\Delta t}$ และ $T_s^{t+\Delta t}$ ตามลำดับ ในกรณีที่สมมุติว่าถังหมั่นวนอย่างดี สามารถคำนวณจาก

$$\begin{aligned} T_{ci}^{t+\Delta t} &= \left(\frac{\dot{Q}_{cond}}{M_w C_p} \right) \cdot \Delta t + T_{ci}^t \\ &= \left(\frac{COP}{M_w C_p} \right) W_{comp} \cdot \Delta t + T_{ci}^t \\ &= \left(\frac{3.3055 - 0.0519(T_{ci} - T_s)}{M_w C_p} \right) [0.8311 + 0.0085(T_{ci} - T_s)] \Delta t + T_{ci}^t \quad (8) \end{aligned}$$

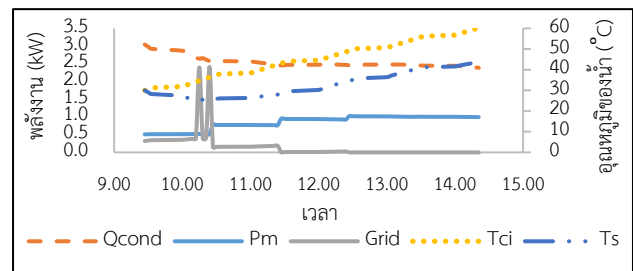
$$T_s^{t+\Delta t} = \left(\frac{\dot{Q}_{PV/T} - \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{aux,c}}{M_s C_p} \right) \cdot \Delta t + T_s^t \quad (9)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อกำหนดอัตราความร้อนที่คอนเดนเซอร์ อุณหภูมิในถังน้ำร้อน และถังน้ำเย็น ในสภาวะเริ่มต้น จะสามารถคำนวณอุณหภูมิในถังน้ำร้อน และในถังน้ำเย็นเมื่อเวลาผ่านไป Δt ได้

3) ผลการวิจัย

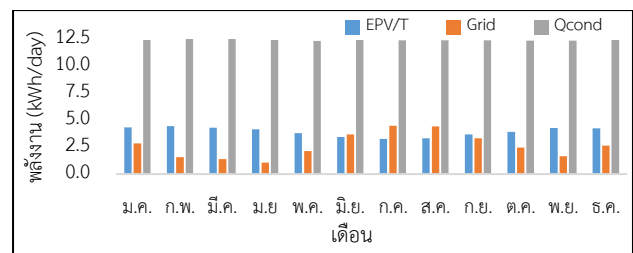
รูปที่ 4 แสดงข้อมูลรายชั่วโมงในเดือนเมษายนของการผลิตน้ำร้อน 350 ลิตร โดยใช้โมดูลพีวี/ทีจำนวน 6 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 100 ลิตร ที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าในช่วงเช้าความเข้ม

รังสีอาทิตย์มีค่าต่ำส่งผลให้อุณหภูมิในถังน้ำเย็น (T_s) ต่ำกว่า 25 °C ดังนั้นจึงมีการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย (Grid) จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหลอดความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังน้ำเย็นไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C และหลังจากราว 11:30 น.รังสีอาทิตย์อยู่ในระดับที่สูงพอ จะไม่มีการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย และที่เวลาประมาณ 14:45 น. อุณหภูมิในถังน้ำร้อน (T_{ci}) มีอุณหภูมิ 60 °C ระบบจึงหยุดทำงาน อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดวันในตอนเย็น จะมีการให้ความร้อนด้วยหลอดไฟฟ้าในถังน้ำร้อน ในกรณีที่อุณหภูมิในถังไม่ถึง 60 °C

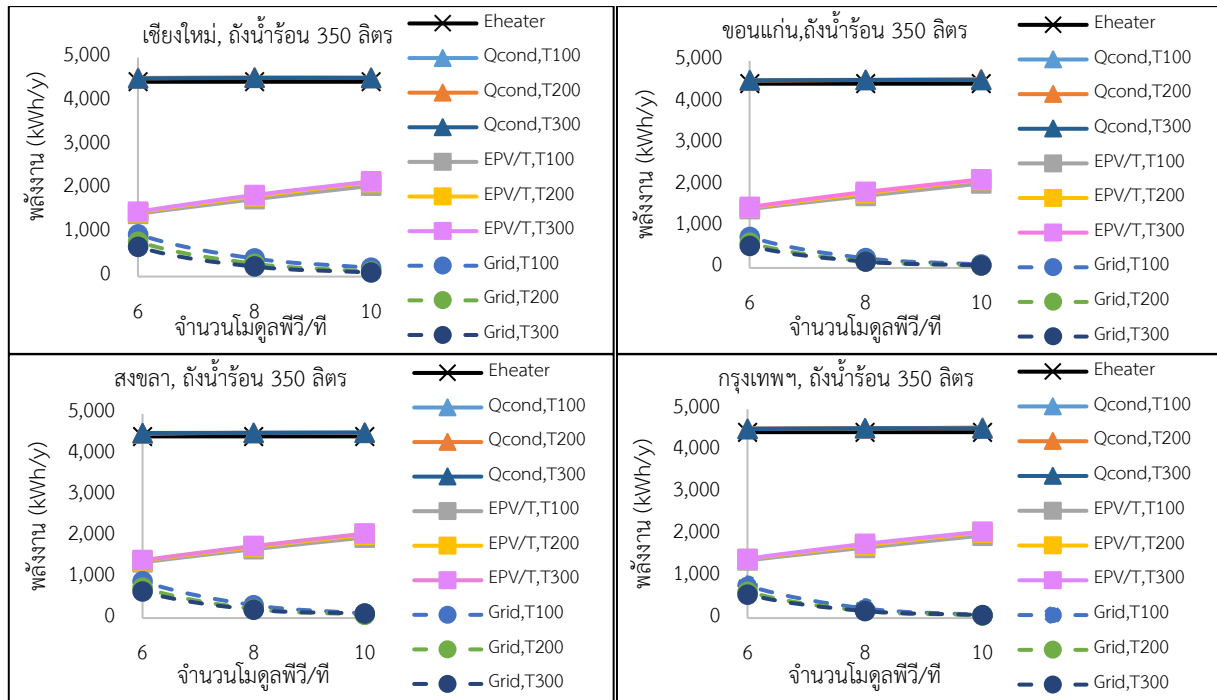


รูปที่ 4 : ข้อมูลรายชั่วโมงในเดือนเมษายนที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้โมดูลพีวี/ที 6 โมดูล ถังน้ำเย็น 100 ลิตร และถังน้ำร้อน 350 ลิตร

รูปที่ 5 แสดงข้อมูลรายเดือนของการผลิตน้ำร้อน 350 ลิตร โดยใช้โมดูลพีวี/ทีจำนวน 6 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 100 ลิตร ที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าในช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาว (ตุลาคม-พฤษภาคม) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลพีวี/ที (EPV/T) จะมากกว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย (Grid) แต่ในช่วงฤดูฝน (เดือนมิถุนายน-สิงหาคม) ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ และยังพบว่าในแต่ละเดือน ค่าพลังงานความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ (Qcond) ค่อนข้างคงที่เนื่องจากก่อนสิ้นสุดวันในตอนเย็นระบบสามารถผลิตน้ำในถังน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 60 °C



รูปที่ 5 : ข้อมูลรายเดือน ที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้โมดูลพีวี/ที 6 โมดูล ถังน้ำเย็น 100 ลิตร และถังน้ำร้อน 350 ลิตร

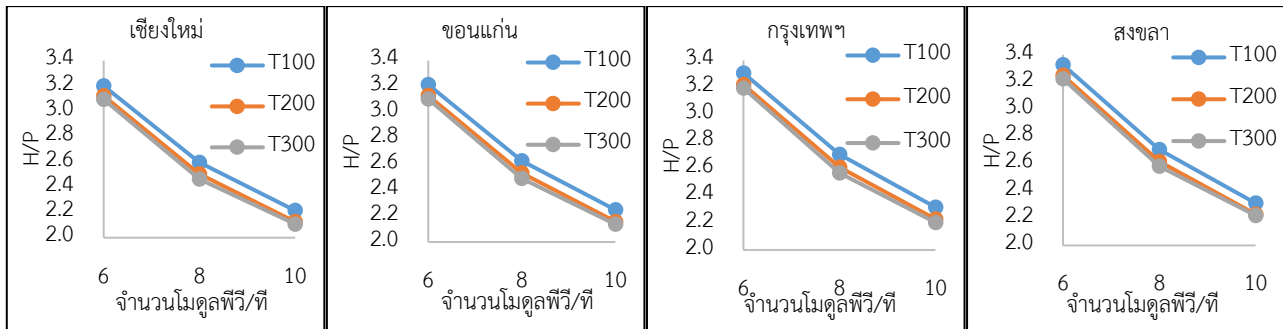


รูปที่ 6 : ข้อมูลแสดงค่าพลังงานต่าง ๆ ใน 1 ปี ของการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350 ลิตรต่อวัน แต่ละจังหวัด

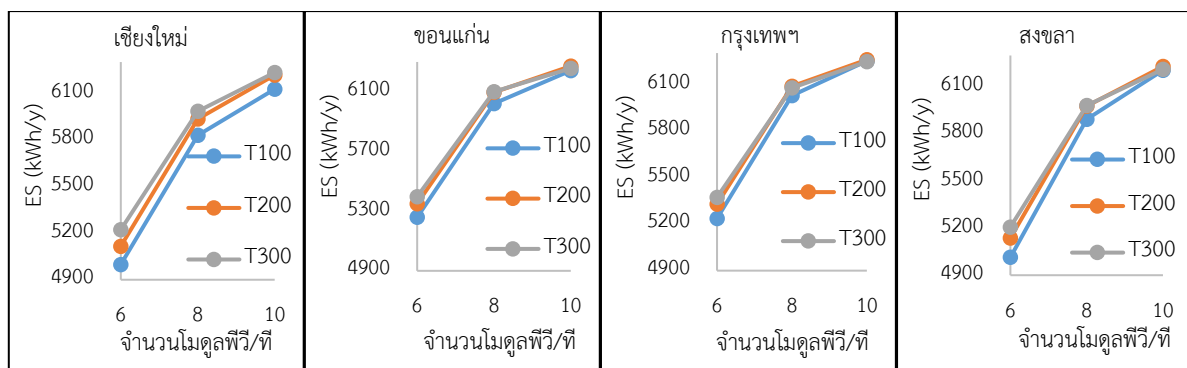
รูปที่ 6 แสดงผลการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350 ลิตรต่อวัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมดูล 6-10 โมดูล และถังน้ำเย็นที่อวปอเรเตอร์ 100-300 ลิตร (T100-T300) ใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่โมดูลพีวี/ทีผลิตได้ (EPV/T) มีค่าเพิ่มขึ้น และพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากระบบจำหน่าย (Grid) จะลดลงตามจำนวนโมดูลที่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนโมดูลมากกว่า 8 สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายมากกว่าร้อยละ 90 เทียบกับพลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า (Eheater) และเมื่อขนาดถังน้ำเย็นเพิ่มขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลจะสูงขึ้น และความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายจะลดลง เนื่องจากขนาดของถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น จะสามารถรักษาอุณหภูมิในถังน้ำเย็นไม่ให้ต่ำกว่า 25 °C ได้ดีกว่า จึงลดการให้ความร้อนเสริมที่ถังดังกล่าว สำหรับพลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อน (Qcond) ค่อนข้างคงที่ ผลที่เกิดขึ้นในแต่ละจังหวัด มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเชียงใหม่ และขอนแก่น สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบที่สงขลา

เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สูงกว่า (ผลรวมของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่โมดูลพีวี/ทีได้รับใน 1 ปี 2011.04, 2001.57 kWh/m² ตามลำดับ) และยังพบว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่ากรุงเทพฯ แม้กรุงเทพฯ จะมีความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สูงที่สุด (ผลรวมของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่โมดูลพีวี/ทีได้รับใน 1 ปี 2120.9 kWh/m²) เนื่องจากกรุงเทพฯ มีอุณหภูมิอากาศสูง ทำให้อุณหภูมิโมดูลมีค่าสูง ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีค่าต่ำลง

รูปที่ 7 แสดงอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูล (H/P) ของการผลิตน้ำร้อน 350 ลิตร โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ซึ่งมีค่าลดลงตามจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความร้อนที่ปั๊มความร้อนผลิตได้ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันผลที่เกิดขึ้นใน 4 จังหวัด มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และเมื่อขนาดถังน้ำเย็นเพิ่มขึ้นความสามารถในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงไปอีกเล็กน้อย



รูปที่ 7 : อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (H/P) ของขนาดถังน้ำร้อน 350 ลิตร ในแต่ละจังหวัด



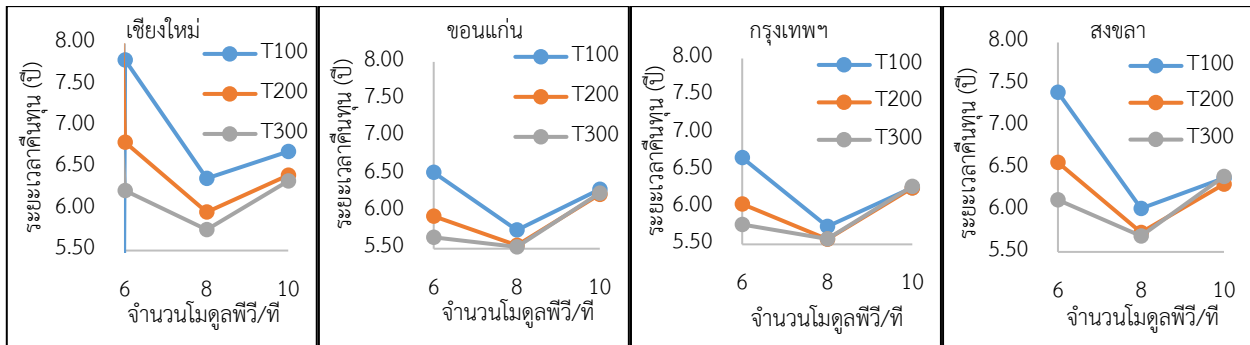
รูปที่ 8 : พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ES) ของถังน้ำร้อน 350 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

รูปที่ 8 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ใน 1 ปี (ES) เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า และใช้พลังงานจากระบบจำหน่าย โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา โดยปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ในแต่ละวัน 350 ลิตร จะเห็นได้ว่าพลังงานจะประหยัดได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนโมดูลพีวี/ที และขนาดถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น แต่มีผลน้อยลงเมื่อจำนวนโมดูลเพิ่มขึ้น สำหรับจังหวัดเชียงใหม่ และสงขลา การประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายมีค่าใกล้เคียงกัน และสำหรับจังหวัดขอนแก่น และกรุงเทพฯ มีค่าประหยัดพลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์หาระยะเวลาคืนทุน โดยใช้ข้อมูลตามตารางที่ 4

โดยที่กำหนดให้พีวี/ทีมีอายุการใช้งาน 20 ปี และปั๊มความร้อนมีอายุการใช้งาน 10 ปี มูลค่าซากกำหนดให้เป็น 10% ของเงินลงทุนทั้งหมด นอกจากนั้นค่าดำเนินการและซ่อมบำรุงกำหนดให้เป็น 15% และ 5% ของเงินลงทุนตามลำดับ พบว่าการผลิตน้ำร้อนขนาดถัง 350 ลิตร ที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ สงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร มีระยะเวลาคืนสั้นที่สุด โดยทั้ง 4 จังหวัด มีระยะเวลาคืนทุน 5.75, 5.52, 5.57 และ 5.69 ปี ตามลำดับ ดังรูปที่ 9

ตารางที่ 4 : ข้อมูลต้นทุนและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ

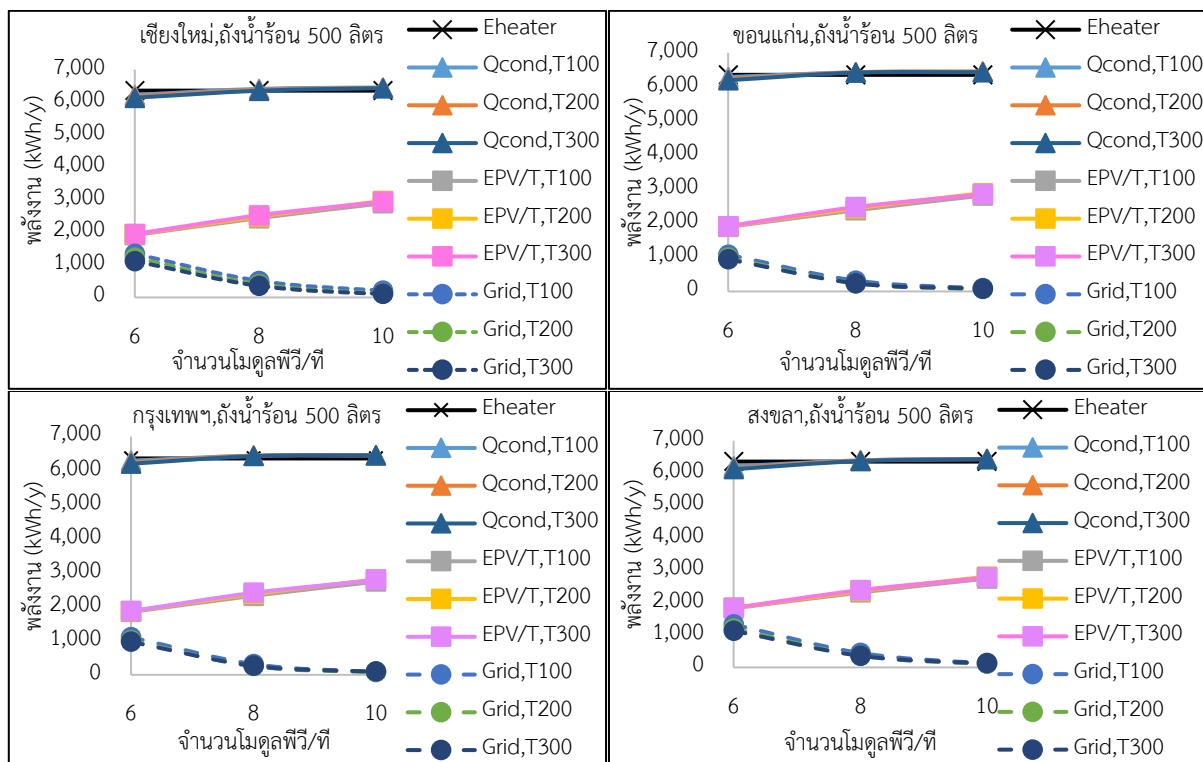
รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท)
พีวี/ที	10,595
ปั๊มความร้อน	26,740
PV/T DC-AC MPPT inverter	20,000
อุปกรณ์เสริมต่อ 1 โมดูลพีวี/ที	1,000
ปั๊มน้ำ	2,000
ขนาดถังน้ำ 50 ลิตร	300
ขนาดถังน้ำ 100 ลิตร	600
ขนาดถังน้ำ 200 ลิตร	1,200
ขนาดถังน้ำ 300 ลิตร	1,300
ขนาดถังน้ำ 350 ลิตร	1,400
ขนาดถังน้ำ 400 ลิตร	1,600
ขนาดถังน้ำ 500 ลิตร	2,000
ขนาดถังน้ำ 700 ลิตร	2,400



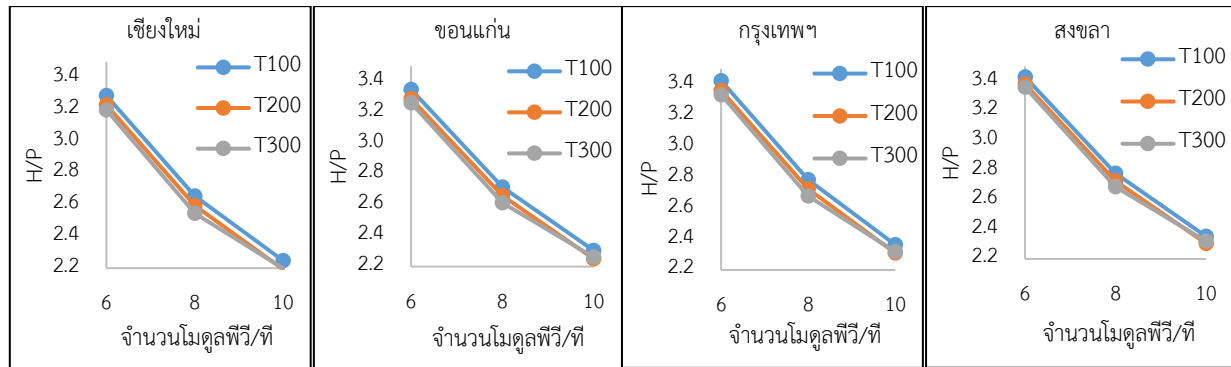
รูปที่ 9 : ระยะเวลาคืนทุนของขนาดถังน้ำร้อน 350 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำร้อนที่ต้องการจาก 350 ลิตร เป็น 500 ลิตร โดยมีผลแสดงในรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าที่จำนวน 6 โมดูล พลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์ต่ำกว่าพลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้า ดังนั้นจำนวนโมดูลพีวี/ที จะต้องมีความตั้งแต่ 8 โมดูลขึ้นไป ปริมาณพลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อน จึงจะเพียงพอที่จะผลิตน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิสุดท้ายได้ถึง 60 °C จากรูปจะเห็นว่าพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะมากกว่ากรณีการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 350 ลิตร เนื่องจากในกรณีผลิตน้ำร้อนขนาด 350 ลิตร ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ตามที่ต้องการได้รวดเร็วกว่ากรณีปริมาณ

500 ลิตร ทำให้ระบบหยุดการทำงานก่อน ลักษณะของพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อจำนวนโมดูลมากกว่า 8 ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายในการดำเนินการมากกว่าร้อยละ 90 เช่นเดียวกันกับอัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ มีค่าลดลงตามจำนวนโมดูล ดังแสดงผลในรูปที่ 11 การเพิ่มขึ้นของขนาดถังน้ำเย็นมีผลน้อยลงมากต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในถังเย็นแต่ละขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ลักษณะเช่นนี้จะคล้ายคลึงกันทั้ง 4 จังหวัด



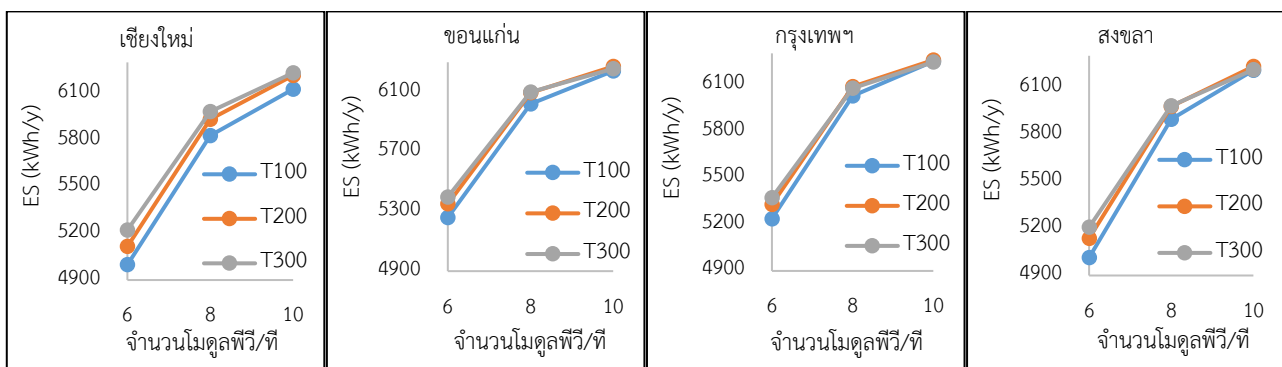
รูปที่ 10 : ข้อมูลแสดงค่าพลังงานต่างๆใน 1 ปี ของการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 500 ลิตรต่อวัน แต่ละจังหวัด



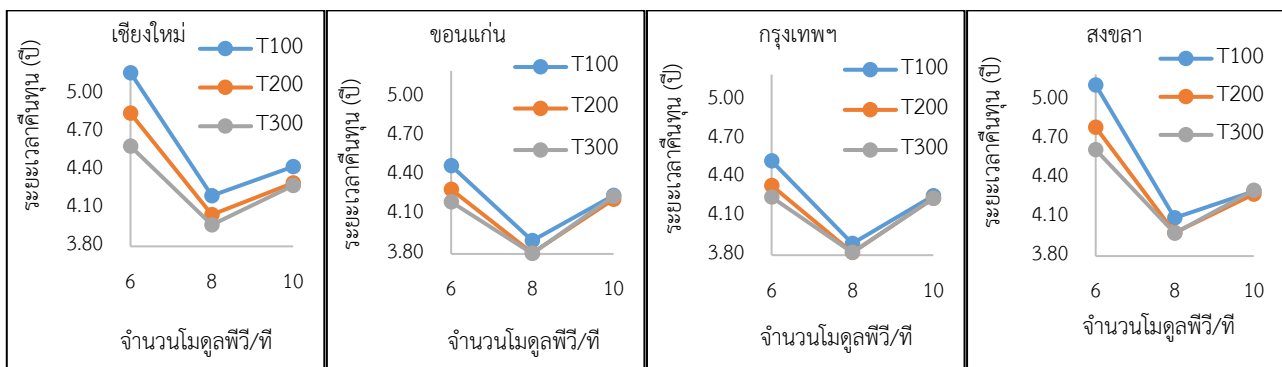
รูปที่ 11 : อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (H/P) ของขนาดถังน้ำร้อน 500 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

รูปที่ 12 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ใน 1 ปี (ES) เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้หลอดไฟฟ้าของแต่ละจังหวัด และปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ในแต่ละวัน 500 ลิตร จะเห็นได้ว่าพลังงานไฟฟ้าจะประหยัดได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนโมดูลพีวี/ทีที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อจำนวนโมดูลมากกว่า 8 พลังงานที่ประหยัดได้เพิ่มขึ้นไม่มากนัก การเพิ่มขึ้นของขนาดถังน้ำเย็นช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น และขนาดถังน้ำเย็น 200 ลิตร ขึ้นไป ส่งผลน้อยมากต่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้า โดยที่จังหวัด

เชียงใหม่ และสงขลา มีค่าประหยัดพลังงานใกล้เคียงกัน และพลังงานที่ประหยัดได้ต่ำที่สุด จังหวัดขอนแก่น และกรุงเทพฯ มีค่าประหยัดพลังงานใกล้เคียงกัน และพลังงานที่ประหยัดได้สูงที่สุด เมื่อทำการวิเคราะห์หาระยะเวลาคืนทุน พบว่าการผลิตน้ำร้อนขนาดถังน้ำร้อน 500 ลิตร พบว่าที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ สงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด โดยทั้ง 4 จังหวัด มีระยะเวลาคืนทุน 3.97, 3.80, 3.82, 3.98 ปี ตามลำดับ ดังรูปที่ 13



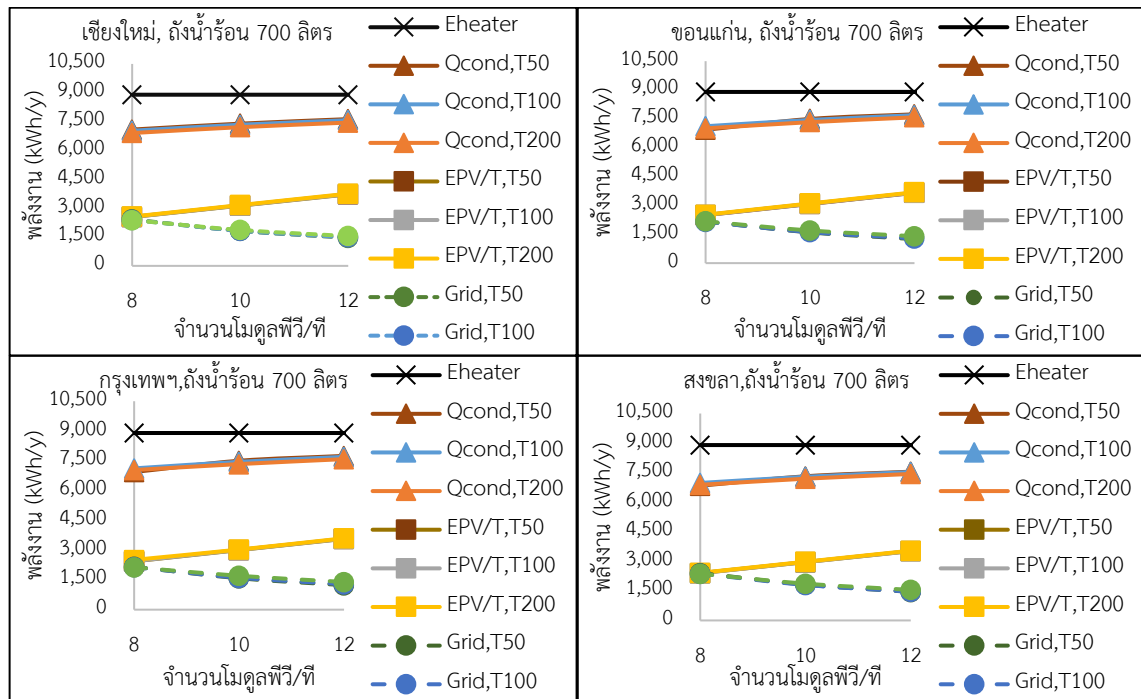
รูปที่ 12 : พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ES) ของถังน้ำร้อน 500 ลิตร ในแต่ละจังหวัด



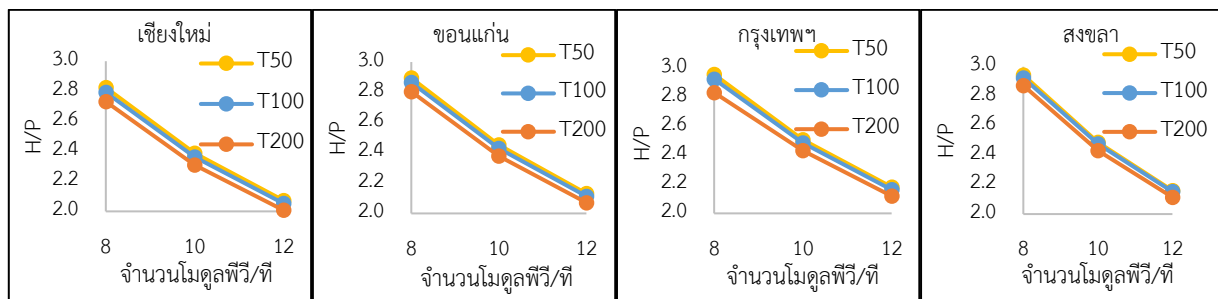
รูปที่ 13 : ระยะเวลาคืนทุนเทียบของขนาดถังน้ำร้อน 500 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

เมื่อเพิ่มการผลิตน้ำร้อนเป็น 700 ลิตร จะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมดูลพีวี/ที 8-12 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 50-200 ลิตร (T50-T200) แสดงผลในรูปที่ 14 จะสังเกตได้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลพีวี/ทีมีค่าเพิ่มขึ้น และพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากระบบจำหน่ายจะลดลงตามจำนวนโมดูลที่เพิ่มขึ้น และเมื่อจำนวนโมดูลพีวี/ทีมากกว่า 8 ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายในการดำเนินการมากกว่าร้อยละ 70

อีกทั้งยังพบว่าพลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์ของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งทำให้อัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลมีค่าลดลงตามจำนวนโมดูลแสดงผลในรูปที่ 15 แต่พลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์น้อยกว่าพลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ลดไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปั๊มความร้อนที่ใช้งานไม่สามารถผลิตน้ำร้อนขนาด 700 ลิตร ให้มีอุณหภูมิ 60 °C ก่อนสิ้นสุดวัน



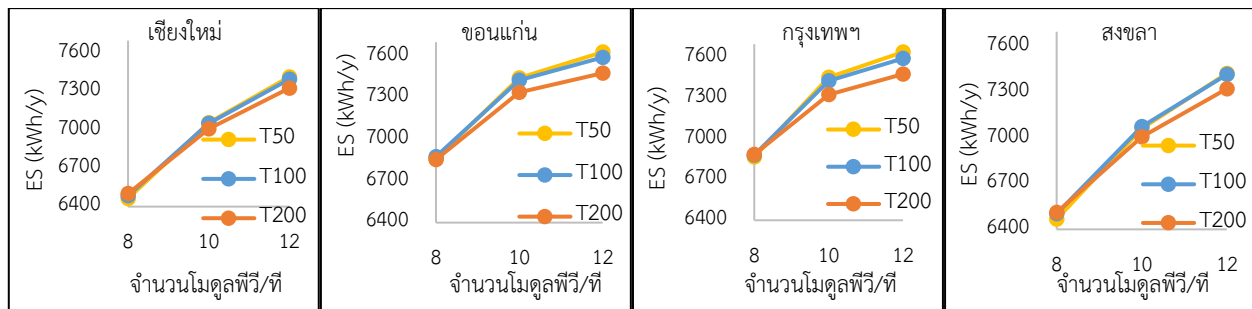
รูปที่ 14 : ข้อมูลแสดงค่าพลังงานต่าง ๆ ใน 1 ปี ของการผลิตน้ำร้อนปริมาณ 700 ลิตรต่อวัน แต่ละจังหวัด



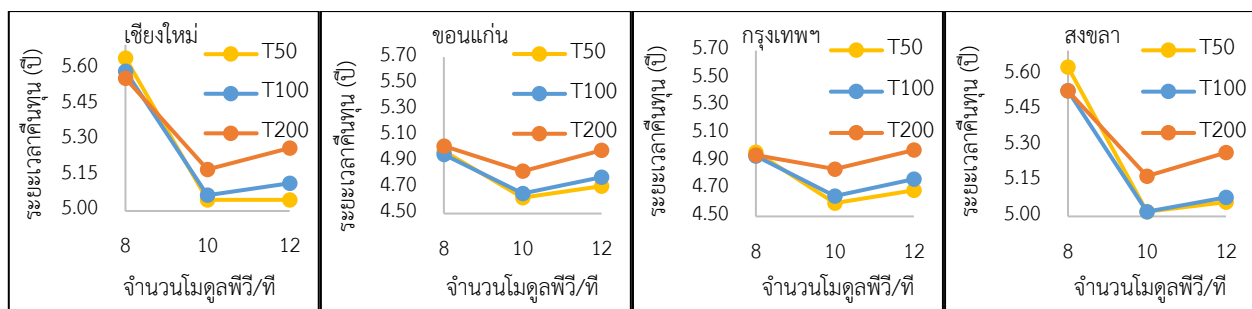
รูปที่ 15 : อัตราความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (H/P) ของขนาดถังน้ำร้อน 700 ลิตร แต่ละจังหวัด

รูปที่ 16 แสดงพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่สามารถประหยัดได้ในปี 1 ปี (ES) ของจังหวัดต่าง ๆ เทียบกับระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ลดไฟฟ้าสำหรับการผลิตน้ำร้อนในแต่ละวัน 700 ลิตร จะเห็นได้ว่าพลังงานจะประหยัดได้สูงขึ้นตามจำนวนโมดูลพีวี/ที

ที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของขนาดถังน้ำเย็นส่งผลให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิสุดท้ายในถังน้ำร้อนเมื่อสิ้นสุดวันมีค่าต่ำลง จึงใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายเพิ่มขึ้นให้กับลดความร้อน



รูปที่ 16 : พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (ES) ของถังน้ำร้อน 700 ลิตร แต่ละจังหวัด



รูปที่ 17 : ระยะเวลาคืนทุนของขนาดถังน้ำร้อน 700 ลิตร ในแต่ละจังหวัด

เมื่อทำการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน พบว่าการผลิตน้ำร้อนขนาด 700 ลิตร ทั้ง 4 จังหวัด ที่จำนวน 10 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 50 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนเหมาะสมที่สุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 5.05, 4.62, 4.60, 5.03 ปี ตามลำดับ ดังรูปที่ 17

จากรูป 9, 13, 17 จะเห็นได้ว่ากรุงเทพฯ และขอนแก่น มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด เนื่องจากมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ซึ่งผลของความเข้มรังสีอาทิตย์ต่อระยะเวลาคืนทุนดังกล่าว มีลักษณะเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Y. Bai [9] และคณะ และถึงแม้ว่าเชียงใหม่จะมีความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับขอนแก่น แต่มีค่าอุณหภูมิแวดล้อมต่ำ ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณการใช้ความร้อนเสริมสูง ดังนั้นจึงมีระยะเวลาคืนทุนที่นาน

4) สรุปและอภิปรายผล

การพิจารณาจำนวนโมดูลพีวี/ที และขนาดของถังน้ำเย็นที่เหมาะสมกับปั๊มความร้อนแบบอัดไอ ความสามารถในการทำความร้อนสูงสุดที่ 3,000 วัตต์ ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากโมดูลพีวี/ที ที่แต่ละโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 200 วัตต์ และมีพื้นที่รับรังสี 1.326 ม² โดยมีการต่อขนานกันเพื่อผลิตน้ำร้อนขนาดถึง 350, 500, 700 ลิตร ให้มีอุณหภูมิสูงสุดในตอนเย็นของแต่ละวันไม่ต่ำกว่า 60 °C หากสิ้นสุดวันอุณหภูมิ น้ำต่ำกว่าจะ

ใช้ลดไฟฟ้าเสริมเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในถังน้ำร้อน และสมมุติว่ามีการใช้น้ำร้อนทั้งหมดในตอนกลางวัน ผลการศึกษาโดยใช้ข้อมูลสภาวะอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา พบว่า

1. การผลิตน้ำร้อนขนาดถังน้ำร้อน 350 ลิตร ค่าอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะลดลงตามจำนวนโมดูล และขนาดถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 3.33–2.05 และเมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนจากลดไฟฟ้าที่จำนวนโมดูลพีวี/ทีมากกว่า 8 โมดูล สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด โดยทั้ง 4 จังหวัด มีระยะเวลาคืนทุน 5.75, 5.52, 5.57 และ 5.69 ปี ตามลำดับ ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างนาน เนื่องจากการผลิตน้ำร้อนขนาด 350 ลิตร ไม่เหมาะสมกับปั๊มความร้อนที่ใช้งาน ควรเลือกปั๊มความร้อนที่มีขนาดเล็กลง

2. เมื่อเพิ่มขนาดความต้องการน้ำร้อนเป็น 500 ลิตร ค่าอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะลดลงตามจำนวนโมดูลพีวี/ที และขนาดถังน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 3.43–2.17 และเมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนจากลด

ไฟฟ้า ระบบพีวี/ที่ร่วมกับปั๊มความร้อนที่จำนวนโมดูลมากกว่า 8 โมดูล สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ที่จำนวน 8 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 300 ลิตร เหมาะสมที่สุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 3.97, 3.80, 3.82 และ 3.98 ปี ตามลำดับ

3. เมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำร้อนเป็น 700 ลิตร มีค่าอัตราส่วนความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้าที่จะลดลงเหลือ 2.96–2.01 และเมื่อเทียบกับระบบทำน้ำร้อนจากหลอดไฟฟ้าที่จำนวนโมดูลพีวี/ที่มากกว่า 8 โมดูล สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าร้อยละ 70 เมื่อขนาดถังน้ำเย็นเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ แต่ส่งผลให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนพบว่าที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา ที่จำนวน 10 โมดูล และขนาดถังน้ำเย็น 50 ลิตร มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 5.05, 4.62, 4.60 และ 5.03 ปี ตามลำดับ ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างนาน เนื่องจากระบบการผลิตน้ำร้อนขนาด 700 ลิตร ไม่เหมาะสมกับปั๊มความร้อนที่ใช้งาน ควรเลือกปั๊มความร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย และอุปกรณ์ทดสอบจากห้องปฏิบัติการระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

REFERENCES

- [1] A. N. Karakilic, A. Karafil, and N. Gene, "Effects of temperature and solar irradiation on performance of monocrystalline, polycrystalline and thin-film PV panels," *IJTPE*, vol. 14, no. 2, pp. 254–260, Jun. 2022.
- [2] T. Lungkadee and A. Asanakham, "Evaluation of electrical power and temperature of solar rooftop module by air cooling with augmented fin," *Eng. J. Chiang Mai Univ.*, vol. 28, no. 3, pp. 130–141, 2016.
- [3] E. Wilson, "Theoretical and operational thermal performance of a wet crystalline silicon PV module under Jamaican conditions," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 1655–1660, Jun. 2009.
- [4] T. Kim, B. Choi, Y. Han, and K. Do, "A comparative investigation of solar-assisted heat pumps with solar thermal collectors for a hot water supply system," *Energy Convers. Manage.*, vol. 172, pp. 472–484, Sep. 2018.
- [5] M. A. Obalanlege, Y. Mahmoudi, R. Douglas, E. Ebrahimnia-Bajestan, J. Davidson, and D. Bailie, "Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 558–572, Apr. 2020.
- [6] S. Vaishak and P. V. Bhale, "Photovoltaic/thermal-solar assisted heat pump system: Current status and future prospects," *Sol. Energy*, vol. 189, pp. 268–284, Sep. 2019.
- [7] M. Kosan, M. Demirtas, M. Aktas, and E. Disli, "Performance analyses of sustainable PV/T assisted heat pump drying system," *Sol. Energy*, vol. 199, pp. 657–672, Mar. 2020.
- [8] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos, and K. A. Antonopoulos, "Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems," *Energy Convers. Manage.*, vol. 120, pp. 306–319, Jul. 2016.
- [9] Y. Bai, T. T. Chow, C. Menezo, and P. Dupeyrat, "Analysis of a hybrid PV/Thermal solar-assisted heat pump system for sports center water heating application," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, Aug. 2012, Art. no. 265838, doi: 10.1155/2012/265838.
- [10] European Commission. "Photovoltaic geographical information systems." EUROPA.eu. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (accessed Aug. 9, 2022).
- [11] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat, and T. Kiatsiriroat, "A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module," *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 1029–1042, Nov. 2020.
- [12] K. Utama, "Performance analysis of photovoltaic/thermal module with heat pump for heat and power," M.S. thesis, Dept. Energy Eng., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2022.

การศึกษาความหนาผิวเคลือบที่ส่งผลต่อขนาดที่ปรากฏของรอยบ่งชี้ จากการทดสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก

ภาวิณี อ่างบุญตา^{1*} ไพศาล ทองสงค์² ประจักษ์ อ่างบุญตา³

^{1*} คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, ประเทศไทย

^{2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : Duangkamol_a@rmutt.ac.th

รับต้นฉบับ : 28 มกราคม 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 20 มีนาคม 2566; ตอบรับบทความ : 28 เมษายน 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหนาของสารเคลือบผิวชิ้นงานที่ส่งผลต่อการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก ตัวแปรหลักที่ทำการศึกษา คือ ความหนาของสารเคลือบ โดยการศึกษาทั้งสารเคลือบผิวชิ้นงาน 3 ประเภท คือ สารเคลือบสีขาว สารเคลือบสี และสารเคลือบแลคเกอร์ ทำการทดสอบกับชิ้นงานมาตรฐานที่จำลองรอยบากร่องขนาดความกว้าง ความยาวและความลึกเป็น 0.0060, 0.0625, และ 0.0200 นิ้ว ตามลำดับ การทดลองดำเนินการทดสอบหารอยบ่งชี้ที่ขึ้นทดสอบที่ไม่ได้เคลือบผิว และขึ้นทดสอบที่ผ่านการเคลือบผิวที่มีระดับความหนาน้อยถึงระดับความหนาที่ไม่สามารถแสดงผลของรอยบ่งชี้ที่ชัดเจน ใช้ไขยกเหนียวนำพาให้ขึ้นทดสอบเป็นแม่เหล็ก ขณะเดียวกันฉีดพ่นผงแม่เหล็กแบบเรืองแสงลงตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบ จากนั้นทำการบันทึกภาพด้วยกล้องไมโครสโคปที่กำลังขยาย 30 เท่า ภายใต้แสง UV – A ในห้องมืด ทำการวัดผลจากความยาวของรอยบ่งชี้ที่ปรากฏของแต่ละประเภทของสารเคลือบ

จากผลการทดลอง พบว่า ความหนาของสารเคลือบทั้ง 3 ประเภท มีผลต่อปริมาณความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่รอยบากร่องของขึ้นทดสอบที่ระดับความหนาแตกต่างกัน ความหนาของสารเคลือบที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมากที่สุดไปถึงน้อยสุด คือ สารเคลือบสีขาว แลคเกอร์และสารเคลือบสี โดยมีค่าของความหนาที่ส่งผลต่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเป็นค่า 61.19, 73.63 และ 83.56 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยพิจารณาจากขนาดความของรอยบ่งชี้ที่ลดลงมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของรอยบกพร่องที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ตามมาตรฐานของ ASME Section V

คำสำคัญ : ความหนาชั้นเคลือบผิว ชนิดของสารเคลือบผิว รอยบ่งชี้ การทดสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก

Study of the Coating Thicknesses Effect to the Length of the Indication via Magnetic Particle Testing

Parvinee Angboonta^{1*} Paisan Thongson² Prajak Angboonta³

^{1*}*Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand*

^{2,3}*Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: Duangkamol_a@rmutt.ac.th

Received: 28 January 2023; Revised: 20 March 2023; Accepted: 28 April 2023

Published online: 29 June 2023

Abstract

This research aims to study the coating thicknesses on specimen effecting to the magnetic particle testing. The main studies variables are the coating thickness which study the three coating types, 1. White contrast coating, 2. Color coating, and 3. Lacquer coating. The research testes with the NA – 16 notch defect test bar of the wide size, the length size and the depth size 0.0060-inch, 0.0625-inch, and 0.0200-inch respectively. The experiment was conducted for indications on both uncoated test specimen and coated test specimen. The experiment tests the coated test specimen that has a low thickness until the thickness where a clear indication cannot be displayed. This research uses a ac – yoke for magnetizing the coated test specimen while spraying the fluorescent magnetic powder on the desired location to inspect. The images are recorded via a microscope at 30X magnification under UV – A light in a dark room.

The experimental results found that the thickness of the 3 types of coatings affected the amount of magnetic field intensity generated on the specimens of different coating thicknesses. The thickness of the coating that has the greatest and the least effect on the magnetic field strength are the white coating., the lacquer and the color coating respectively. The values of three coated types thickness affect the magnetic field strength are 61.19 μm , 73.63 μm , and 83.56 μm respectively. The coating thickness is acceptable when the length of the indication on the coated surface is at least 50% of the length of the corresponding indication prior to coating according to the Section V of ASME Code.

Keywords: Coating thickness, Coating types, Indication, Magnetic particle testing

1) บทนำ

อุตสาหกรรมในประเทศไทยได้พัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็ว เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมโครงสร้างขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมระบบราง และอุตสาหกรรมการบิน เป็นต้น เมื่อมีการใช้งานวัสดุไปเป็นระยะหนึ่งแล้ว วัสดุเหล่านั้นจะเกิดความเค้น ความเครียดที่ขึ้นงานมากขึ้นแล้วแต่ภาระแรงที่มากกระทำต่อชิ้นงาน และเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ จนชิ้นงานไม่สามารถต้านทานแรงที่มากกระทำจึงก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นงาน อาจส่งผลต่อทรัพย์สินและชีวิตของบุคคลได้ เช่น กรณีเรือ โททานิก สะพานทาโคมาแนโรส และเดอฮาวิลแลนด์โคเมท เป็นต้น [1] ดังนั้น ถ้าไม่ต้องการให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน จำเป็นต้องมีการตรวจสอบชิ้นงานตามรอบเวลา เพื่อประเมินคุณภาพของชิ้นงานว่ายังสามารถใช้งานต่อได้หรือไม่ ถ้าประเมินแล้วไม่สามารถใช้งานได้ต้องทำการเปลี่ยนหรือทำการซ่อมแซมให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย [2]

การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานและรอยเชื่อมมีทั้งตรวจสอบเป็นแบบทำลายสภาพและไม่ทำลายสภาพ ซึ่งการตรวจสอบแบบไม่ทำลายสภาพบางวิธีอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กในการตรวจหารอยบกพร่อง (defect) ซึ่งการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กบ่อยครั้งพบปัญหาจากสารเคลือบ [3] เนื่องจากชิ้นงานในอุตสาหกรรมของประเทศไทยส่วนมากที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเชื่อม ผิวของชิ้นงานจะถูกเคลือบด้วยสารเคลือบ เช่น สี แล็กเกอร์ และการชุบกลวไนซ์ เป็นต้น การเคลือบผิวชิ้นงานเป็นการป้องกันไม่ให้ผิวหน้าของชิ้นงานถูกทำลายจากสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรด – ด่าง แต่การตรวจหารอยบกพร่องของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวหน้า ความหนาของชั้นสารเคลือบมีผลต่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ส่งผ่านไปยังชิ้นงานที่ตรวจสอบ [4]

ในการปฏิบัติ ก่อนการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก จำเป็นต้องลอกผิวของสารเคลือบออกก่อน ส่งผลให้การตรวจสอบกระทำได้ล่าช้า และมีค่าใช้จ่ายของการลอกผิวเคลือบออกและค่าใช้จ่ายจากการทำผิวเคลือบใหม่ด้วย ดังนั้น เพื่อลดปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาความหนาของผิวเคลือบที่ระดับความหนาแตกต่างกัน ส่งผลต่อการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กอย่างไร โดยผลของการทดสอบจะวัดจากขนาดของรอยบ่งชี้ที่ปรากฏ [5] ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ไม่ใช่วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (non – ferromagnetic) ที่ความหนาไม่เกิน 50

μm สามารถตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กได้ แต่ความหนาที่มีค่ามากกว่า 50 μm ขึ้นไปความสามารถในการตรวจสอบลดลง [6]

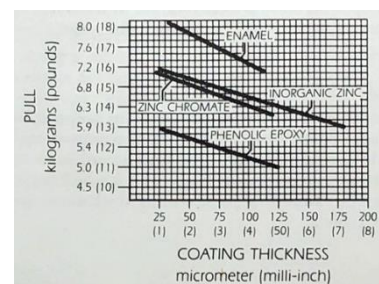
1.1) การทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก

การทดสอบเป็นการศึกษาผลกระทบของความหนาของผิวเคลือบและชนิดของสารเคลือบด้วยเทคนิคโยก ทำการวัดพลังงานของโยกจากการยกแท่งมาตรฐานที่ผ่านการเคลือบด้วยชั้นความหนาของสารเคลือบจากน้อยไปหามาก และวัดผลของแรงดึงดูดของสนามแม่เหล็กด้วยเครื่องไดนามอมิเตอร์ (dynamometer) การทดสอบนี้เมื่อทดสอบซ้ำ ๆ ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ความหนาของสารเคลือบลดลงส่งผลต่อความสามารถในการตรวจสอบแรงดึงดูดของสนามแม่เหล็ก

1.2) ผลการทดสอบที่เกิดจากความหนาสารเคลือบ

การทดลองในขั้นต้นทำการบันทึกผลรอยบ่งชี้ที่ปรากฏก่อนทำการเคลือบผิวชิ้นทดสอบ จากนั้นทำการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบอีนาเมล (enamel) สารอินทรีย์ (inorganic zinc) ชุบสังกะสี (zinc chromate) และเรซินสังเคราะห์ (phenolic epoxy) เมื่อสารเคลือบแห้งทำการวัดค่าความหนาและทำการทดสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กเทคนิคโยก บันทึกผลรอยบ่งชี้ที่ปรากฏ ผลการทดสอบทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ก่อนทำการเคลือบผิว ค่าความหนาของสารเคลือบแต่ละชนิดที่มีค่ามากกว่า 80 μm (3 milli-in.) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมความสามารถในการตรวจสอบลดลง

ความหนาของสารเคลือบที่ถูกกันขวางบนผิวชิ้นงานส่งผลต่อสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำด้วยเทคนิคโยกกระแสสลับ ดังนั้น ผลของความหนาสารเคลือบขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคลือบ และความหนา [3] ดังรูปที่ 1

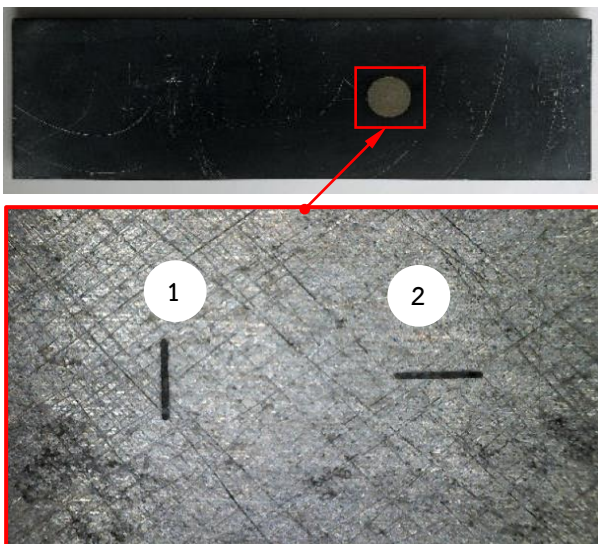


รูปที่ 1 : ความสัมพันธ์ของแรงดึงดูดของสนามแม่เหล็กกับความหนาสารเคลือบ [3]

2) วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1) อุปกรณ์และการสอบเทียบอุปกรณ์ก่อนการทดสอบ

ก่อนการตรวจสอบต้องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำยาทำความสะอาด (cleaner or remover) ยี่ห้อ Magnaflux Part Number 008A100 ชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นชิ้นงานมาตรฐาน NA-16 Notch Defect Test Bar ทำจากเหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy metal steel) มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา 10, 3, และ 3/8 นิ้ว ที่จำลองรอยบากร่องมีขนาดความกว้าง ความยาว และความลึกเป็น 0.0060, 0.0625, และ 0.0200 นิ้ว ตามลำดับ รอยบากร่องตำแหน่งที่ 1 และ 2 วางทำมุม 90 และ 0 องศา กับความยาวชิ้นงาน [7] ดังรูปที่ 2 เบื้องต้นตรวจสอบชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิวและวัดขนาดของรอยบ่งชี้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับความยาวของรอยบ่งชี้ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว



รูปที่ 2 : ชิ้นงานทดสอบ

ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้วัสดุสารเคลือบ 3 ชนิด คือ

1) สารเคลือบชนิด A เป็นสารเคลือบรองพื้น (white contrast) ที่ใช้จำแนกให้เห็นความแตกต่างของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบได้ดี และช่วยในการมองเห็นรอยบ่งชี้ในพื้นที่มืด สารเคลือบชนิดนี้มีความไว (sensitivity) ในขณะทำการตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก และสามารถใช้ได้กับอนุภาคแม่เหล็กแบบย้อมสีได้ทุกชนิด ใช้ได้ทั้งอนุภาคแม่เหล็กแบบเปียกและแบบแห้ง คุณสมบัติทั่วไปของสารเคลือบชนิด A เป็นสารเคลือบสีขาว สว่าง ทึบแสงดี ค่าความเปรียบต่างดี แห้งเร็ว การยึดเกาะที่ผิวของสารเคลือบดี และไม่เป็นอันตราย มีซัลเฟอร์ (Sulphur) และฮาโลเจน (Halogens)

ต่ำ และไม่มีส่วนผสมของคลอรีน ไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbons) [8]

2) สารเคลือบชนิด B เป็นสีพ่นอุตสาหกรรม สามารถใช้เคลือบผิวชิ้นงานได้ทั้งภายในและภายนอก สารเคลือบชนิดนี้ผ่านกระบวนการผลิตจากวัสดุไนโตรเซลลูโลสเรซิน (Nitrocellulose Resin) และผงสีชนิดพิเศษทำให้ฟิล์มสีคงทน สีสันสดใส เคลือบพื้นผิวได้ดีและไม่ซีดจางง่าย เมื่อฉีดยาพ่นสารเคลือบบนผิวงานทำให้เกิดฟิล์มสีได้รวดเร็วและประหยัดเวลาทำงาน ซึ่งสามารถใช้ได้กับเหล็ก พลาสติก คอนกรีต และไม้ คุณสมบัติทั่วไปของสารเคลือบชนิด B เป็นสารเคลือบที่ยึดเกาะผิวได้ดี ทนทานต่อการลอกและรอยขีดข่วน แห้งเร็ว เช็ดล้างทำความสะอาดง่าย สูตรความเข้มข้นสูง มีเนื้อสีเข้มข้น ปราศจากสารปรอทและตะกั่ว ปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม [9]

3) สารเคลือบชนิด C เป็นแลคเกอร์ สามารถใช้เคลือบผิวงานตกแต่งนอกประสงค์ สารเคลือบชนิดนี้ผ่านกระบวนการผลิตจากวัสดุไนโตรเซลลูโลส และอะคริลิก แลคเกอร์ เรซิน คุณสมบัติทั่วไป เป็นสารเคลือบที่สามารถป้องกันการขีดข่วน ความชื้น คราบดำคราบสนิม เป็นต้น สารเคลือบชนิด C สามารถใช้พ่นเคลือบพลาสติก โลหะและไม้ เป็นต้น นอกจากนี้ สารเคลือบแห้งเร็ว ประหยัดเวลาการทำงาน มีความเงางามเป็นประกายให้กับชิ้นงาน ปลอดภัยยิ่งขึ้น ปราศจากสารปรอทและสารตะกั่ว และสามารถใช้งานได้หลากหลายพื้นผิว [10]

การตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กจำเป็นต้องใช้สารเคลือบ White Contrast เป็นพื้นหลังสีขาวเพื่อเพิ่มการมองเห็นได้บนพื้นผิวชิ้นทดสอบ ส่วนสีเคลือบหรือแลคเกอร์จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมท่อน้ำมัน หรือท่อน้ำแก๊ส เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวของชิ้นงานทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรด-ด่าง ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนสร้างความเสียหายกับชิ้นงาน งานวิจัยจึงได้นำสารเคลือบกลุ่มนี้มาทดสอบหาความหนาที่ส่งผลต่อการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก

โดยทำการเคลือบผิวชิ้นงานที่ความหนาแตกต่างกัน และวัดความหนาผิวเคลือบด้วยเครื่องวัดความหนาสีเคลือบยี่ห้อ Fischer Instruments Dual Scope MPOR ดังรูปที่ 3 ซึ่งสามารถวัดความหนาชิ้นงานได้ตั้งแต่ความหนา 0 – 2,000 μm ก่อนการวัดความหนาจะต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือโดยใช้แผ่นวัดความหนาสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็ก ดังรูปที่ 4

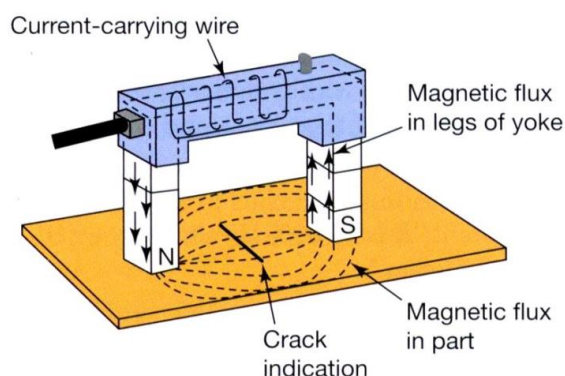


รูปที่ 3 : อุปกรณ์วัดความหนาวัสดุเคลือบ



รูปที่ 4 : แผ่นสอบเทียบเครื่องวัดความหนาสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็ก

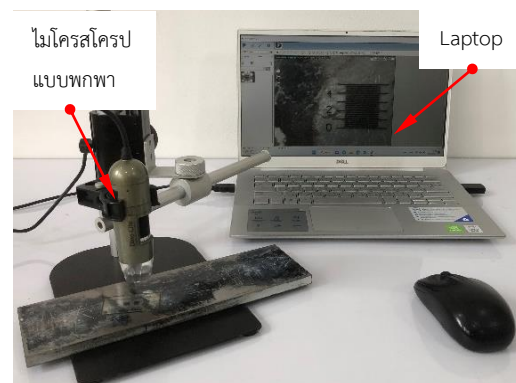
ในการทดสอบหารอยบกพร่องใช้อุปกรณ์ตรวจสอบอนุภาคแม่เหล็กแบบพกพาประเภทโยกยี่ห้อ Parker model B100S Serial 11109 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กตามยาว โยกปกติประกอบด้วยขดลวดพันรอบ ๆ แกนเหล็ก มีขาสองข้างที่สามารถปรับได้ เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามยาวก็จะถูกสร้างขึ้นที่แกนเหล็กและส่งผ่านไปที่ยกทั้งสอง เมื่อขอยกสัมผัสกับชิ้นงานก็จะสร้างสนามแม่เหล็กส่งผ่านไปยังชิ้นงานที่ตรวจสอบ [11] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 : การสร้างสนามแม่เหล็กตามยาวของโยก [12].

ผงแม่เหล็กที่ใช้เป็นผงแม่เหล็กแบบเปียกยี่ห้อ Magnaflux Part Number 008A105 ชนิดเรืองแสง อยู่ในลักษณะสารแขวน-

ลอยบรรจุในกระป๋อง ขณะใช้งานจะต้องเขย่ากระป๋องและฉีดพ่นตรงบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ ก่อนตรวจสอบรอยบกพร่องจะใช้เครื่องกำเนิดแสง UV - A ยี่ห้อ Spectroline Model SB - 100 P/F ซึ่งกำเนิดแสง UV - A ในช่วง 365 nm เพื่อให้สามารถมองเห็นรอยบ่งชี้ จากการเรืองแสงของสารเรืองแสงที่ผสมในผงแม่เหล็ก การวัดผลของรอยบ่งชี้จะใช้กล้องไมโครสโคปแบบพกพามีกำลังขยายสูงสุด 50 เท่า ยี่ห้อ Dino - Lite AM - Series บันทึกภาพและวัดขนาดของรอยบ่งชี้ที่ปรากฏซึ่งแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 : ไมโครสโคปแบบพกพา ยี่ห้อ Dino

2.2) การเตรียมการทดลอง

ก่อนทำการทดสอบจริงต้องทดสอบประสิทธิภาพของโยกโดยการยกแท่งมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ (4.5 ก.ก.) ที่ความห่างของขาโยกสูงสุด 8 นิ้ว สำหรับโยกกระแสสลับ ให้ลอยสูงขึ้นจากพื้นเล็กน้อยซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASME Section V 2021 [13] ดังรูป 7



รูปที่ 7 : แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของโยก

เตรียมผิวชิ้นทดสอบ โดยทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นทดสอบให้ปราศจากฝุ่น คราบจาระบี น้ำมันและอื่น ๆ ที่มีโอกาสกบปิด

รอยความไม่ต่อเนื่อง งานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุเคลือบผิวไว้ 3 ชนิด คือ 1) สารเคลือบชนิด A 2) สารเคลือบชนิด B และ 3) สารเคลือบชนิด C จากนั้นฉีดพ่นสารเคลือบแต่ละชนิดลงบนผิวชิ้นทดสอบและปล่อยให้ผิวหน้าชิ้นทดสอบแห้งสนิท การฉีดพ่นสารเคลือบเริ่มจากความหนาแน่นน้อยไปหาความหนาที่มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 8

ต่อมาดำเนินการวัดความเพียงพอของสนามแม่เหล็ก การทดสอบจะใช้อุปกรณ์ชี้วัดรูปพาย (pie shape field indicator) วางบนผิวหน้าชิ้นทดสอบโดยวางให้อยู่ระหว่างขาโยก จากนั้นสร้างสนามแม่เหล็กแบบต่อเนื่อง และฉีดพ่นอนุภาคแม่เหล็กบนผิวหน้าอุปกรณ์ชี้วัดรูปพาย ขณะเดียวกันให้สังเกตการแสดงผลบนผิวอุปกรณ์ชี้วัดรูปพาย จะปรากฏรอยบ่งชี้ที่ผิวอุปกรณ์ชี้วัดรูปพาย รอยบ่งชี้ที่ปรากฏจะมีลักษณะเป็นเส้นวางตัวในแนวตั้งฉาก 90 องศา และวางตัว 45 องศา กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 9 แสดงว่าสนามแม่เหล็กมีความเพียงพอต่อการทดสอบ [11]



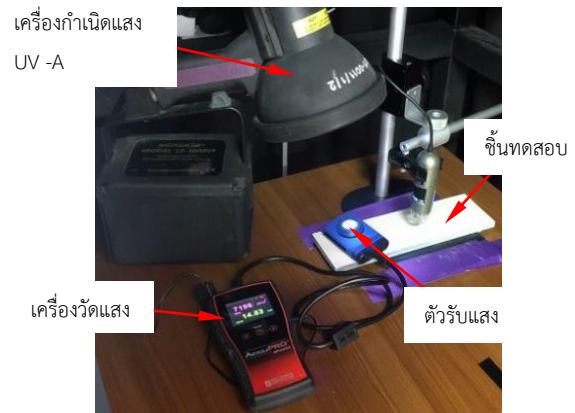
รูปที่ 8 : แสดงชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว



รูปที่ 9 : แสดงการวัดความเพียงพอสนามแม่เหล็ก

การวัดความสว่างของแสงในห้องมืด กระทำภายใต้แสงแบล็คไลท์ (Blacklight: UV – A) การทดสอบใช้เครื่องมือวัดแสงยี่ห้อ Spectroline รุ่น Accu Pro xp – 2000 วางตัวตรวจวัดแสงไว้บนผิวหน้าชิ้นทดสอบ ซึ่งการทดสอบภายใต้แสงแบล็คไลท์ตามมาตรฐานกำหนดไว้ว่าต้องไม่ต่ำกว่า $1,000 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ และต้องมี

แสงสีขาวโดยรอบไม่เกิน 21.5 ลักซ์ ซึ่งค่าที่วัดได้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด [11] ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 : แสดงการวัดแสงในห้องมืด

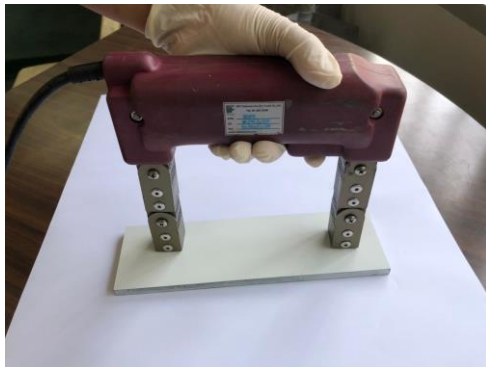
2.3) การทดลอง

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเคลือบผิวแต่ละชนิด แต่ละความหนาของสารเคลือบผิวจะกำหนดพื้นที่สำหรับวัดความหนา โดยมีขนาดความกว้างและความยาว 50×50 มิลลิเมตร การวัดความหนาหัวโพรบจะต้องวางเหลื่อมกัน 6 มิลลิเมตร โดยวัดอย่างน้อย 3 ค่า และหาค่าเฉลี่ยของความหนา [13] ดังรูป 11



รูปที่ 11 : ลักษณะการวัดความหนาผิวเคลือบ

การตรวจสอบต้องทำให้ผิวของชิ้นงานทดสอบมีความเป็นแม่เหล็กโดยใช้โยกเหนี่ยวนำ การเหนี่ยวนำจะให้สนามแม่เหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Test Method) ขณะเดียวกันการตรวจสอบจะต้องวางขาโยกให้ครอบคลุมรอยบากร่องของชิ้นทดสอบและให้อยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างขาโยก และขาโยกต้องสัมผัสแนบสนิทกับผิวหน้าของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 : การทำให้ผิวชิ้นงานเป็นแม่เหล็ก

ในขณะที่ทำการเหนี่ยวนำชิ้นทดสอบให้เป็นแม่เหล็ก จะฉีดพ่นผงแม่เหล็กลงบนผิวหน้าชิ้นทดสอบ ให้ครอบคลุมพื้นที่รอบๆ บาร่อง จากนั้นหยุดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 13

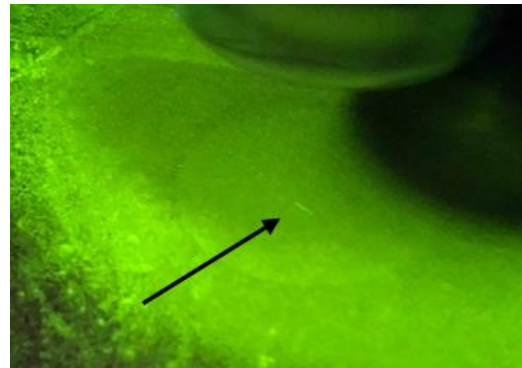


รูปที่ 13 : ลักษณะการฉีดพ่นอนุภาคแม่เหล็ก

การบันทึกผลการทดสอบ เมื่อทำการฉีดพ่นอนุภาคแม่เหล็กแล้ว นำชิ้นทดสอบวางในตำแหน่งสำหรับถ่ายภาพภายใต้แสงแบล็คไลต์ในห้องมืด ดังรูปที่ 14 และการบันทึกภาพรอยบ่งชี้ด้วยกล้อง Dino Capture 2.0 ด้วยกำลังขยาย 30 เท่า ดังรูปที่ 15

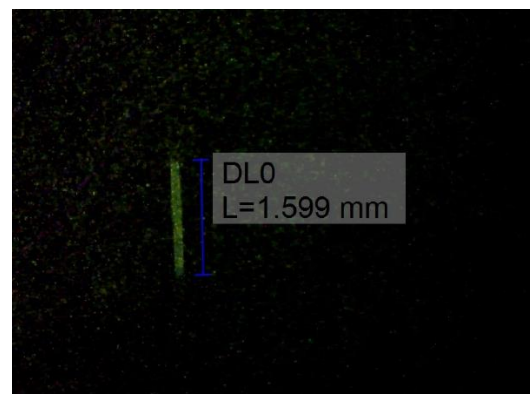


รูปที่ 14 : ระบบการบันทึกผลภาพถ่ายของรอยบ่งชี้



รูปที่ 15 : แสดงรอยบ่งชี้ภายใต้แสงแบล็คไลต์

การวัดขนาดของรอยบ่งชี้ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย พบว่า ความกว้างของรอยบ่งชี้ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบแต่ละชนิดให้ขนาดของความกว้างมีค่าไม่ต่างกันมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเฉพาะขนาดความยาวของรอยบ่งชี้มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ซึ่งลักษณะการวัดขนาดรอยบ่งชี้ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงการวัดความยาวรอยบ่งชี้

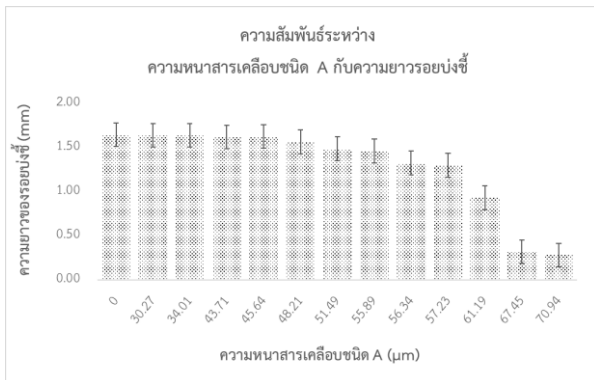
หลังจากบันทึกผลการทดสอบแล้ว ทำการคลายอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงานทดสอบทุก ๆ ครั้ง โดยใช้โยกกระแสดลับ วางขาโยกให้ลอยอยู่เหนือชิ้นงานประมาณ 1 นิ้ว ปลดโยกกระแสไฟเข้าโยก แล้วค่อย ๆ ถอยขาโยกในลักษณะกากบาทออกจากชิ้นทดสอบทำลักษณะนี้ซ้ำ ๆ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กคงค้างเป็นศูนย์

3) ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กส่วนใหญ่นิยมใช้สารเคลือบผิวชนิด A เป็นพื้นหลังสีขาวเพื่อเพิ่มการมองเห็นได้บนพื้นผิวชิ้นทดสอบ และสารเคลือบผิวชนิด B และ C เป็นสาร

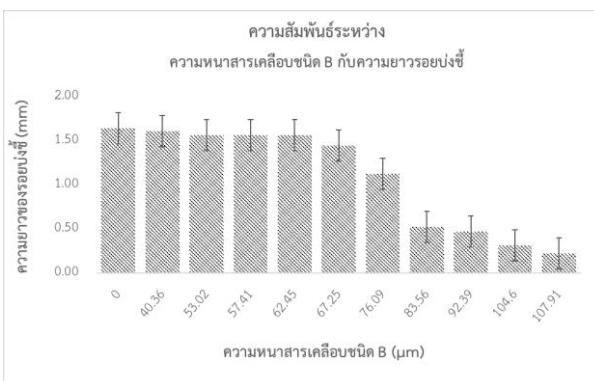
เคลือบที่ใช้ป้องกันการกัดกร่อนของผิวชิ้นทดสอบ นำมาทดสอบหาความหนาที่ส่งผลต่อการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก ซึ่งผลของการทดสอบ ดังรูปที่ 17 18 และ 19

เกณฑ์การพิจารณาผลการทดลอง สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่ไม่เป็นตัวนำ ด้วยการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก ผลของรอยบ่งชี้ที่ปรากฏหากมีขนาดความยาวลดลงครึ่งหนึ่งของขนาดรอยบ่งชี้ก่อนเคลือบผิว ขนาดของรอยบ่งชี้ดังกล่าวจะไม่ยอมรับ โดยอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASME Section V 2021 [13].



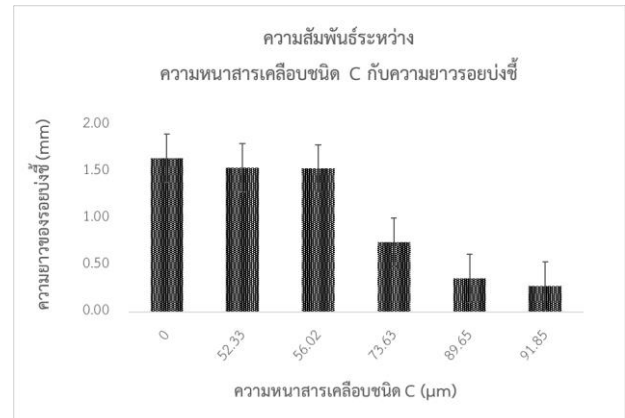
รูปที่ 17 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสารเคลือบชนิด A กับความยาวรอยบ่งชี้

จากรูปที่ 17 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสารเคลือบชนิด A กับความยาวรอยบ่งชี้ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า ที่ความหนาที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิด A ตั้งแต่ค่า 61.19 μm มีผลต่อขนาดความยาวของรอยบ่งชี้ ซึ่งความยาวของรอยบ่งชี้ที่วัดได้ มีขนาดความยาวรอยบ่งชี้ยาวน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวรอยบ่งชี้ที่สร้างขึ้นในชิ้นทดสอบ



รูปที่ 18 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสารเคลือบชนิด B กับความยาวรอยบ่งชี้

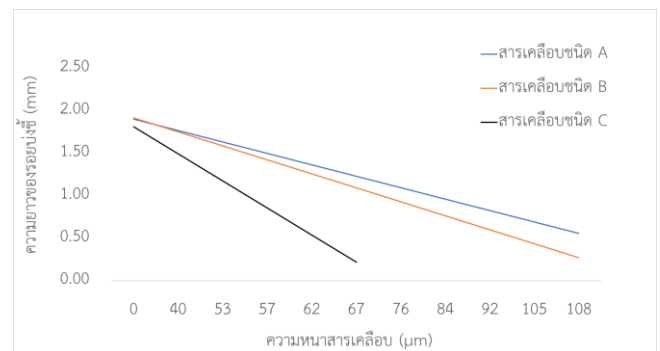
จากรูปที่ 18 สารเคลือบชนิด B กับความยาวรอยบ่งชี้ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า ความหนาที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิด B ที่ความหนาผิวเคลือบ ตั้งแต่ค่า 83.56 μm มีผลต่อขนาดความยาวของรอยบ่งชี้ ซึ่งความยาวของรอยบ่งชี้ที่วัดได้ มีขนาดความยาวรอยบ่งชี้ยาวน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวรอยบ่งชี้ที่สร้างขึ้นในชิ้นทดสอบ



รูปที่ 19 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสารเคลือบชนิด C กับความยาวรอยบ่งชี้

จากรูปที่ 19 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสารเคลือบชนิด C กับความยาวรอยบ่งชี้ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า ที่ความหนาที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิด C ตั้งแต่ค่า 73.63 μm มีผลต่อขนาดความยาวของรอยบ่งชี้ ซึ่งความยาวของรอยบ่งชี้ที่วัดได้ มีขนาดความยาวรอยบ่งชี้ยาวน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวรอยบ่งชี้ที่สร้างขึ้นในชิ้นทดสอบ

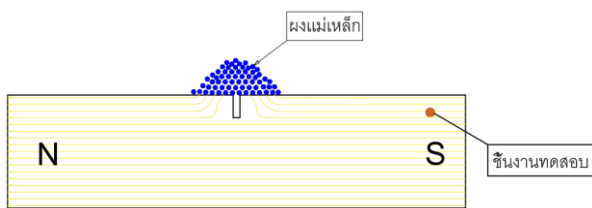
จากผลการทดสอบของสารเคลือบผิวทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำมาสร้างกราฟ เพื่อที่จะดูแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของสารเคลือบแต่ละชนิดกับความยาวของรอยบ่งชี้



รูปที่ 20 : แสดงแนวโน้มความหนาสารเคลือบแต่ละชนิดกับความยาวรอยบ่งชี้

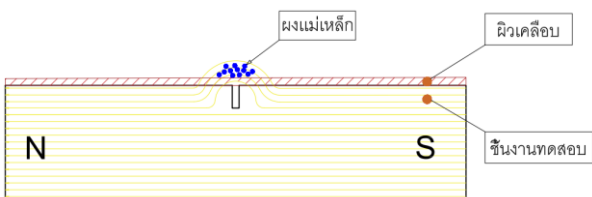
ผลการทดสอบความสัมพันธ์ความหนาสารเคลือบทั้ง 3 ชนิด กับขนาดความยาวรอยบ่งชี้ที่ปรากฏ พบว่าแนวโน้มของกราฟทั้ง 3 มีค่าเข้าใกล้แกน x นั้นหมายความว่า เมื่อความหนาของสารเคลือบแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดความยาวของรอยบ่งชี้ที่ปรากฏจะมีค่าลดลง เป็นผลมาจากความหนาของสารเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้การรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กมีปริมาณลดน้อยลง ดังนั้น เมื่อรอยผงแม่เหล็กลงบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบจึงปรากฏรอยบ่งชี้ที่สั้นลงและไม่ชัดเจน

การตรวจชิ้นทดสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก หากชิ้นทดสอบมีรอยบกพร่องเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ เช่น รอยแตก ร้าว จะเกิดขั้วเหนือและขั้วใต้ขึ้นที่ด้านข้างของรอยแตก ร้าว ทำให้เกิดเป็นฟลักซ์แม่เหล็กรอบ ๆ อาภาส เกิดเป็นสนามแม่เหล็กรั่วไหล (flux leakage field) เมื่อรอยผงแม่เหล็กลงไปจะเกิดการดูดของผงแม่เหล็กและปรากฏเป็นรอยบ่งชี้ที่ชัดเจน ดังรูปที่ 21 ดังนั้น ความเข้มและการโค้ง (curvature) ของสนามแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดจำนวนอนุภาคแม่เหล็กที่เกาะอยู่บนผิวหน้าชิ้นทดสอบ [14]



รูปที่ 21 : แสดงการรวมตัวของผงแม่เหล็ก

ความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ จำนวนเส้นของฟลักซ์แม่เหล็ก ความลึกของรอยความไม่ต่อเนื่อง และความกว้างของรอยความไม่ต่อเนื่อง รอยความไม่ต่อเนื่องที่อยู่ใต้ผิวเคลือบ ถ้าความหนาของผิวเคลือบบางการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กจะมีปริมาณที่มากเมื่อเทียบกับความหนาของผิวเคลือบที่หนากว่า ถ้ารอยผงแม่เหล็กลงบนชิ้นทดสอบที่มีผิวเคลือบหนา ส่งผลให้การรวมตัวของผงแม่เหล็กมีความไม่ชัดเจน ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 : แสดงอิทธิพลของความหนาผิวเคลือบกับฟลักซ์แม่เหล็ก

จากงานวิจัยเมื่อตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กและรอยผงแม่เหล็กบนผิวหน้าชิ้นทดสอบ ถ่ายภาพและวัดขนาดความยาวของรอยบ่งชี้ พบว่า มีขนาดยาวของรอยบ่งชี้ลดลงเมื่อเทียบกับความหนาของสารเคลือบที่เพิ่มขึ้น

4) สรุปผลการทดลอง

จากผลงานวิจัย การศึกษาความหนาผิวเคลือบที่ส่งผลต่อขนาดที่ปรากฏของรอยบ่งชี้ด้วยการทดสอบอนุภาคแม่เหล็กของสารเคลือบ 3 ชนิด คือ 1. สารเคลือบชนิด A 2. สารเคลือบชนิด B และ 3. สารเคลือบชนิด C การเปรียบเทียบผลความยาวของรอยบ่งชี้ที่ยาวที่สุดจะต้องไม่ยาวเกินกว่าความยาวของเกณฑ์การยอมรับ กรณีที่ตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว ความยาวของรอยบ่งชี้ที่ปรากฏบนผิวเคลือบที่ยอมรับได้จะต้องยาวไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวรอยบ่งชี้ที่วัดได้ก่อนการเคลือบผิว ตามมาตรฐาน ASME Section V 2021 [13]. และความหนาของสารเคลือบที่มีความหนามากกว่า $50 \mu\text{m}$ มีผลต่อความสามารถในการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก [6]

สามารถสรุปผลได้ดังนี้ ความหนาของสารเคลือบที่เพิ่มขึ้นแต่ละชนิดมีผลต่อรอยบ่งชี้ที่ปรากฏซึ่งมีขนาดลดลง สารเคลือบแต่ละชนิดส่งผลต่อขนาดของรอยบ่งชี้ที่มีขนาดความหนาไม่เท่ากัน โดยความหนาของสารเคลือบที่ให้ผลของรอยบ่งชี้ดีที่สุด คือ สารเคลือบชนิด B ซึ่งมีค่าความหนาสารเคลือบอยู่ในช่วง $83.56 - 107.91 \mu\text{m}$ สารเคลือบชนิด C ซึ่งมีค่าความหนาสารเคลือบอยู่ในช่วง $73.63 - 91.85 \mu\text{m}$ และสารเคลือบชนิด A มีค่าความหนาของสารเคลือบอยู่ในช่วง $61.19 - 70.94 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

ดังนั้น กรณีของช่วงความหนาสารเคลือบแต่ละชนิดมีค่ามากกว่า $50 \mu\text{m}$ ส่งผลต่อความสามารถในการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก จำเป็นต้องกำจัดสารเคลือบผิวออกก่อนที่จะทำการทดสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก [6], [13]

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่คอยสนับสนุนทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์การตรวจสอบ ตลอดจนคณาจารย์หลายท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาด้านเทคนิคการใช้เครื่องมือ ความรู้ และเทคนิคการตรวจสอบชิ้นงานสำหรับผลงานครั้งนี้

REFERENCES

- [1] *The Welding Engineer's Current Knowledge*, GSI SLV, Duisburg, Germany, 2015, pp. 23–25.
- [2] B. Modiri, P. M. Mohammad, Y. Mojtaba, S. Hossein, S. O. Farzin, and A. Alireza, "Stochastic lifetime estimation of pressurized gas pipeline; Case study of the urban gas pipeline," *Int. J. COMADEM*, vol. 20, no. 2, pp. 31–37, Apr. 2017.
- [3] J. T. Schmidt and K. Skeie, "Dry power magnetic particle tests of painted welds," in *Nondestructive Testing Handbook*, 2nd ed. Columbus, OH, USA: American Society for Nondestructive Testing, 1989, pp. 386–387.
- [4] Y. Wang, X. Gao, M. Finckbohner, and U. Netzelmann, "The effect of paint coatings on detection of vertical surface cracks in metals by induction thermography," *NDT & E Int.*, vol. 104, pp. 58–68, Jun. 2019.
- [5] A. Keresten, S. Ostanin, and V. Zuev, "Advanced liquid epoxy and polyurethane materials: internal and external coatings for pipeline and tubing protection," *E3S Web of Conf.*, vol. 225, Jan. 2021, Art. no. 05004.
- [6] *Non-destructive testing of welds — Magnetic particle testing*, ISO 17638:2016, the International Organization for Standardization, Switzerland, Oct. 2016.
- [7] Parker Research Corporation. *NA-16 Notch Defect Test Bar*. (2023). Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.parkerndt.com/product/na-16-notch-defect-test-bar/>
- [8] Magnaflux. *WCP-2 White Contrast Paint*. (2023). Accessed: Mar 13, 2023. [Online]. Available: <https://magnaflux.eu/EU/EN/Products/Magnetic-Particle-Inspection/Consumables/WCP-2.htm>
- [9] TOA Groups. *Technical Data Sheet*. (2017). Accessed: Mar 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.toagroup.com/storage/downloads/technical%20data/hardware/spray/toa/tds-toa-flat-white-primer-spray-65.pdf>
- [10] TOA Groups. *Technical Data Sheet*. (2017). Accessed: Mar 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.toagroup.com/storage/downloads/technical%20data/hardware/spray/toa/tds-toa-automotive-spray.pdf>
- [11] A. Prateepasen, *Magnetic Particle Testing: Non – Destructive Testing in weld and research*, 7th ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2014.
- [12] C. W. Eick, "Electrically Inducing Magnetism," in *ASNT Level II Study Guide: Magnetic Particle Testing Method*, C. M. Leeman, Ed. Columbus, OH, USA: ASNT, 2017, pp. 15–19.
- [13] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55–70.
- [14] The American Society of Mechanical Engineers, "Article 7: Mandatory Appendix I," in *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, New York, NY, USA: ASME Press, 2021, sec. V.
- [15] J. D. Fenton, "Magnetic Particle Testing: Magnetic Particle Testing Fundamentals," in *ASNT Level III Study Guide: Magnetic Particle Testing Method*, 2nd ed. Columbus, OH, USA: ASNT, 2013, p. 1.

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 กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.6 ต้องเป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ลอกเลียน หรือดัดทอนข้อความของผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

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")

5.4 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

ที่ติดต่อผู้เขียน 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 4-5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ใต้บทคัดย่อ ขนาด 12 **ตัวหนาและเอน** กำหนดชิดซ้าย ข้อความในคำสำคัญ ขนาด 12 ตัวธรรมดา

รูปแบบการพิมพ์เนื้อหาของบทความ

- รูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ กว้าง 8.2 ซม. (3.23") ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.6 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
- **หัวข้อย่อย ระดับที่ 1** ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดชิดซ้าย
- **หัวข้อย่อย 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 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2566

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 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 ริจิรวนิช, *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 Journal*, 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.

ตัวอย่างที่ 3 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:

[8] 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.

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

[9] 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.

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2566

ตัวอย่างที่ 4 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, year.

Examples:

- [10] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.
- [11] Y. Sornsa and P. Wanrerk, "Buckling of rectangular plates with a central square hole," (in Thai), B.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2007.

6. วิธีการจัดส่งบทความ

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

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความจะดำเนินการส่งบทความเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความและแจ้งผลการพิจารณาให้ผู้เขียนบทความทราบ สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแล้วจะได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2566

“สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร”

คณะวิศวกรรมศาสตร์

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ (Automotive Engineering, B.Eng. : AE)
- หลักสูตรวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบสลับ (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)
 - แขนงวิชา การวางแผนกลยุทธ์สำหรับผู้ประกอบการ (Strategic Planning and Management Entrepreneur : SPE)
 - แขนงวิชา การจัดการระบบการผลิต และโลจิสติกส์แบบสลับ (Lean Manufacturing System and Logistics Management : LMS)

Thai-Nichi International College (TNIC)

Bachelor's Degree Programs

- Digital Engineering (DGE)
- Data Science and Analytics (DSA)
- Data Science and Analytics (DSA)
- 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