

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

Thai-Nichi Institute of Technology

Vol.14 No.1

January – April 2026



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน 2569

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน 2569 Vol. 14 No. 1 January – April 2026

ISSN (Online) 2774-0617

ความเป็นมา

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

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์รังสรรค์ เลิศในสัตย์

ขอบเขตเนื้อหา

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

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน (ปีละ 3 ฉบับ)

- ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน
- ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม
- ฉบับที่ 3 กันยายน – 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

อาจารย์ ดร.ก้องกิจ วรพุทธพร

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

- | | |
|--|--|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์นันทกิจ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศวิน ศิริสุข | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรณัฐ เสี่ยงยศศักดิ์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 7. ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย งามหุ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 8. ศาสตราจารย์ ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์ วรรัตน์ปัญญา | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 10. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.พยุ่ง มีสัจ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช ศิริธร | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ | นักวิชาการอิสระ |
| 14. รองศาสตราจารย์ อัญชลี สุพิทักษ์ | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |

คณะกรรมการดำเนินงาน

- | | |
|---|----------------------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ | 8. อาจารย์ ดร.เพ็ญพิมล วิไลรัตน์ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รชตะ รุ่งตระกูลชัย | 9. นางสาวสุพิศ บายคายคม |
| 3. อาจารย์ ดร.สรวรรยา สุวรรณวงศ์ | 10. นางสาวไกล่รุ่ง หมายชื่น |
| 4. อาจารย์ ดร.อภิษฎา นัมคุ้มภัย | 11. นางสาวพิมพ์รต พิพัฒน์กุล |
| 5. อาจารย์ ดร.ภาสกร อภิรักษ์วรพินิต | 12. นางสาวอารีสา จิระเวชถาวร |
| 6. อาจารย์ชีวาพร ไชยพันธ์ | 13. นางสาวยศวี ใจดี |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมราวดี ทัพพูน | |

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

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

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

E-mail : JEDT@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

บทบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT) มีความยินดีนำเสนอผลงานวิจัยในฉบับนี้ ซึ่งสะท้อนถึงความก้าวหน้าขององค์ความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัลในยุคที่อุตสาหกรรมต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากระบบอัตโนมัติ ปัญญาประดิษฐ์ และโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล บทความทุกเรื่องผ่านการประเมินอย่างเข้มงวด เพื่อให้มั่นใจว่าผลงานที่เผยแพร่มีคุณภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคการผลิตและภาคบริการ

วารสารให้ความสำคัญกับงานวิจัยที่ตอบโจทย์ภาคอุตสาหกรรม ทั้งในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึก การพัฒนาระบบอัจฉริยะ และการออกแบบเทคโนโลยีที่ช่วยยกระดับความสามารถในการแข่งขันขององค์กร งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในฉบับนี้นำเสนอแนวทางใหม่ที่สามารถต่อยอดสู่การใช้งานจริง เช่น การประยุกต์ใช้ AI ในสายการผลิต การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติ และการออกแบบโซลูชันดิจิทัลเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบอุตสาหกรรม กองบรรณาธิการเชื่อว่าผลงานในฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยและผู้ปฏิบัติงานในภาคอุตสาหกรรม พร้อมทั้งขอเชิญชวนนักวิจัยส่งผลงานเข้ามาเพื่อตีพิมพ์ในฉบับต่อไป เพื่อร่วมกันผลักดันองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัลให้ก้าวหน้าอย่างยั่งยืน

อาจารย์ ดร.ก้องกิจ วรพุทธพร
บรรณาธิการ

Editorial Message

The editorial board of the *Journal of Engineering and Digital Technology* (JEDT) is pleased to present the research featured in this issue, which reflects ongoing advancements in engineering and digital technology at a time when industries are undergoing rapid transformation driven by automation, artificial intelligence, and digital infrastructure. All articles have undergone rigorous peer review to ensure that the published work meets high academic standards and offers practical value for both the manufacturing and service sectors.

The journal emphasizes research that responds to industrial needs, including the enhancement of production processes, advanced data analytics, the development of intelligent systems, and the design of technologies that strengthen organizational competitiveness. The studies in this issue introduce innovative approaches with strong potential for real-world application, such as the use of AI in production lines, the development of automated control systems, and the creation of digital solutions that improve the resilience of industrial operations.

The editorial board is confident that the contributions in this issue will benefit researchers and practitioners in the industrial sector. We also encourage scholars to continue submitting their work to future issues of JEDT, as we collectively advance knowledge in engineering and digital technology in a sustainable and impactful manner.

Kongkij Voraputhaporn, Ph.D.
Editor-in-Chief

สารบัญ

- 1 Real-Time Classification of Optical Devices Using Rotating Linearly Polarized Light in a Sagnac Interferometer
Rapeepan Kaewon, Jirasak Wongbongkotpaisan
- 14 The Construction of a Newsvendor Model Based on Conditional Value at Risk (CVaR) and the Determination of Optimal Order Quantity
Meijia Wang, Adisak Sangsongfa, Noppadol Amdee
- 34 Bucket Wheel Excavator Teeth Reinforcement via Design of Experiments
Sarayut Malaipurn, Pongsakorn Surin, Maninthara Chaikhampan, Thanwa Wiwut, Teeradon Wanleam, Thanawat Nantisom, Rutaiphat Sukrasorn
- 51 Applying Discriminant Analysis for Data-Driven Decision Making to Reduce Defects in Integrated Circuit Pick-Up from Dicing Tape: A Case Study of an Electronics Company
Jiranan Jaioer, Kittiwat Sirikasemsuk, Kanogkan Leerojanaprapa, Yaikaew Silrak
- 67 Used Car Price Prediction Using Web Scraping and Machine Learning Models
Bhurisub Dejpipatpracha, Worrarat Jongkrajak, Akarachai Inthanil, Wimonnat Sukpol
- 83 Network Modeling and Analysis of Cassava Mosaic Disease Transmission in Thailand
Chayanusapat Rattanavarawong
- 97 Influence of Ground Oyster Shell on Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Paste
Worawit Projan, Phaithun Nasaeng, Chaichan Yuwanasiri
- 112 Sensitivity Analysis of Partial Joint Ordering Policy in Multi-Location Distribution Systems
Anchalee Supithak, Wisut Supithak

Real-Time Classification of Optical Devices Using Rotating Linearly Polarized Light in a Sagnac Interferometer

Rapeepan Kaewon^{1*} Jirasak Wongbongkotpaisan²

^{1,2}*Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand*

*Corresponding author e-mail: kaewon_r@su.ac.th

Received: 16 June 2025; Revised: 8 December 2025; Accepted: 13 January 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

This study looks at how to create perfectly rotating linearly polarized light using phase-shifting methods in a Sagnac interferometer, aiming to categorize optical devices. Theoretical analysis is conducted using Jones calculus, which provides a framework for understanding the propagation and phase shifting of linear light. Experimental results from the Sagnac interferometer show interference fringes that align with predictions from mathematical simulations. The experimental observations are validated through comparisons with Python-based simulations, ensuring the accuracy of the rotating polarized light characteristics. Additionally, Convolutional Neural Network (CNN) techniques are employed to analyze and verify the interference fringes, further confirming the consistency of the results with Jones calculus theory. This work demonstrates the potential for applying these methods in real-time, non-destructive optical measurements for the inspection and classification of materials such as polarizers and Half Wave Plates (HWP), advancing the field of optical device characterization.

Keywords: CNN, Optical, Polarized, Python-based, Sagnac



INTRODUCTION

Interferometry is a versatile and powerful optical technique widely utilized for precise phase measurements and the inspection of optical materials. Its non-destructive nature allows for the evaluation of material properties without compromising the integrity of the sample, making it invaluable across both laboratory and industrial applications [1], [2], [3], [4]. Among the various interferometric systems, the Michelson, Mach-Zehnder, and Sagnac interferometers are the most commonly employed configurations. While Michelson and Mach-Zehnder interferometers require a complex setup of optical components to generate linearly polarized light beams, the Sagnac interferometer offers a more efficient and simplified approach, utilizing fewer components while maintaining the stability of the light produced [5], [6]. This combination of simplicity and inherent light stability makes the Sagnac interferometer an attractive choice for a wide range of applications [7], [8], [9]. One of the key advantages of the Sagnac interferometer is its ability to generate highly stable, rotating linearly polarized light, a critical resource for advanced optical characterization. This type of light offers insights into the propagation and interaction of light with optical materials and components, which is essential for accurately characterizing material properties. To understand and predict the behavior of rotating linearly polarized light, mathematical models such as Jones calculus are frequently employed. Jones calculus provides a powerful framework for analyzing polarized light propagation, enabling precise predictions of light behavior within complex optical systems. Alongside the advancements in optical techniques, the integration of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) has significantly enhanced the analysis and classification of complex data. Traditional manual classification methods are often prone to human error due to the sheer volume and complexity of data. With the aid of machine learning models, particularly Convolutional Neural Networks (CNNs) [10], [11], [12], the process of classifying and analyzing data from optical systems has become more efficient and precise. CNNs, designed to mimic human visual perception, have proven highly effective in image classification tasks, allowing for accurate analysis of optical systems and components.

The primary objective of this study is to generate and characterize perfectly rotating linearly polarized light using a Sagnac interferometer. The experimental setup detailed in this work integrates optical measurements (including intensity and image-based characteristics) and simulation techniques, specifically Python programming, to model the propagation of light within the interferometric system. By comparing the results from these simulations with experimental data obtained from an oscilloscope and CCD camera, the study aims to verify the presence and quality of the rotating polarized light. Additionally, the research explores the application of a CNN model [13], [14] to classify optical components such as polarizers and Half Wave Plates (HWPs), showcasing the integration of machine learning techniques in optical analysis. This approach further enhances the capability to analyze complex optical systems, demonstrating the potential of combining traditional interferometric methods with modern AI-driven data analysis techniques.

METHODS

1. Process of Generating Rotating Linearly Polarized Light

A laser beam source emits a horizontally linearly polarized beam at 0 degrees, which passes through a light filter to reduce its intensity. The polarization axis of the beam is then adjusted using a half-wave plate (HWP) set at 45°. According to Jones vector theory, the electric field of the incident beam entering the polarizing beam splitter (PBS) can be represented by Equation (1).

$$E_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

The PBS separates the beam into a horizontally linearly polarized light component and a vertically linearly polarized light component. This can be explained using Jones matrix theory, represented by Equations (2) and (3).

$$T_{PBSt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_{PBSr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Here, T_{PBSt} and T_{PBSr} denote the transmission and reflection components of the horizontally and vertically polarized beams, respectively. Thus, the electric field of the transmitted beam E_{aT} passing through the PBS can be calculated using Equation (4).

$$E_{aT} = T_{PBSt} \cdot E_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Similarly, the electric field of the reflected beam E_{aR} passing through the PBS is given by Equation (5).

$$E_{aR} = T_{PBSr} \cdot E_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

From Equations (4) and (5), E_{aT} and E_{aR} represent beams parallel and perpendicular to the PBS axis, respectively. These two beams then experience phase retardation differences. The E_{aT} beam is reflected by a mirror (M1) and directed towards a piezoelectric transducer (PZT), which is attached to another mirror (M2) for frequency modulation adjustments. Therefore, the light reflected by M1 and PZT (M2) before exiting the PBS can be described by Equation (6).

$$E_{aT'} = PBS \cdot M_1 \cdot PZT(M_2) \cdot E_{aT} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{i[\delta_x + \delta_x(t)]} \quad (6)$$

where δ_x , δ_y and $\delta_x(t)$, $\delta_y(t)$ represent the phase shifts induced by the reflections at M1 and PZT (M2), respectively. Conversely, the electric field of the E_{aR} beam can be calculated using Equation (7).

$$E_{aR'} = PBS \cdot PZT(M_2) \cdot M_1 \cdot E_{aR} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i[\delta_y + \delta_y(t)]} \quad (7)$$

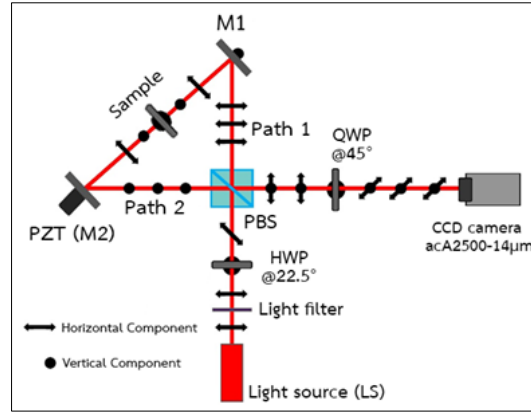


Figure 1: Triangular Sagnac interferometer structure

Both beams recombine at the PBS and are then directed towards a quarter-wave plate (QWP) set at 45°. At this stage, the beams are converted into linearly polarized light. The Jones vector representation of the output electric field can be calculated using Equation (8).

$$E_{out} = Q \cdot E_{aT'} + Q \cdot E_{aR'} \quad (8)$$

where Q represents the Jones matrix of the QWP, given by Equation (9).

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

By substituting Equations (6) – (9) into Equation (8), the output of electric field under Jones vector theory is obtained as Equation (10).

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \sin(\delta_y - \delta_x + \delta_y(t) - \delta_x(t)) \\ \cos(\delta_y - \delta_x + \delta_y(t) - \delta_x(t)) \end{bmatrix} e^{\frac{i}{2}(\delta_y + \delta_x + \delta_y(t) + \delta_x(t) - \frac{\pi}{2})} \quad (10)$$

When the two beams recombine at the interferometer's output, they form perfectly rotating linearly polarized light.

The mathematical results obtained can be used to study the characteristics of rotating linearly polarized light. The output intensity of this light is related to the modulation frequency and the angle (θ) of the polarizer (P). The intensity component of the rotating linearly polarized light can be determined by Equations (11)

$$E_{\theta} = P(\theta) \cdot E_{out} \quad (11)$$

$$E_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} (\sin \theta + \cos \theta) \begin{bmatrix} e^{i\theta} \\ i e^{-i\theta} \end{bmatrix} e^{\frac{i}{2}(\delta_y + \delta_x + \delta_y(t) + \delta_x(t) - \frac{\pi}{2})}$$

$$I_{polarizer}^{\theta} = E_{\theta} \cdot E_{\theta}^* = \frac{1}{4} (1 + \sin 2\theta)^2 \quad (12)$$

where E_{θ} and $P(\theta)$ represent the Jones vector output of the light and the angle of the polarizer, respectively. Equation (12) $I_{polarizer}^{\theta}$ expresses the intensity of the rotating linearly polarized light as a function of $0 - 2n\pi$ (in radians) and the modulation frequency.

2. Classification of Optical Devices Using the Sagnac Interferometer Structure

Next, optical device samples are placed into the Sagnac interferometer experimental setup. The samples include a polarizer and a half-wave plate (HWP), with their output light intensities calculated and presented in Table 1.

Table 1: Output light intensity based on optical device type

Optical Device	Output Light Intensity
Polarizer	$I_{polarizer}^{\theta} = \frac{1}{4}(1 + \sin 2\theta)^2$
HWP	$I_{HWP}^{\theta} = \sin^2 2\theta$

where θ represents the angle of the optical device sample, and E denotes the amplitude of the incident light.

3. Generation of Perfectly Rotating Linearly Polarized Light

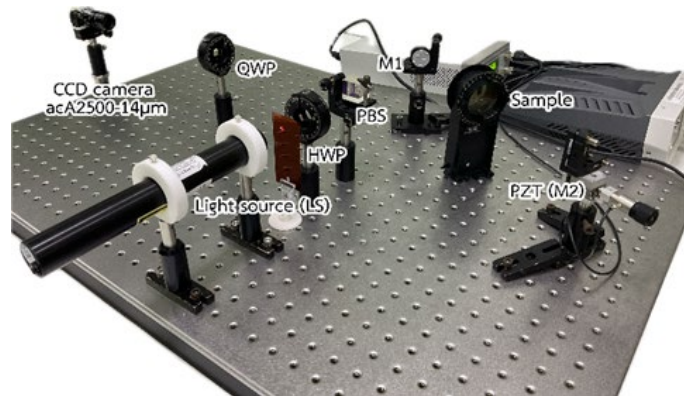


Figure 2: Experimental setup for generating perfectly rotating linearly polarized light using a triangular Sagnac interferometer

As shown in Figure 2, the experimental setup consists of a laser light source that emits horizontally linearly polarized light with a wavelength of 632.8 nm. This horizontally polarized light at 0 degrees passes through a light filter to reduce its intensity. The beam then passes through a half-wave plate (HWP) set at 22.5 degrees, which tilts the polarization to 45 degrees. When the polarized light is tilted at 45 degrees, it contains both horizontal and vertical polarization components. The beam then enters a polarizing beam splitter (PBS), which separates it into horizontally and vertically polarized beams. The horizontally polarized component passes through the pbs, while the vertically polarized component is reflected. The horizontally polarized light passing through the pbs is directed toward mirror1, where it is reflected and then reaches the PZT (M2), which induces phase modulation, causing the light to rotate. The vertically polarized light reflected by the pbs is directed toward PZT (M2), where it also undergoes phase modulation before being reflected toward mirror 1. After these interactions, both horizontally and vertically polarized beams are reflected back to the pbs, forming rotating orthogonal polarized light. When this light passes through a quarter-wave plate (QWP) set at 45 degrees, it is converted into left-hand and right-hand circularly polarized light. Finally, these circularly polarized components combine to form linearly polarized light.

4. Python Program

Writing a Python program requires defining variables to calculate light propagation equations, plotting graphs to display light intensity, and simulating images derived from the calculations. Therefore, the variables based on Jones matrix theory can be analyzed and written as follows:

Python

```
Linear_Horizontal = np.array([[1, 0]])
HWP = (1/np.sqrt(2))*np.array([[1, 1], [1, -1]])
PBST = np.array([[1+0j, 0], [0, 0j]])
PBSR = np.array([[0j, 0], [0, (1+0j)]])
PZT = np.array([[1, 0], [0, i]]) ;
M2 = np.array([(1+0j), 0], [0, (1+0j)])
QWP = (1/np.sqrt(2))*np.array([(1+0j), 1j], [1j, (1+0j)])
```

5. Python Program Process

Define variables for optical device equations, then compute the equation for perfectly rotating linearly polarized light. Next, plot images for comparison with pictures captured by a CCD camera, acA2500- μm . Finally, plot a graph to examine the intensity of the light.

6. Learning with a Convolutional Neural Network (CNN) Model

A CNN is a type of artificial neural network that simulates human vision by analyzing an image as small regions and combining them to detect patterns. The CNN model is used to determine whether the analyzed light is perfectly rotating linearly polarized light.

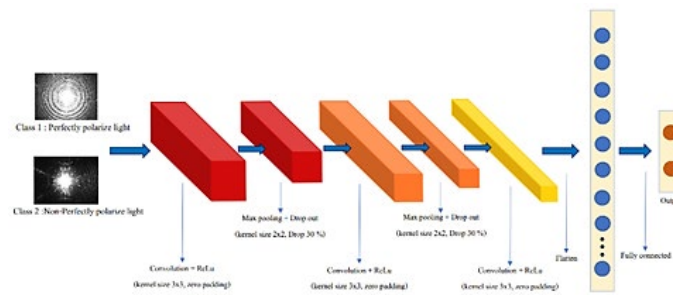
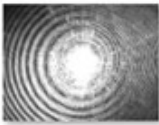
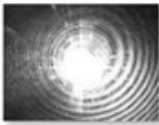
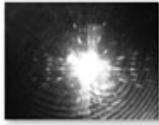
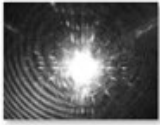


Figure 3: Convolutional neural network model

To utilize a CNN model for verifying perfectly rotating linearly polarized light, multiple interference fringe images must be collected using a CCD camera (acA2500- μm). The CNN is trained to recognize and classify the characteristics of the light. To achieve this, images of both perfectly polarized and imperfectly polarized light are collected, creating two classes: Class 1: Perfectly polarized light, labeled as [1] and Class 2: Imperfectly polarized light, labeled as [0]. The CNN model is trained with 500 images, while 50 images are used for testing, as shown in Table 2.

Table 2: Examples of perfectly polarized and imperfectly polarized light

Perfectly linearly polarize light	None-Perfectly linearly polarize light
 	 
1[1].bmp 2[1].bmp	1[0].bmp 2[0].bmp

7. CNN Model Learning Process

The polarized light from the experimental setup is categorized into two classes: perfectly polarized and imperfectly polarized. The CNN model is trained to distinguish between these two classes. After training is complete, test images of polarized light are inputted into the model to determine whether they belong to the class of perfectly polarized light.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Testing Sample Images of Perfectly and Imperfectly Linearly Polarized Light

Images of perfectly rotating linearly polarized light were captured using a CCD camera (acA2500- μm), as shown in Figure 4.

Next, a simulation of perfectly rotating linearly polarized light was conducted using Python. The resulting image exhibits interference fringes similar to those in Figure 4, which were obtained using the CCD camera (acA2500- μm). The two images were compared, and Python was used to plot the intensity graph of light from angles $0 - 2\pi$ radians, as shown in Figure 5, along with the intensity distribution for different axes in Figure 6.

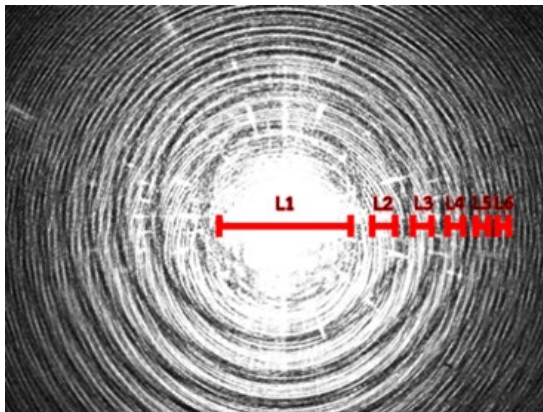


Figure 4: Perfectly rotating linearly polarized light captured by CCD camera acA2500- μm

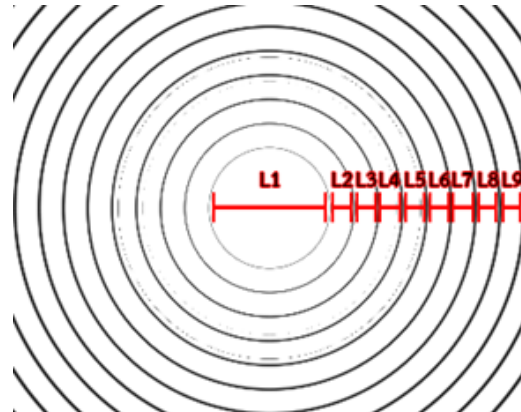


Figure 5: Simulated perfectly rotating linearly polarized light consistent with Jones matrix calculation in Python, Showing Interference fringes from $0 - 2\pi$ radians

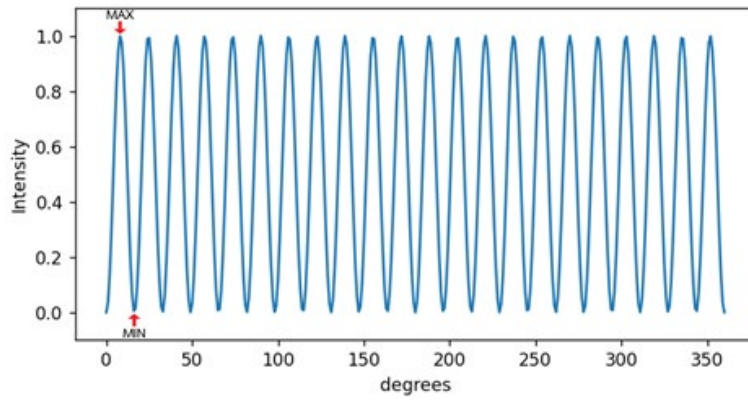


Figure 6: Intensity of perfectly rotating linearly polarized light from $0 - 2\pi$ radians

From Figure 6, the intensity graph of perfectly rotating linearly polarized light shows that intensity varies at different angles. The maximum intensity for perfectly polarized light is 1.0 while the lowest intensity for imperfectly polarized light is 0.0.

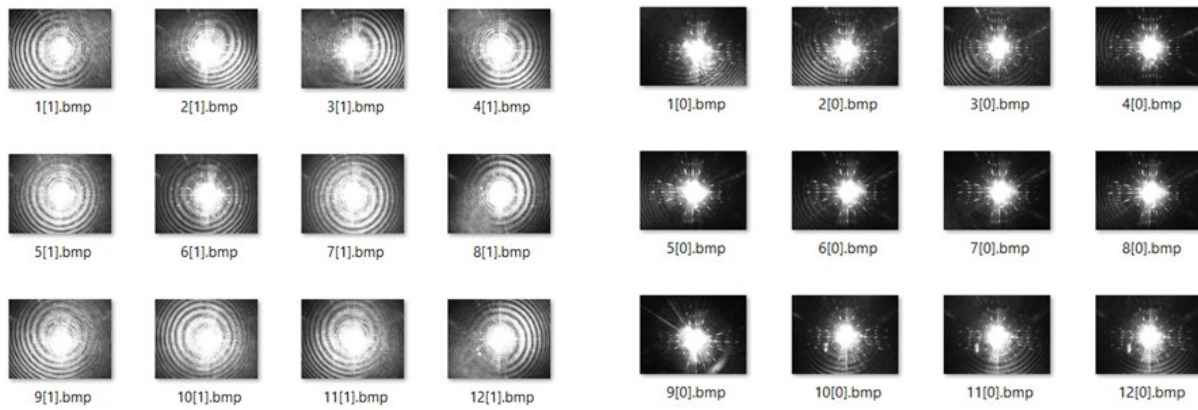


Figure 7: Perfectly rotating linearly polarized light, with the value in [] being 1, indicating a perfectly polarized image

Figure 8: Imperfectly rotating linearly polarized light, with the value in [] being 0, indicating an imperfectly polarized image

In Figure 7, 50 sample images of perfectly rotating linearly polarized light were tested in the Python program. The program successfully classified all images with 100% accuracy. Similarly, in Figure 8, 50 sample images of imperfectly polarized light were tested and the Python program accurately classified them as imperfectly polarized with 100% accuracy.

2. Classification of Perfectly Rotating Linearly Polarized Light with Samples at Angles 0 45 90 and 135 Degrees using a CNN Model

2.1 Classification of Polarizer Samples at 0 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs. With each epoch, accuracy improved while error decreased. This training allowed the CNN model to classify and recognize test images of different samples. The test was conducted using sample images at 0 degrees, which were previously unseen by the CNN model. The trained model successfully identified these samples as 0 degree polarizers as shown in Figure 9.

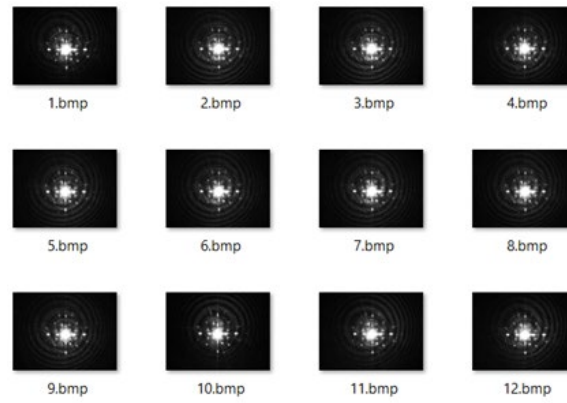


Figure 9: Polarizer at 0 degrees

From Figure 9, 50 sample images of light from a Polarizer at an angle of 0 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of a Polarizer at 0 degrees with an accuracy of 100%.

2.2 Classification of Polarizer Samples at 45 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs. Accuracy increased while error decreased during training. The model was tested on previously unseen sample images at 45 degrees, and it correctly classified them, as shown in Figure 10.

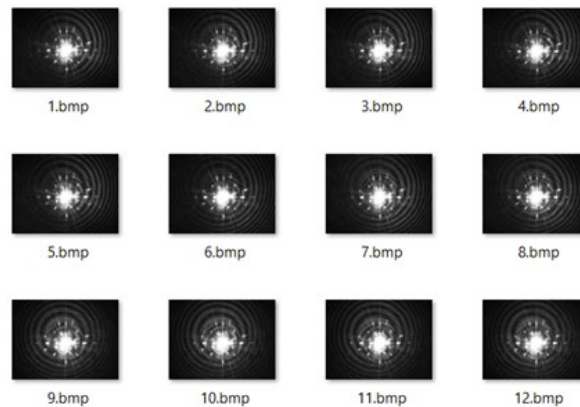


Figure 10: Polarizer at 45 degrees

From Figure 10, 50 sample images of light from a Polarizer at an angle of 45 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of a Polarizer at 45 degrees with an accuracy of 100%.

2.3 Classification of Polarizer Samples at 90 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs. It was then tested on unseen images at 90 degrees. The model successfully identified these images as 90 degree polarizers, as shown in Figure 11.

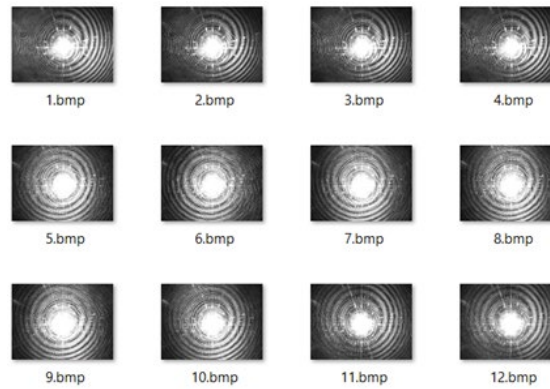


Figure 11: Polarizer at 90 degrees

From Figure 11, 50 sample images of light from a Polarizer at an angle of 90 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of a Polarizer at 90 degrees with an accuracy of 100%.

2.4 Classification of Polarizer Samples at 135 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs. The trained model was tested on previously unseen 135 degree samples and correctly classified them, as shown in Figure 12.

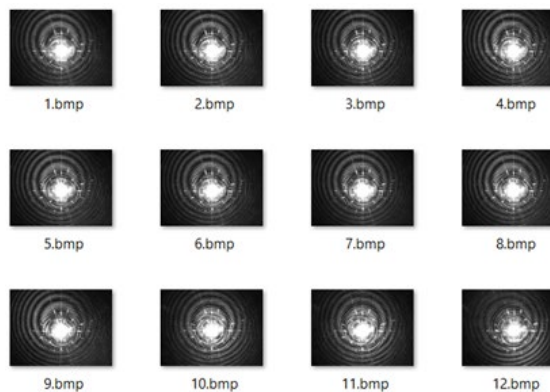


Figure 12: Polarizer at 135 degrees

From Figure 12, 50 sample images of light from a Polarizer at an angle of 135 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of a Polarizer at 135 degrees with an accuracy of 100%.

2.5 Classification of Half-Wave Plate (HWP) Samples at 0 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs and then tested on previously unseen HWP samples at 0 degrees. The trained model successfully classified them, as shown in Figure 13.

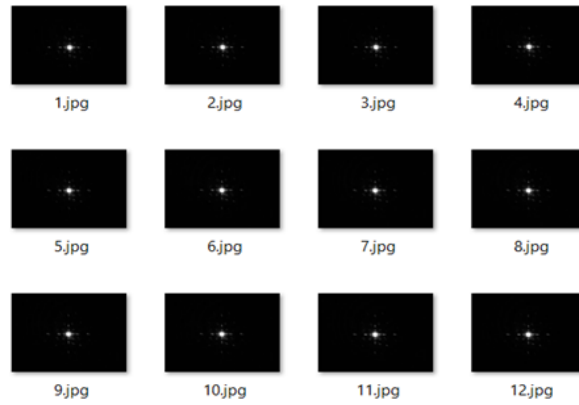


Figure 13: HWP at 0 degrees

From Figure 13, 50 sample images of light from HWP at an angle of 0 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of HWP at 0 degrees with an accuracy of 100%.

2.6 Classification of Half-Wave Plate (HWP) Samples at 45 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs. The trained model was tested on previously unseen 45 degree HWP samples and successfully identified them, as shown in Figure 14.

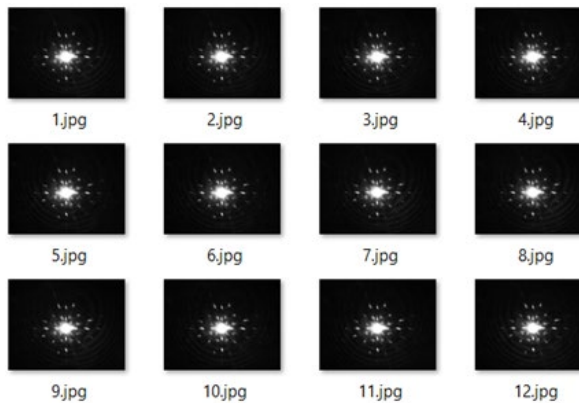


Figure 14: HWP at 45 degrees

From Figure 14, 50 sample images of light from HWP at an angle of 45 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of HWP at 45 degrees with an accuracy of 100%.

2.7 Classification of Half-Wave Plate (HWP) Samples at 90 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs. It was then tested on previously unseen 90 degree HWP samples and correctly classified them, as shown in Figure 15.

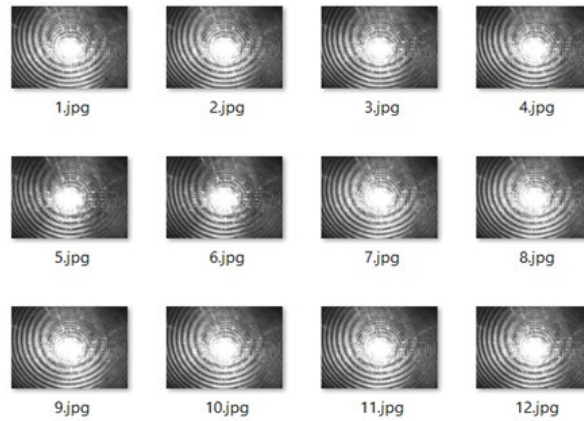


Figure 15: HWP at 90 degrees

From Figure 15, 50 sample images of light from HWP at an angle of 90 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of HWP at 90 degrees with an accuracy of 100%.

2.8 Classification of Half-Wave Plate (HWP) Samples at 135 Degrees: The CNN model was trained by 500 sample images for 150 epochs. The trained model was tested on previously unseen 135 degree HWP samples and correctly classified them, as shown in Figure 16.

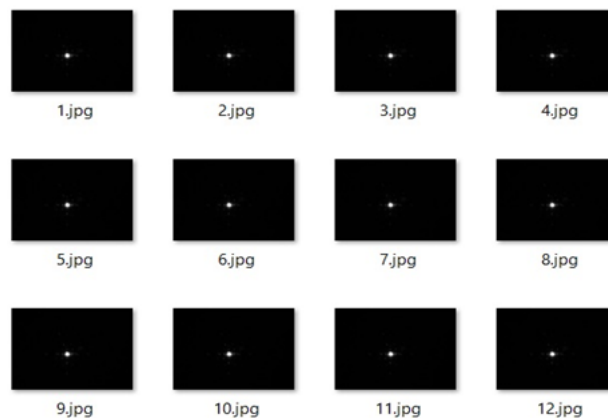


Figure 16: HWP at 135 degrees

From Figure 16, 50 sample images of light from HWP at an angle of 135 degrees were tested using a Python program. The program successfully identified them as sample images of HWP at 135 degrees with an accuracy of 100%. Classification of Samples Polarizer and Half Wave Plate at Angles 0, 45, 90, and 135 Degrees It can be observed that training a CNN model to recognize and classify polarizers at different angles is possible due to the variations in light fringes at each angle. At 0 degrees, light passes through the polarizer the least, resulting in minimal light fringes. At 45 degrees, light can pass through the polarizer by half, leading to an increase in light fringes compared to 0 degrees. At 90 degrees, the maximum amount of light passes through, producing the most prominent light fringes. At 135 degrees, the light fringes are comparable to those at 45 degrees, showing similar characteristics.

CONCLUSION

This research presents the use of a Sagnac interferometer to generate perfectly rotating linearly polarized light with high precision and stability, using fewer components than traditional setups. Jones calculus was employed to simulate light behavior, and experimental results closely matched these simulations. A Python-based model confirmed the accuracy of the theoretical predictions. Additionally, a convolutional neural network was developed to classify polarized light and optical components using CCD camera images. The CNN demonstrated high accuracy and is suitable for real-time quality inspection in industrial applications, improving efficiency and reducing human error.

REFERENCES

- [1] R. Kaewon, A. Bhatranand, Y. Jiraksopakun, E. Siwapornsathain, C. Pawong, and R. Chitaree, "Generation of the rotating linearly polarized light using the triangular cyclic interferometer," in *Proc. 29th Int. Tech. Conf. Circuit/Syst. Comput. Commun. (ITC-CSCC)*, Phuket, Thailand, 2014, pp. 546–549.
- [2] R. Kaewon, C. Pawong, A. Bhatranand, and R. Chitaree, "Fast and effective method to distinguish the polarizing components using a polarizing triangular cyclic interferometer," in *Proc. Asia Commun. Photon. Conf. (ACP)*, Shanghai, China, 2014, pp. 1–3.
- [3] R. Kaewon, C. Pawong, A. Bhatranand, and R. Chitaree, "Polarizing triangular cyclic interferometer for characterizing optical samples with birefringent properties," in *Proc. SPIE – Int. Conf. Photon. Solutions*, Prachuap Khiri Khan, Thailand, 2015, Art. no. 96590L, doi: 10.1117/12.2195890.
- [4] S. Sarkar, N. Ghosh, S. Chakraborty, and K. Bhattacharya, "Self-referenced rectangular path cyclic interferometer with polarization phase shifting," *Appl. Optics*, vol. 51, no. 1, pp. 126–132, 2012.
- [5] C. Pawong, R. Chitaree, and C. Soankwan, "The rotating linearly polarized light from a polarizing Mach–Zehnder interferometer: Production and applications," *Opt. Laser Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 461–468, 2011.
- [6] C. Pawong, R. Chitaree, and C. Soankwan, "Investigation of the use of rotating linearly polarized light for characterizing SiO₂ thin-film on Si substrate," in *Proc. Asia Commun. Photon. Conf. Exhib. (ACP)*, Shanghai, China, 2011, pp. 1–8, doi: 10.1117/12.904420.
- [7] B. Kanseri and H. C. Kandpal, "Mathematical formulation for verification of the Fresnel and Arago interference laws using a Mach–Zehnder interferometer," *Optik*, vol. 121, no. 11, pp. 1019–1026, 2010.
- [8] A. Usman, Y. Jiraksopakun, R. Kaewon, C. Pawong, and A. Bhatranand, "The comparison of multi-stepping algorithms for real-time thickness measurement of transparent thin films using polarization settings," *Laser Phys.*, vol. 32, no. 12, 2022, Art. no. 125401.
- [9] A. Usman, A. Bhatranand, Y. Jiraksopakun, R. Kaewon, and C. Pawong, "Real-time double-layer thin film thickness measurements using modified Sagnac interferometer with polarization phase shifting approach," *Photonics*, vol. 8, no. 12, 2021, Art. no. 529, doi: 10.3390/photonics8120529.
- [10] B. Mahesh, "Machine learning algorithms – A review," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 381–386, 2020.
- [11] J. D. Kothari, "A case study of image classification based on deep learning using TensorFlow," *Int. J. Innov. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 3888–3892, 2018.
- [12] I. Castiglioni et al., "AI applications to medical images: From machine learning to deep learning," *Physica Medica*, vol. 83, pp. 9–24, 2021.
- [13] A. Serag et al., "Translational AI and deep learning in diagnostic pathology," *Front. Med.*, vol. 6, 2019, doi: 10.3389/fmed.2019.00185.
- [14] R. Kaewon, K. Kittawee, J. Wongbongkotpaisan, and A. Bhatranand, "Validation of perfectly rotating polarized light using Sagnac interferometry: A comparison of Python simulations and machine learning technique," in *Proc. Int. Conf. Photon. Solutions (ICPS)*, Bangkok, Thailand, 2024, Art. no. 135180M, doi: 10.1117/12.3058666.

The Construction of a Newsvendor Model Based on Conditional Value at Risk (CVaR) and the Determination of Optimal Order Quantity

Meijia Wang¹ Adisak Sangsongfa² Noppadol Amdee^{3*}

^{1,2,3*}*Department of Industrial Technology Management, Faculty of Industrial Technology,
Muban Chom Bueng Rajabhat University, Ratchaburi, Thailand*

*Corresponding author e-mail: noppadolamd@mcru.ac.th

Received: 19 June 2025; Revised: 25 October 2025; Accepted: 24 November 2025

Published online: 27 April 2026

Abstract

To address the growing uncertainty in demand for electric vehicles in the market, this article develops an extended CVaR Newsvendor model. Compared to existing Newsvendors, there are two contributions: (i) embedding both risk aversion and loss aversion in utility-oriented objectives; (ii) handling limited additions using the “three scenarios” (no stockouts/no additions, no stockouts/limited additions, and stockouts/limited additions). Based on 12 months of data from a single retailer, the model was calibrated under a normal distribution demand and fixed cost structure, and evaluated using a Monte Carlo simulation. The model had a high fitting degree (98.08%) and a low root mean square absolute error (0.8 vehicles). This study assumes a single cycle and a single project, with parameters considered stable during the sample period, and does not explicitly incorporate exogenous factors such as policies and input prices. These assumptions limit the research's generality, but clarify how to adjust the framework in practice through scenario-based parameter tuning.

Keywords: Conditional Value at Risk (CVaR), Electric vehicle supply chain, Inventory management, Newsvendor model, Risk management

INTRODUCTION

In the context of rapid global economic development, supply chain management has become a key factor for enterprises in various industries to maintain competitiveness. [1]. Inventory optimization, as the core link in supply chain management, aims to improve the efficiency of the supply chain and minimize total operating costs through effective inventory control strategies [2]. However, due to the increasing instability of market demand, traditional inventory management methods are facing severe challenges, especially in industries such as electric vehicles [3], information technology, communication, and artificial intelligence, where technology updates quickly and policies have a significant impact.

The electric vehicle business is a new and rapidly growing sector fueled by technological advancements and government policy support, which causes market demand to fluctuate significantly [4]. Empirical studies have shown that macroeconomic policy uncertainty significantly disrupts the inventory behavior and replenishment pace of enterprises, increasing the decision-making pressure on inventory management [5]. To preserve supply chain continuity and market competitiveness in a highly volatile market, businesses must make more informed inventory decisions [6]. Therefore, it becomes especially crucial to find an efficient way to handle market unpredictability and optimize inventory management in the supply chain for electric vehicles [7].

Conventional methods for managing inventory, which include well-known models such as the Newsvendor model and the Economic Order Quantity (EOQ) model, often rely on static assumptions about market demand, meaning they do not account for changes over time. These models primarily focus on maximizing profits or minimizing costs, which sounds good in theory. However, these approaches often fall short when it comes to addressing the actual high-demand volatility that is prevalent in the electric car industry. This is particularly true in highly volatile markets, where businesses may be exposed to substantial financial risks. This situation creates a challenge that the conventional models do not adequately address, leaving many businesses to struggle with uncertainty and unpredictability in their inventory management practices. New decision models must be implemented to enhance the resilience and effectiveness of inventory management, enabling better handling of uncertainty and the need for risk management. To handle demand fluctuations and market uncertainty, Garvey and Carnovale suggested a novel “Rippled Newsvendor Model” to optimize inventory management methods in the face of risk propagation along the supply chain [8].

Due to its emphasis on tail risk, the Conditional Value at Risk (CVaR) model has been widely adopted in financial risk management as a sophisticated risk management tool. A fresh viewpoint and analytical justification for inventory decisions in supply chain management are offered by incorporating the CVaR model into the Newsvendor model. When faced with high risks, the CVaR-based Newsvendor model can help businesses make more robust inventory decisions and better manage market demand unpredictability [5]. Consequently, there is substantial theoretical and practical benefit in researching the development of a CVaR-based Newsvendor model [9].

This study aims to construct an extended newsvendor model under the CVaR decision criterion, focusing on inventory optimization in the electric vehicle supply chain. Based on this core objective, this article implements the following testable sub-objectives:

Theoretical objective: To derive an analytical expression for utility type CVaR and provide its calculation criteria given a cost structure and demand setting; Provide an analytical solution for the optimal order quantity and the



first-order optimality conditions, explaining the existence, uniqueness (under the given conditions), and applicable scenarios.

Solution objective: Based on the above analytical results, form an achievable solution process for calculating Q^* monthly and output ordering decisions that are consistent with maximizing utility CVaR.

Verification objective: Based on the actual sales data of a specific electric vehicle retailer for 12 consecutive months, conduct numerical verification of the model, report Root Mean Squared Absolute Error (RMSAE) and fitting degree, to test the accuracy and robustness during the sample period.

Management significance: Based on empirical evidence, combined with model output, provide ordering strategy recommendations that match business constraints, and provide actionable support for inventory optimization decisions in the electric vehicle supply chain under demand uncertainty.

LITERATURE REVIEW

1. Basic Theories of Risk Aversion and Loss Aversion

In the realms of behavioral economics and decision theory, risk aversion and loss aversion stand as two principal concepts. In the face of uncertainty, the tendency of a decision-maker to opt for safer choices, despite lower expected returns, is termed risk aversion. Often used in the fields of management, economics, and finance, this idea elucidates why people and organizations tend to choose more prudent strategies over choices with higher risks and possible benefits. To forecast how individuals or organizations will behave in unpredictable situations, the traditional Expected Utility Theory employs a risk aversion coefficient to quantify this propensity.

A fundamental idea in behavioral economics, loss aversion, was first proposed by Kahneman and Tversky in Prospect Theory [10]. It explains how people tend to avoid losses rather than seek profits when making decisions because they are more sensitive to losses than to similar benefits. Numerous economic activities, including business risk management, consumer choices, and investment decisions, have empirical support for this phenomenon. Loss aversion in management explains why businesses use cautious tactics when things are unclear, to prevent possible financial losses, even if doing so would restrict profit growth.

Risk and loss aversion have a significant influence on businesses' inventory choices in supply chain management [3]. When faced with supply chain disruption threats and market demand uncertainties, firms frequently display strong inclinations toward risk and loss aversion [11]. Despite the possibility of stockouts and lost sales, this practice encourages companies to reduce order quantities to minimize the risk of unsold inventory and potential holding expenses.

2. Risk Management and Supply Chain Inventory Optimization

In supply chain management, risk management is crucial, especially considering the increasing volatility and unpredictability of market demand. Determining the ideal inventory levels in an unpredictable market situation to satisfy customer demand while lowering associated costs is known as inventory optimization, and it is a crucial problem in supply chain management. In traditional inventory optimization frameworks, EOQ [12] is typically solved based on deterministic or stable demand rates and fixed replenishment parameters to minimize long-term average costs; The classic newsvendor model, on the other hand, is specifically designed for single cycle/short lifecycle

scenarios with uncertain (random) demand, balancing excess costs and out of stock costs based on a given demand distribution. The limitations of the newsvendor model are mainly due to the simplification of the distribution form and parameter stability, single-period setting, and the handling of extreme tail situations and additional constraints. Therefore, when facing intensified demand fluctuations and rising tail risks, the traditional approach of relying solely on minimizing expected costs may underestimate downside risks, and there is an urgent need to introduce tail risk measures such as CVaR to enhance the robustness of decision-making.

The integration of risk management into supply chain inventory optimization has been the subject of a growing amount of research in recent years [5]. These models have gradually included risk and loss aversion as essential determinants of decision-making. In their study of supply chain inventory optimization under demand uncertainty, for instance, Taghizadeh and Venkatachalam suggested the best inventory techniques for varying degrees of risk aversion [13]. A study by Venkataraman and Asfaw [14] examined how manufacturers create contracts to address retailers' loss aversion in a supply chain with risk-neutral manufacturers and loss-aversion retailers.

According to these findings, conventional models that aim to maximize profits or costs might not be applicable in unpredictable situations [15]. More robust inventory management techniques can be designed by considering the decision-maker's risk preferences and loss aversion behavior, which can help prevent financial losses in severe situations. However, these models continue to be complex and challenging to handle when dealing with many risk factors (including price volatility, supply disruptions, and demand variations), and successfully incorporating these risk factors into the models is still a crucial area of ongoing research [9].

3. The Application and Challenges of CVaR Models in Supply Chain Management

To quantify and control tail risk in investment portfolios, the CVaR model was first introduced in the field of financial risk management. Two risk indicators utilized in the Newsvendor Model, Value at Risk (VaR) and CVaR, were thoroughly compared by Jammerneegg and Kischka. They noted that CVaR offers a more thorough risk assessment than traditional VaR, especially when it comes to handling potentially high losses. The application of CVaR in supply chain management was further examined by Jammerneegg and Kischka, who emphasized its increasing acceptance and extensive use in tackling risks, including supply chain interruptions and market demand uncertainty, due to its benefits in managing extreme risks [16].

In the literature on supply chain management, the CVaR model has been extensively applied in various fields, including supply chain contract design, supply chain financing, and inventory management. For instance, to maximize ordering choices in the face of demand uncertainty, Taghizadeh and Venkatachalam included CVaR into the Newsvendor Model. They discovered that the CVaR-based Newsvendor Model provided more reliable inventory management techniques, particularly when demand volatility was significant, as the CVaR model outperformed conventional approaches [17].

Although the CVaR model has considerable potential for supply chain management, certain obstacles still hinder its practical application [5]. Firstly, the CVaR model exhibits comparatively high computational complexity, particularly in supply chains with multiple products and tiers, where it requires a substantial amount of computing power to solve [17]. Another crucial problem is precisely estimating the model's parameters, such as the risk aversion and demand distribution coefficients [18]. The efficacy of inventory decisions may be impacted by biased



model predictions resulting from inaccurate parameter estimation [19]. Furthermore, the suitability of the CVaR model for dynamic situations has not yet been thoroughly confirmed. Further study is needed to determine the robustness of the model in scenarios where supply chain and demand factors are continuously changing [20].

There have been studies introducing CVaR into the newsvendor model, indicating the necessity of using tail risk measurement under stochastic demand; However, there are still three shortcomings in this context as a whole: (1) it mainly focuses on minimizing CVaR in a single stage, and rarely depicts both risk avoidance and loss avoidance in utility oriented objectives, making it difficult to distinguish the policy effects of “tail exposure suppression” and “average loss control”; (2) The handling of the additional ordering mechanism mostly assumes infinite or implicit availability, with less explicit modeling of the three scenario differences caused by the finite additional upper limit M : no shortage/limited addition/shortage and limited addition, resulting in a weakened behavior of tail shortage after the “ $Q+M$ ” truncation; (3) Less monthly indicator validation is conducted on industry data. Based on this, this article proposes in the context of electric vehicle retail: (i) introducing both risk avoidance and loss avoidance into the utility type CVaR objective; (ii) Characterization of the three scenarios surrounding M and their corresponding existence and first-order conditions; (iii) Validation and implementation details description of indicators based on 12 months of real data to fill the gap mentioned above.

METHODS

The average loss that surpasses the VaR at a specific confidence level is known as the CVaR. One risk measurement technique that works well for determining the average loss in extreme situations is CVaR. A more thorough risk assessment is provided by CVaR, which considers the average loss exceeding this threshold, in contrast to VaR, which only considers the loss at the threshold. Businesses can more precisely measure and control supply chain risks by integrating CVaR into electric vehicle supply chain management.

The CVaR formula is expressed as (Equation 1) [21]:

$$CVaR_{\alpha} = \frac{1}{1 - \alpha} \int_{\alpha}^1 VaR_u du \quad (1)$$

Where α is the confidence level, and VaR_u is the VaR at different confidence levels u . At the confidence level α , VaR_{α} is the threshold at which the ‘worst-case scenario’ begins; $CVaR_{\alpha}$ is the average loss of all worse results after crossing this threshold. Therefore, compared to only looking at the VaR of quantiles, CVaR focuses more on the severity of tail conditions and is used to measure the cost exposure caused by “extreme but possible” stockouts or excesses.

CVaR can be calculated by following the steps:

- Determining the VaR value: Calculate the VaR value for a given confidence level α .
- Identify losses that exceed VaR: Find all loss values that exceed VaR.
- Calculate CVaR: Average all loss values that exceed VaR to get the CVaR value.

A traditional inventory management strategy for deciding what to stock when demand is unknown is the newsvendor model. This work develops an extended CVaR-based newsvendor model by incorporating CVaR, risk

aversion, and loss aversion into the conventional newsvendor model, thereby enhancing risk management in the electric vehicle supply chain.

Confidence level and loss aversion coefficient are used to quantify risk aversion and loss aversion, respectively. Businesses can optimize their inventory management strategy to ensure the stability and dependability of the supply chain by adjusting the confidence level and loss aversion coefficient in the supply chain management of electric vehicles.

For the extended CVaR-based newsvendor model, we have the following assumptions [22]:

- I. The market demand obeys a normal distribution.
- II. Initial ordering costs are lower than additional ordering costs.
- III. Retailers may place additional orders during the sales cycle, subject to a maximum number of further orders.
- IV. Commodity sales and recovery prices are known and fixed.
- V. Retailers are risk-averse and loss-averse.

This article approximates the demand using a normal distribution as a working hypothesis for parametric calibration and simulation evaluation. This approximation facilitates the derivation of clear first-order optimality conditions and reduces the complexity of the solution. At the same time, the evaluation and conclusions of the model are given within this assumption framework, and the scope of application is limited based on this premise. Simultaneously setting the initial ordering cost lower than the additional cost reflects an everyday business reality: initial ordering usually enjoys scale and planning advantages, while mid-term additions often come with urgency, small batches, and transportation premiums; From a model perspective, the initial ordering cost being lower than the additional cost avoids the degenerate solution of “all dependence on additional”, making the “beginning mid period” have identifiable cost trade-offs. The above two items only serve as modeling prerequisites for solving and verifying; Therefore, the generalizability of this article is interpreted based on this boundary condition, and other distribution forms or different cost relative relationships are not within the scope of this study.

The objective of expanding the Newsvendor model to consider CVaR is to optimize the usefulness of the CVaR function, which accounts for both risk and loss aversion. The following is the definition of the utility CVaR function (Equation 2):

$$U_{\lambda}^{\mu}(Q) = E[R(Q)] - \lambda \cdot CVaR_{\alpha}(Q) - \mu \cdot L(Q) \quad (2)$$

Where Q is the order quantity (assuming that the order quantity is the retailer's target sales volume), and $E[R(Q)]$ is the subscription volume Q corresponding to the expected revenue, which reflects the revenue that the firm is likely to earn under the order quantity Q which reflects the revenue that the firm is expected to get under the order quantity. The risk aversion coefficient measures the degree of risk aversion of the firm. The loss aversion coefficient measures a firm's loss aversion and represents the CVaR at the confidence level, which is the average loss over the VaR.

$L(Q)$ is a loss function to quantify the loss due to demand uncertainty and can be expressed as (Equation 3):

$$L(Q) = E[\max(0, D - Q)] \quad (3)$$

The objective of maximizing utility CVaR is to determine the optimal ordering quantity and construct the corresponding objective function. The specific formula is (Equation 4):

$$\max U_{\lambda}^{\mu}(Q) = \max\{E[R(Q)] - \lambda \cdot CVaR_{\alpha}(Q) - \mu \cdot L(Q)\} \quad (4)$$

Suppose that p is the selling price of the goods, c is the initial ordering cost, r is the out-of-stock penalty cost, and D is the random demand. Then $E[R(Q)]$ can be expressed as (Equation 5):

$$E[R(Q)] = pQ - cQ - rE[\max(0, D - Q)] - hE[\max(0, Q - D)] \quad (5)$$

Theorem 1: In the extended newsvendor model based on CVaR and loss aversion criterion, the optimal ordering quantity of the risk-aversion retailer Q^* should satisfy the following conditions (Equation 6):

$$Q^* = \operatorname{argmax}\{E[R(Q)] - \lambda \cdot CVaR_{\alpha}(Q) - \mu \cdot L(Q)\} \quad (6)$$

Proof: Assume that the market demand D distribution function of F , CVaR is defined as when loss aversion and non-zero stock-out costs are also considered (Equation 7):

$$CVaR_{\alpha}(Q) = \max\left\{v + \frac{1}{1-\alpha} E[U(pQ - cQ - r \cdot (D - Q)^+ - h \cdot (Q - D)^+ - v)^+]\right\} \quad (7)$$

Where v is the utility threshold, and h is the inventory holding or depreciation cost, $(\cdot)^+ = \max\{0, \cdot\}$. $U = u(\pi)$ is the loss aversion utility function, denoted as (Equation 8):

$$U(\pi) = \begin{cases} \pi - \pi_0, & \pi \geq \pi_0 \\ \mu(\pi - \pi_0), & \pi < \pi_0 \end{cases} \quad (8)$$

Where π_0 denotes the target return.

Combining the gain function, loss function, and CVaR function, the objective function is constructed as (Equation 9):

$$\max U_{\lambda}^{\mu}(Q) = \max\left\{E[R(Q)] - \lambda \cdot \max\left\{v + \frac{1}{1-\alpha} E[U(pQ - cQ - r \cdot (D - Q)^+ - h \cdot (Q - D)^+ - v)^+]\right\} - \mu \cdot L(Q)\right\} \quad (9)$$

In order to analyze in detail the performance of the extended newsvendor model under different demand conditions, it is divided into three scenarios based on the relationship between demand D , initial order quantity Q , and the upper limit M that can be added (this article sets the upper limit M as the constraint for adding orders). In each scenario, the price p , initial ordering cost c , additional cost s , out of stock penalty r , risk parameters α , λ , μ and upper limit M remain unchanged from the demand distribution parameters, and only the random demand D and the induced additional quantity X and the resulting costs change. The division of the three paragraphs allows us to see clearly which type of cost dominates when adjusting Q and M , and thus understand the marginal impact of “adding one point ordering” in the first-order optimal condition.

Through a detailed examination of each scenario, a more accurate objective function can be constructed to determine the optimal order quantity Q^* . The following is a detailed discussion of the three scenarios. The details are as follows:

1) $D \leq Q$: In this case, no stock-outs will occur, and only the inventory cost and utility function need to be considered $U(\pi)$.

This is obtained:

The expected return function (Equation 10),

$$E[R(Q)] = pQ - cQ - hE(Q - D) \quad (10)$$

The loss function (Equation 11),

$$L(Q) = hE(Q - D) \quad (11)$$

The CVaR function (Equation 12),

$$CVaR_{\alpha}(Q) = \max \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[U(pQ - cQ - h \cdot (Q - D) - v)^+] \right\} \quad (12)$$

Since the utility function is assumed $U(\pi)$ to be linear, it is known from the utility function.

$$CVaR_{\alpha}(Q) = \max \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(pQ - cQ - h(Q - D) - v)^+] \right\} \quad (13)$$

The objective function is obtained as

$$\max_Q U_{\lambda}^{\mu}(Q) = \max_Q \left\{ pQ - cQ - hE[Q - D] - \lambda \cdot \max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(pQ - cQ - h(Q - D) - v)^+] \right\} - h\mu(Q - D) \right\} \quad (14)$$

Because

$$U_{\lambda}^{\mu n}(Q) = pQ - cQ - hE[Q - D] - \lambda \cdot \max_v \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[(pQ - cQ - h(Q - D) - v)^+] \right\} - h\mu(Q - D) \quad (15)$$

$$\therefore \frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - h \cdot \frac{dE[Q-D]}{dQ} - \lambda \cdot \frac{d}{dQ} \max_{v \in R} \left(v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[(pQ - cQ - h(Q - D) - v)^+] \right) - h\mu$$

included among these: $\frac{dE[Q-D]}{dQ} = \frac{d}{dQ} \int_0^Q (Q - D)f(D) dD = F(Q)$

Suppose: $\max_{v \in R} \left(v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[(pQ - cQ - h(Q - D) - v)^+] \right)$ is used in $v = v^*$ take the maximum value.

v^* is the optimal threshold for calculating CVaR. For a given Q , the v^* following conditions are satisfied (Equation 16):

$$v^* = \max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(pQ - cQ - h(Q - D) - v)^+] \right\} \quad (16)$$

Again: $\frac{d}{dQ} (pQ - cQ - h(Q - D) + v) = p - c - h$

we get

$$\frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - h \cdot F(Q) - \frac{\lambda}{1-\alpha} E[p - c - h] - h\mu \quad (17)$$

Let $\frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = 0$, i.e.

$$\frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - h \cdot F(Q) - \frac{\lambda}{1-\alpha} E[p - c - h] - h\mu = 0$$

Further simplification and collation give,

$$F(Q) = \frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda) - \lambda h}{h(\alpha - 1)} - \mu \quad (18)$$

Principle

$$Q^* = F^{-1} \left[\frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda) + \lambda h}{h(1 - \alpha)} - \mu \right] \quad (19)$$

2) $Q < D \leq Q + M$: In this case, the cost of additional order quantities and out-of-stock penalties need to be considered.

From this, it is obtained:

The expected return function (Equation 20)

$$E[R(Q)] = pQ - cQ - rE(D - Q) - sE(D - Q) \quad (20)$$

where s is the unit cost of the additional order quantity.

Loss function (Equation 21)

$$L(Q) = E(D - Q) \quad (21)$$

CVaR function (Equation 22)

$$\begin{aligned} CVaR_{\alpha}(Q) &= \max_Q \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(U(pQ - cQ - r \cdot (D - Q)^+ - h \cdot (Q - D)^+) - v)^+] \right\} \\ &= \max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(U(pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v))^+] \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

Thus, the objective function is obtained as (Equation 23)

$$\max_Q U_{\lambda}^{\mu}(Q) = \max_Q \left\{ pQ - cQ - rE(D - Q) - sE(D - Q) - \lambda \cdot \max_Q \left(v + \frac{1}{1-\alpha} E[(U(pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v))^+] \right) - \mu \cdot E(D - Q) \right\} \quad (23)$$

because

$$U_{\lambda}^{\mu}(Q) = pQ - cQ - rE(D - Q) - sE(D - Q) - \lambda \cdot \max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v]^+ \right\} - \mu \cdot E(D - Q) \quad (24)$$

$$\therefore \frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - r \cdot \frac{dE(D-Q)}{dQ} - s \cdot \frac{dE(D-Q)}{dQ} - \lambda \cdot \frac{d}{dQ} \max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v]^+ \right\} - \mu \cdot \frac{dE(D-Q)}{dQ}$$

included among these

$$\frac{dE[D-Q]}{dQ} = \frac{d}{dQ} \int_Q^{Q+M} (D - Q)f(D) dD = f(Q + M) \cdot M - \int_Q^{Q+M} f(D) dD = f(Q + M) \cdot M - F(Q + M) + F(Q)$$

$$\therefore \frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - (r + s + \mu)[f(Q + M) \cdot M - F(Q + M) + F(Q)] - \lambda \cdot \frac{d}{dQ} \max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v] \right\} \quad (25)$$

Assuming that

$$\max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v] \right\}$$

is at the optimal point, the maximum value is taken. For a given Q, the following condition is satisfied (Equation 26):

$$v^* = \max_{v \in R} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v] \right\} \quad (26)$$

Let $\frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = 0$, and $\frac{d}{dQ} E[pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v^*] = p - c + r + s$

We get

$$\frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - (r + s + \mu)[f(Q + M) \cdot M - F(Q + M) + F(Q)] - \frac{\lambda}{1-\alpha} (p - c + r + s) = 0 \quad (27)$$

$$\therefore \frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda) - \lambda(r + s)}{(r + s + \mu)(1 - \alpha)} = f(Q + M) \cdot M - F(Q + M) + F(Q)$$

In the limiting case, the product of the retailer's utility and loss aversion coefficients is considered to converge to some constant, and one can continue to simplify the above equation to get,

$$\therefore \frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda) - \lambda(r + s)}{(r + s + \mu)(1 - \alpha)} = F(Q) - F(Q + M)$$

When $Q < D \leq Q + M$ order quantity Q and additional quantity M are sufficient to satisfy all the potential demand, it is assumed here that $F(Q + M) = 1$, then

$$F(Q) = 1 + \frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda) - \lambda(r + s)}{(r + s + \mu)(1 - \alpha)} \quad (28)$$

$$\therefore Q^* = F^{-1} \left[1 + \frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda) - \lambda(r + s)}{(r + s + \mu)(1 - \alpha)} \right] \quad (29)$$

3) $D > Q + M$: In this case, it is still necessary to consider the cost of the additional order quantity and the stock-out penalty. Still, in this case, there is an upper limit on the additional order quantity, denoted as M.

This is obtained:

The expected return function (Equation 30),

$$E[R(Q)] = pQ - cQ - sM - rE[D - (Q + M)] \quad (30)$$

The loss function (Equation 31),

$$L(Q) = E[D - (Q + M)] \quad (31)$$

The CVaR function (Equation 32)

$$CVaR_{\alpha}(Q) = \max_{v \in \mathbb{R}} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[(U(pQ - cQ - sM - rE[D - (Q + M)] - v))^+] \right\} \quad (32)$$

Thus, the objective function is obtained as (Equation 33)

$$\max_Q U_{\lambda}^{\mu}(Q) = \max_Q \left\{ pQ - cQ - sM - rE[D - (Q + M)] - \lambda \cdot \max_Q \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[(U(pQ - cQ - sM - r \cdot E[D - (Q + M)] - v))^+] \right\} - \mu \cdot E[D - (Q + M)] \right\} \quad (33)$$

$$\therefore U_{\lambda}^{\mu}(Q) = pQ - cQ - sM - rE[D - (Q + M)] - \lambda \cdot \max_Q \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} \cdot E[(U(pQ - cQ - sM - r \cdot E[D - (Q + M)] - v))^+] \right\} - \mu \cdot E[D - (Q + M)] \quad (34)$$

included among these

$$\frac{dE[D - (Q + M)]}{dQ} = \frac{d}{dQ} \int_{Q+M}^{+\infty} (D - (Q + M))f(D) dD = F(Q + M) - 1$$

$$\therefore \frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - (r + \mu)(F(Q + M) - 1) - \lambda \cdot \frac{d}{dQ} \max_Q \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[U(pQ - cQ - sM - r \cdot E[D - (Q + M)] - v)] \right\}$$

Assuming that

$$\max_Q \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[U(pQ - cQ - sM - r \cdot E[D - (Q + M)] - v)] \right\}$$

takes the maximum value at.

For a given Q, the following conditions are satisfied (Equation 35):

$$v^* = \max_Q \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[U(pQ - cQ - sM - r \cdot E[D - (Q + M)] - v)] \right\} \quad (35)$$

$$\text{Let } \frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = 0, \text{ and } \frac{d}{dQ} E[U(pQ - cQ - sM - r \cdot E[D - (Q + M)] - v)] = p - c - r(F(Q + M) - 1)$$

We got (Equation 36)

$$\frac{dU_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ} = p - c - (r + \mu)(F(Q + M) - 1) - \frac{\lambda}{1-\alpha} (p - c - r(F(Q + M) - 1)) = 0 \quad (36)$$

Further simplification and collation give,

$$F(Q + M) = 1 + \frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda)}{(r + \mu)(1 - \alpha) + \lambda r} \quad (37)$$

get

$$Q^* = F^{-1} \left[1 + \frac{(p - c)(1 - \alpha - \lambda)}{(r + \mu)(1 - \alpha) + \lambda r} \right] - M \quad (38)$$

In the extended newsvendor model based on $CVaR_{\alpha}$ and the loss aversion criterion, the optimal order quantity Q^* for a risk-aversion retailer should satisfy the following conditions (Equation 6):

By optimizing the objective function, the optimal ordering quantity Q^* calculated by combining the above three scenarios, respectively, is as follows:

$$Q^* = \begin{cases} F^{-1} \left[\frac{(p-c)(1-\alpha-\lambda) + \lambda h}{h(1-\alpha)} \right] - \mu, & D \leq Q \\ F^{-1} \left[1 + \frac{(p-c)(1-\alpha-\lambda) - \lambda(r+s)}{(r+s+\mu)(1-\alpha)} \right], & Q < D \leq Q + M \\ F^{-1} \left[1 + \frac{(p-c)(1-\alpha-\lambda)}{(r+\mu)(1-\alpha) + \lambda r} \right] - M, & D > Q + M \end{cases} \quad (39)$$

Under various demand scenarios, this composite expression illustrates the best ordering approach the store should use to maximize predicted revenue and reduce CVaR. We can effectively ascertain the ideal order amount under various demand scenarios by combining the outcomes of the three scenarios, thereby striking a balance between risk aversion and revenue maximization.

$$U_{\lambda}^{\mu}(Q) = \begin{cases} pQ - cQ - hE[Q - D] - \lambda \cdot \max_{v \in \mathbb{R}} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(pQ - cQ - h(Q - D) - v)^+] \right\} - h\mu(Q - D), & D \leq Q \\ pQ - cQ - rE(D - Q) - sE(D - Q) - \lambda \cdot \max_{v \in \mathbb{R}} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(pQ - cQ - r(D - Q) - s(D - Q) - v)^+] \right\} - \mu \cdot E(D - Q), & Q < D \leq Q + M \\ pQ - cQ - sM - rE[D - (Q + M)] - \lambda \cdot \max_{v \in \mathbb{R}} \left\{ v + \frac{1}{1-\alpha} E[(pQ - cQ - sM - r \cdot E(D - (Q + M)) - v)^+] \right\} - \mu \cdot E[D - (Q + M)], & D > Q + M \end{cases} \quad (40)$$

Testify to the end.

Theorem 1 shows how to solve for the optimal ordering quantity of the risk-aversion retailer given the risk-aversion coefficient λ and the loss-aversion coefficient μ and how to solve for the optimal ordering quantity of the risk-aversion retailer given the risk-aversion factor λ and Q^* .

Next, we aim to prove the uniqueness of the optimal ordering quantity for a given utility function, thereby ensuring the robustness of the model's decisions.

Theorem 2: In the utility function (Equation 2),

Assuming the demand distribution function is continuous, the utility function is a concave function of the order quantity Q , and a unique optimal order quantity Q^* exists.

Proof: Based on Theorem 1, the utility function (Equation 2),

1) $D \leq Q$

In this case, no stock-outs occur, and the entire order quantity meets the demand. From this, we get:

Utility function (Equation 15),

By the proof of Theorem 1, it follows that the first-order derivative (Equation 17).

Then the second-order derivative (Equation 41),

$$\frac{d^2 U_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ^2} = -h \cdot f(Q) \quad (41)$$

$$\because f(Q) > 0$$

$$\therefore \frac{d^2 U_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ^2} = -h \cdot f(Q) < 0 \quad (42)$$

Then the utility function $U_{\lambda}^{\mu}(Q)$, when $D \leq Q$ is a concave function when and there always exists a unique optimal ordering quantity Q^* , the optimal ordering quantity (Equation 19).

2) $Q < D \leq Q + M$: A partial stock-out occurs in this case, and additional orders must be considered.

This is obtained:

utility function (Equation 24),

From the proof of Theorem 1, it follows that the first-order derivative (Equation 27).

In the limit, the product of the retailer's utility and loss aversion coefficients is considered to converge to some constant, and the second-order derivative is solved as (Equation 43),

$$\frac{d^2 U_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ^2} = -(r + s + \mu)[f(Q) - f(Q + M)] \quad (43)$$

It has been assumed that the market demand faced by a product retailer follows a normal distribution, where the normal distribution function $f(x)$ is continuous and symmetric, and both sides of the distribution of $f(x)$ are monotonically increasing and take their maximum value at the peak.

The normal distribution function (Equation 44),

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\gamma)^2}{2\sigma^2}} \quad (44)$$

Where γ denotes the mean and σ denotes the standard deviation of the normal distribution.

$$\therefore f(Q) > f(Q + M)$$

$$\therefore \frac{d^2 U_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ^2} = -(r + s + \mu)[f(Q) - f(Q + M)] < 0$$

Then the utility function $U_{\lambda}^{\mu}(Q)$, when is a concave function when $Q < D \leq Q + M$ and there always exists a unique optimal ordering quantity Q^* , the optimal ordering quantity (Equation 29)

3) $D > Q + M$: In this case, the additional order quantity limit M . is thus obtained:

Utility function (Equation 34)

From the proof of Theorem 1, it follows that the first-order derivative.

Then the second-order derivative (Equation 45)

$$\frac{d^2 U_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ^2} = -\left(r + \mu - \frac{\lambda r}{1 - \alpha}\right) F(Q + M) = \left[\left(\frac{\lambda}{1 - \alpha} - 1\right)r - \mu\right] F(Q + M) \quad (45)$$

According to the practical significance of each parameter, it can be seen that $\left(\frac{\lambda}{1 - \alpha} - 1\right)r - \mu < 0$, and $F(Q + M) > 0$, there are $\frac{d^2 U_{\lambda}^{\mu}(Q)}{dQ^2} < 0$.

Then the utility function $U_{\lambda}^{\mu}(Q)$, when $D > Q + M$ is a concave function when and there always exists a unique optimal ordering quantity Q^* , the optimal ordering quantity (Equation 38)

In summary, the utility function $U_{\lambda}^{\mu}(Q)$ is concave concerning the ordering quantity Q , and a unique optimal ordering quantity Q^* exists.

Under this setting, as the order quantity increases, the weight of out of stock related losses decreases and the holding/additional related costs increase. The objective function exhibits a unimodal shape of “first rising and then falling” (or quasi concave/concave under common distributions), therefore there exists a unique inflection point Q^* , which is not as good as this point in balancing “normal returns” and “tail safety” no matter how many or few it is.

Testify to the end.

By Theorem 1 and Theorem 2, it can be seen that for a risk-aversion and loss-aversion retailer, assuming that the out-of-stock cost is non-zero when its risk aversion, loss aversion coefficients, and other relevant parameters are given, then its unique optimal order quantity Q^* can be obtained by Theorem 1(formula (39), and the objective function can also be obtained by formula (40).

This model not only helps companies make more informed decisions in the face of fluctuating market demand and supply chain disruptions but also enables optimal supply chain management by optimizing inventory management strategies and reducing inventory holding costs and out-of-stock costs.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Data Source and Model Background

To validate the extended Newsvendor model based on CVaR proposed in this article, we selected 12 consecutive months of store sales data from a single brand electric vehicle retailer in Heilongjiang, China, as the validation sample. This data encompasses the entire one-year sales cycle of the region and reflects the typical seasonal fluctuations and sources of uncertainty in the electric vehicle market. On the one hand, factors such as quarterly promotion pace, holidays, and model launches lead to systematic fluctuations in demand in different months; On the other hand, external shocks such as subsidies/policy adjustments, progress of charging facility deployment, supply chain arrival rhythm, and price changes will amplify the asymmetric losses of demand tail risks and stockouts/unsold products in local months. Therefore, the 12-month data includes both regular seasonal patterns and random fluctuations driven by policy and supply and demand disturbances, which aligns with the research objective of measuring tail loss and evaluating order decision robustness using CVaR in this paper.

Table 1: Monthly number of EV units sold by the retailer

Month	Volume of sales
1	27
2	30
3	37
4	34
5	41
6	44
7	37
8	41

Table 1: Monthly number of EV units sold by the retailer (Cont.)

Month	Volume of sales
9	34
10	30
11	27
12	34

Based on the above empirical data, we optimized and validated the monthly order quantity using Python: Pandas was used for data organization and result output, NumPy/SciPy was used for random sampling and distribution fitting, and Matplotlib was used for visualization. Under the Rockafellar Uryasev (R-U) formulation (also known as expected shortage), numerical approximation of $CVaR_\alpha$ is performed based on discrete samples. Based on historical sales data, characterize the demand distribution monthly and establish a sampling scale. Conduct approximately 5000 Monte Carlo samplings per month to evaluate the target value of candidate order quantities. Subsequently, a “grid+local” joint search is employed within a bounded interval proportional to the average monthly demand to determine the optimal order quantity Q^* . The RMSAE and Accuracy, as defined in the article, are then calculated based on this result. This implementation does not have a random seed set, so there may be slight differences in the sampling sequence between different runs. However, the conclusion remains stable within the scale of our problem.

2. RMSAE and Accuracy Validation Method

This paper employs Accuracy and RMSAE as the primary evaluation metrics to assess the fit between the model’s predicted values and the actual sales data. Accuracy measures the relative error between the predicted and actual values, and its formula is as follows (Equation 46):

$$\text{Accuracy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right) \times 100\% \quad (46)$$

Where y_i represents the actual sales data and $\hat{y}_i$ is the model’s predicted optimal order quantity. The closer Accuracy is to 1, the smaller the gap between the expected and actual values.

RMSAE measures the error between the predicted and actual sales values, and its formula is (Equation 47):

$$\text{RMSAE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|} \quad (47)$$

A lower RMSAE indicates a higher predictive accuracy of the model.

3. Model Validation Process

We generated the optimal order quantity for 12 months of the year using optimized code implemented in Python. This study conducted 5,000 Monte Carlo samplings per month for the evaluation of target values and indicators. The code does not have a fixed random state, so there may be slight sampling differences in the results between repeated runs; however, the overall conclusion is not affected.

The following formulas were used in the code to calculate the utility function and CVaR in the extended newsvendor model (Equation 1).

Based on a confidence level of $\alpha = 0.05$ (i.e., the retailer is 95% confident in meeting the sales target), we calculated the CVaR for each ordering strategy, optimizing it using actual sales data and stockout penalties.

To enhance the model's sensitivity to risk aversion, loss aversion, and predictive accuracy, we adjusted the penalty terms for risk aversion and loss aversion to reflect the dynamic intensity of these factors. Specifically, the following adjustments were made (Equation 48 and Equation 49):

$$\lambda_{\text{adjusted}} = \lambda \times 80 \times \left(\frac{\text{mean_sales}}{40} \right) \quad (48)$$

$$\mu_{\text{adjusted}} = \mu \times 60 \times \left(\frac{\text{mean_sales}}{40} \right) \quad (49)$$

Based on average sales volume, this adjustment method ensures that as sales increase, the model's requirements for risk aversion and loss aversion also increase, making it better suited to dynamic market demands. By increasing the weight of the penalty terms, the model is guided to select more robust ordering strategies.

Additionally, to improve the model's sensitivity to prediction errors, the RMSE penalty term was magnified (Equation 50):

$$\text{RMSE}_{\text{adjusted}} = 150 \times \text{RMSE}(Q, \text{actual_sales}) \quad (50)$$

This adjustment enables the model to emphasize the deviations from actual sales data in the ordering quantity predictions, thereby improving forecast accuracy.

The determination of core behavioral parameters (λ, μ) in this article follows the process of "baseline coefficient $\rightarrow$ sales scaling $\rightarrow$ small-scale selection": first, set a baseline (λ, μ) that does not change with the month, and then use the average sales scaling formula given in the previous text (while using a consistent amplification factor caliber for the RMSE penalty term) to obtain the effective coefficient for the current month. It should be emphasized that the multiplier is not manually specified, but obtained through sensitivity testing of small-scale discrete grids and symmetric disturbances: under the premise of fixed (p, c, s, h, r, M) and confidence level α , the baseline coefficient combination is repeated month by month, and Monte Carlo evaluation is used to solve Q^* to calculate the indicators, with the overall utility of the sample period as the main factor and RMSE/fitting degree as the auxiliary factor for selection; The final adoption is the minimum multiplier that can smooth Q^* fluctuations without compromising the error index, without reducing overall utility.

4. Model Validation Results

The validation results calculated using the above formulas show that the model's average accuracy is 98.08%, indicating a high level of precision in predicting market demand in most cases. (Figure 1)

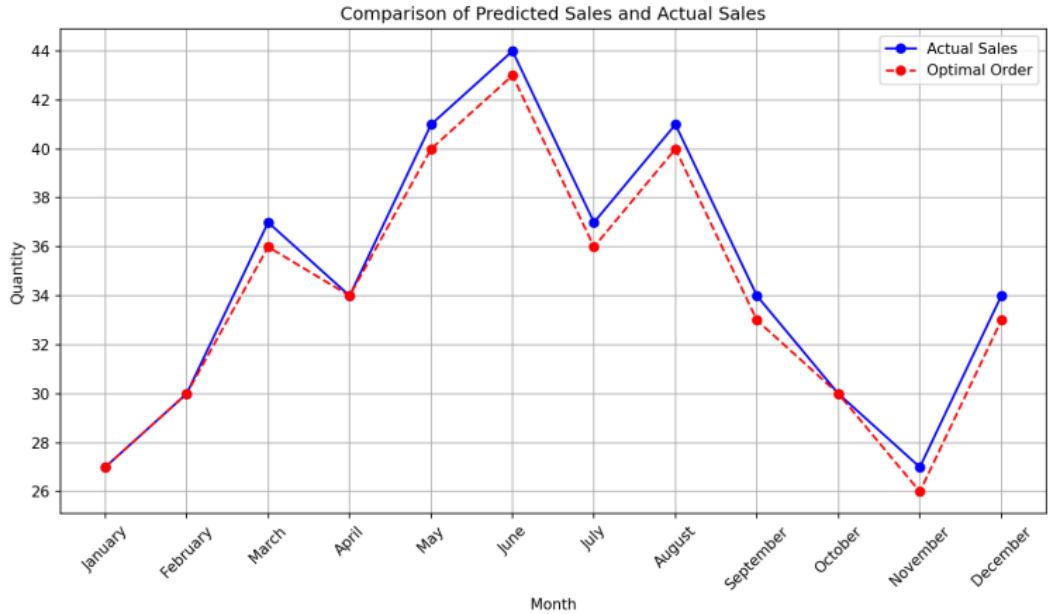


Figure 1: Comparison of predicted sales and actual sales

The calculated RMSAE is 0.8 units, meaning the average difference between the model's predicted optimal ordering quantity and the actual sales data is 0.8 units per month. (See Figure 2) This error demonstrates the model's practical value in solving inventory optimization problems in the electric vehicle supply chain.

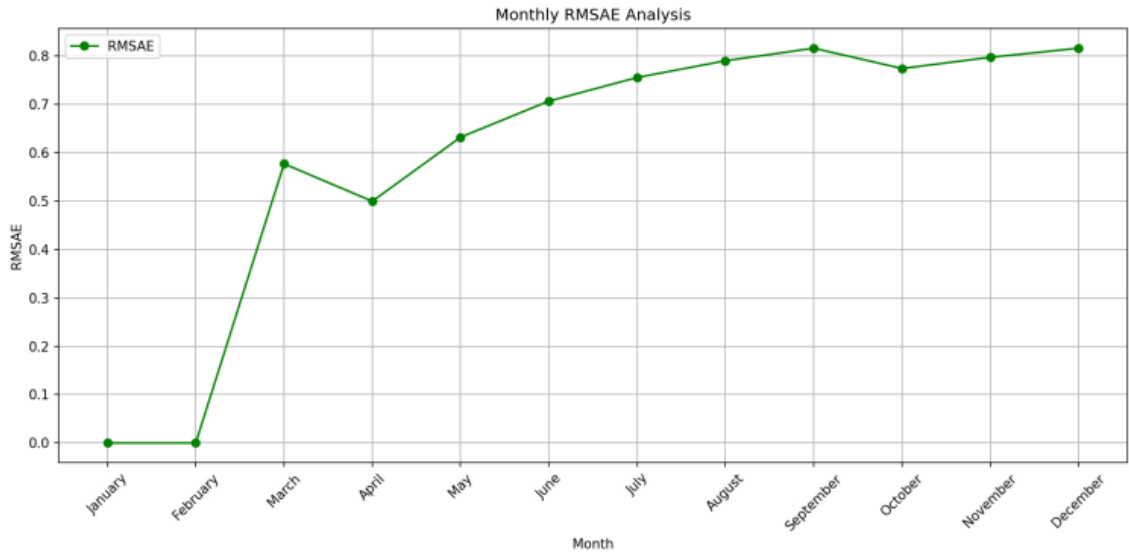


Figure 2: Error analysis chart

According to the validation results, the extended newsvendor model based on CVaR developed in this paper demonstrates substantial value and accuracy in demand forecasting and inventory management for the electric vehicle market. However, parameter weight adjustments based on input data are necessary to enhance its effectiveness.

CONCLUSION

This study developed an extended Newsvendor model within the CVaR framework to characterize tail risks associated with demand uncertainty in the electric vehicle supply chain and optimize ordering decisions accordingly. Based on the actual sales data of a specific retailer for 12 consecutive months, the results showed that the model had good fitting and robustness during the sample period, with an average prediction accuracy of approximately 98.08% and an RMSAE of approximately 0.8 vehicles per month. This indicates that the introduction of the CVaR ordering strategy can effectively mitigate downside risks while maintaining service levels, considering extreme losses.

From the perspective of parameter sensitivity, an increase in the risk aversion coefficient λ will strengthen the focus on tail losses, making the overall ordering strategy tend towards conservatism. The improvement of the loss aversion coefficient focuses on reducing the average loss exposure, which, in most cases, aligns with the direction of risk aversion and jointly promotes a reduction in the order quantity. Its effect is more significantly affected by the relative relationship between holding/discount costs (h) and additional costs (s). Relatively speaking, the confidence level (α) mainly plays a role in “amplifying or converging tail weights”: at higher α values, the above coefficient adjustments have a more significant impact on the order quantity; When the additional upper limit (M) is small, the tail of stockouts exceeding $Q+M$ becomes heavier, and the conservative effect is also more substantial; At the same time, increasing the out of stock penalty (r) will push up the target service level, offsetting the aforementioned downward trend to some extent.

At the practical level, this model provides a quantifiable basis for enterprises to develop ordering plans in uncertain demand and policy environments. On the one hand, it can differentiate risk aversion and loss aversion based on risk tolerance; On the other hand, by combining operational constraints such as additional upper limit M , out-of-stock penalty r , and holding/additional costs, a parameter combination consistent with service commitments is formed to achieve more robust stocking decisions at different market stages.

Compared to previous studies that directly embedded CVaR into newsvendor targets, the difference in this paper lies in: firstly, using a utility based expression, risk avoidance and loss avoidance are hierarchically weighted within the objective function, and the mechanism is used to distinguish the effects of tail and expected losses on order quantity; The second is to propose three scenario divisions around the limited addition upper limit M (no shortage/no addition; no shortage/limited addition; with shortage and limited addition) and provide first-order conditions and existence explanations based on them; The third is to conduct monthly evaluations on real business data and disclose the Monte Carlo scale and evaluation indicators.

Of course, the conclusions of this study are still subject to several premises. Firstly, monthly demand is approximated by a normal distribution, and a sampling scale is set based on historical sales. If the actual distribution is skewed or has a fat tail, the estimation of CVaR and optimal order quantity may deviate; Secondly, the empirical sample comes from a single retailer and a single year (12 months), and the heterogeneity of regions and channels needs further testing; Thirdly, the study did not incorporate exogenous factors such as raw material prices, subsidies/policy adjustments, investment in charging infrastructure, and the pace of vehicle launches into a structured explanation, making it more suitable for periods when prices and policies are relatively stable; Fourthly,



the numerical implementation does not have a fixed random seed, and there may be slight differences in the sampling sequences of different runs (which does not affect the main conclusion of this article).

LIMITATIONS AND RECOMMENDATIONS

This study shows that the extended newsvendor model based on CVaR significantly improves the model's flexibility in handling uncertainty by dynamically adjusting the risk aversion and loss aversion coefficients. To enhance the model's robustness and predictive accuracy in varying market demand situations, it's essential to carefully adjust its parameter weights according to the characteristics of the input data. In practical terms, the model may be prone to overfitting or underfitting, but these issues can be effectively addressed through appropriate parameter adjustments. Practically, adjustments to dynamic parameters ought to rely on a thorough examination of past sales figures, encompassing seasonal variations, shifts in policies, and uncertainties in market demand. Through these evaluations, crucial factors such as risk aversion and loss aversion coefficients can be suitably adjusted in the model to ensure effective forecasting of future demand. The method of dynamic adjustment reduces the model's reliance on datasets and enhances its ability to generalize in complex and volatile market conditions.

Future research can further explore cross-subject and multi-cycle scenario extensions, as well as how to incorporate more external variables (such as policy changes, competitor strategies, etc.) into the model to achieve dynamic optimization of parameters, thereby enhancing the adaptability and prediction accuracy of the model under extreme market conditions.

REFERENCES

- [1] N. A. Medvedeva, A. O. Merenkov, and E. V. Medvedeva, "Assessment of company competitive advantage strategy through supply chain," *Int. J. Sup. Chain Manage.*, vol. 9, no. 3, pp. 778–783, 2020.
- [2] L. Zhou, D. Zhang, S. Li, and X. Luo, "An integrated optimization model of green supply chain network design with inventory management," *Sustainability*, vol. 15, no. 16, 2023, Art. no. 12583.
- [3] S. Yamini, "Behavioral perspective of newsvendor ordering decisions: review, analysis and insights," *Manage. Decis.*, vol. 59, no. 2, pp. 240–257, 2021.
- [4] J. Chang, M. N. Katehakis, J. Shi, and Z. Yan, "Blockchain-empowered newsvendor optimization," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 238, 2021, Art. no. 108144.
- [5] C. Lu, J. Routledge, K. C. Chan, and T. Li, "Policy uncertainty and inventory behavior: evidence from the US manufacturing sector," *Econ. Polit.*, vol. 35, no. 3, pp. 919–948, 2023.
- [6] B. Cheng, R. Li, X. Zhu, M. Zhou, and X. Cao, "Optimal decision in MC supply chain with overconfident retailer based on the newsvendor model," *RAIRO Oper. Res.*, vol. 55, no. 3, pp. 1325–1341, 2021.
- [7] P. Ma, Y. Meng, Y. Gong, and M. Li, "Optimal models for sustainable supply chain finance: evidence from electric vehicle industry," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, no. 15, pp. 5075–5093, 2023.
- [8] M. D. Garvey and S. Carnovale, "The rippled newsvendor: a new inventory framework for modeling supply chain risk severity in the presence of risk propagation," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 228, 2020, Art. no. 107752.
- [9] G. Wu, B. Feng, and L. Guo, "Optimal procurement strategy for supply chain with trade credit and backorder under CVaR criterion," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, 2021, Art. no. 10201.

- [10] M. Abdellaoui, H. Bleichrodt, O. L'Haridon, and D. van Dolder, "Measuring loss aversion under ambiguity: A method to make prospect theory completely observable," *J. Risk Uncertain.*, vol. 52, no. 1, pp. 1–20, 2016.
- [11] H.-L. Chan, T. M. Choi, Y.-J. Cai, and B. Shen, "Environmental taxes in newsvendor supply chains: A mean-downside-risk analysis," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.: Syst.*, vol. 50, no. 12, pp. 4856–4869, 2020.
- [12] Y. H. Gaikwad and N. Shafighi, "Inventory optimization for manufacturing industries," *Int. J. Adv. Bus. Stud.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–21, 2023.
- [13] E. Taghizadeh and S. Venkatachalam, "Two-stage risk-averse stochastic programming approach for multi-item single source ordering problem: CVaR minimisation with transportation cost," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, no. 7, pp. 2129–2146, 2023.
- [14] S. Venkataraman and D. Asfaw, "Buyback contract under asymmetric information about retailer's loss aversion nature," *Ann. Oper. Res.*, vol. 295, pp. 385–409, 2020.
- [15] J. Chen, T. Zhang, and Y. Zhou, "Dynamics of a risk-averse newsvendor model with continuous-time delay in supply chain financing," *Math. Comput. Simul.*, vol. 169, pp. 133–148, 2020.
- [16] W. Jammerneegg and P. Kischka, "Newsvendor problems with VaR and CVaR consideration," in *Handbook of Newsvendor Problems: Models, Extensions and Applications*, T.-M. Choi, Ed., New York, NY, USA: Springer, 2012, pp. 197–216.
- [17] Y. Li and J. Ou, "Replenishment decisions for complementary components with supply capacity uncertainty under the CVaR criterion," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 297, no. 3, pp. 904–916, 2022.
- [18] S. Tarima and Z. Zenkova, "Use of uncertain additional information in newsvendor models," in *Proc. 5th Int. Conf. Logistics Operations Manage. (GOL)*, Rabat, Morocco, 2020, pp. 1–6.
- [19] Y. Song, T. Fan, Y. Tang, and F. Zou, "Quality information acquisition and ordering decisions with risk aversion," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 59, no. 22, pp. 6864–6880, 2021.
- [20] H. Yang, Z. Zhen, and H. Wan, "Optimal portfolio financing selection in a capital-constrained supply chain with risk-averse members," *Appl. Econ.*, vol. 53, no. 41, pp. 4713–4733, 2021.
- [21] A. N. Golodnikov, V. Kuzmenko, and S. Uryasev, "CVaR regression based on the relation between CVaR and mixed-quantile quadrangles," *J. Risk Financial Manage.*, vol. 12, no. 3, 2019, Art. no. 107.
- [22] H. Qiang, J. Gong, and S. Wang, "Additional-ordering newsvendor model based on CVaR criterion and lost sale penalty cost," School of Econ., Fudan Univ., Shanghai, China, Tech. Rep., 2022. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=4518793>

การเสริมแรงฟันชุดบุงกีหมุ่นด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง

สรายุทธ มาลัยพันธุ์¹ พงศกร สุรินทร์² มนินทรา ใจคำปัน³ ธันวาท วิวุฒิ⁴ ชีรณย์ หวานแหลม⁵
ธนาวัฒน์ นันธิสม⁶ ฤทัยภัทร ศุกระศรี^{7*}

^{1,2,3,4,5,6,7*}สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง, ลำปาง, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: rsukrasorn@gmail.com

รับต้นฉบับ: 14 กรกฎาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 2 เมษายน 2569; ตอบรับบทความ: 10 เมษายน 2569

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

การเสริมแรงวัสดุสำหรับฟันชุดบุงกีหมุ่นด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาสาเหตุของการสึกหรอฟันชุดบุงกีหมุ่น ค้นหาปัจจัยของวัสดุเสริมแรงที่มีผลต่อการสึกหรอ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฟันชุดที่เสริมแรงภายใต้ขอบเขตวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ SS400, S50C, SCM440 ชนิดละ 48 ซี่ (1 วงล้อหมุ่น) ขนาด 38×38×250 มิลลิเมตร ใช้น้ำหนักฟันต้นแบบเสริมแรงซึ่งละไม่เกิน 50 กิโลกรัม

ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการวิเคราะห์พบว่า ชนิดของวัสดุส่งผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value = 0.016) และมีขนาดของผลกระทบสูงมาก ($\eta^2 \approx$ ร้อยละ 93.63 และ Cohen's d ที่สูงในทุกคู่เปรียบเทียบ) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วัสดุ SCM440 มีความแข็งแรงสูงสุด และแตกต่างจาก SS400 อย่างมีนัยสำคัญทั้งทางสถิติและเชิงปฏิบัติอย่างชัดเจน ในขณะที่ S50C ก็แข็งแรงกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญเชิงปฏิบัติเช่นกัน ถึงแม้ว่าการเปรียบเทียบภายหลัง (post-hoc tests) เช่น Bonferroni อาจไม่พบความแตกต่างทางสถิติสำหรับบางคู่ แต่ขนาดของผลกระทบที่สูง (effect size) ยังคงบ่งชี้ถึงความแตกต่างที่สำคัญในเชิงปฏิบัติ ดังนั้น การเลือกใช้ SCM440 จึงเหมาะสมที่สุดหากต้องการความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งคุณสมบัติด้านความแข็งแรงนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงความทนทานต่อการสึกหรอ โดยพิจารณาจากอัตราการทำงานเฉลี่ยต่อชั่วโมงภายใต้ สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนแตกต่างกัน โดยวัสดุ SCM440 ที่มีความแข็งแรงสูงสุดสามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีทรายปนร้อยละ 100 (สภาวะกัดกร่อนสูงที่สุด) ซึ่งผลลัพธ์นี้สนับสนุนข้อสรุปว่า SCM440 มีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่า S50C และ SS400 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง

คำสำคัญ: ฟันชุดบุงกีหมุ่น การออกแบบการทดลอง เหมืองถ่านหินลิกันไนต์ วัสดุเสริมแรง การวิเคราะห์ปัญหา

Bucket Wheel Excavator Teeth Reinforcement via Design of Experiments

Sarayut Malaipurn¹ Pongsakorn Surin² Maninthara Chaikhampan³ Thanwa Wiwut⁴
Teeradon Wanleam⁵ Thanawat Nantisom⁶ Rutaiphat Sukrasorn^{7*}

^{1,2,3,4,5,6,7*} *Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna Lampang, Lampang, Thailand*

*Corresponding author e-mail: rsukrasorn@gmail.com

Received: 14 July 2025; Revised: 2 April 2026; Accepted: 10 April 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

The reinforcement of materials for Bucket Wheel Excavator (BWE) teeth was investigated using the Design of Experiment (DOE) technique. The primary objectives were to identify the causes of wear, determine the material factors affecting wear, and compare the Performance of reinforced teeth across three material types: SS400, S50C, and SCM440. Forty-eight teeth of each type were used on one rotating wheel, sized 38×38×250 mm, with the reinforced teeth weighing no more than 50 kg each.

The DOE analysis revealed that material type significantly impacts hardness (p -value = 0.016) with a very large effect size ($\eta^2 \approx 93.63\%$ and high Cohen's d for all Pairs). Specifically, SCM440 achieved the highest hardness and significantly differed from SS400 both statistically and practically. S50C was also practically harder than SS400. While post-hoc tests (e.g., Bonferroni) did not detect statistical differences for all Pairs (e.g., SCM440 vs. S50C), the consistently high Effect Size confirms the Practical significance of these differences. Therefore, selecting SCM440 is the most suitable choice for maximum hardness. This superior mechanical property is consistent with the field experiment's wear Performance, even under varying abrasive conditions. The field test showed that the high-hardness SCM440 was able to operate in the most severely abrasive environment (100% sand content), which strongly supports the conclusion that SCM440 offers better wear resistance than S50C and SS400, especially in highly corrosive environments.

Keywords: Bucket wheel excavator teeth, Design of experiments, Lignite mine, Reinforcement, Why-why analysis

บทนำ

จากการจดสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 2502003542 และอนุสิทธิบัตรเลขที่ 2503002579 ชื่อการประดิษฐ์ ฟันชุดบั้งกีหมุนเสริมแรง อุตสาหกรรมเหมืองแร่เน้นการขุดแร่ใต้ดินด้วยเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ต้องทำงานหนักและต่อเนื่องเพื่อนำแร่มาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะเครื่องจักรที่เรียกว่า รถขุดบั้งกีหมุน (bucket wheel excavator) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการขุดแร่ได้ปริมาณมากถึง 2,000 ตันต่อชั่วโมงและมีน้ำหนักมากถึง 990 ตัน เครื่องจักรเหล่านี้ต้องเผชิญกับการกระแทกและเสียดสีตลอดเวลา [1] ดังรูปที่ 1 หากรถขุดบั้งกีหมุนมีการหยุดระบบการขุดดินบ่อยครั้งเพื่อซ่อมเครื่องจักรในส่วนของการเปลี่ยนฟันชุดก็จะส่งผลกระทบต่อแผนการผลิตที่กำหนดไว้

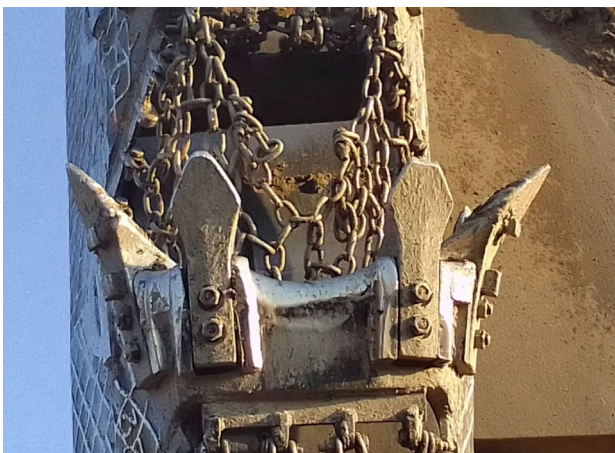


แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอติวิปเมนต์ จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 1: ลักษณะการทำงานของฟันชุดบั้งกีหมุน

ฟันชุดบั้งกีของรถขุดบั้งกีหมุนที่บริษัทใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 16–18 ชั่วโมง หรือประมาณ 16,200 ตัน บริษัทได้ทำการยืดอายุการใช้งานโดยทำการเสริมแรงด้วยวัสดุเหล็กเพลลา เข้าไปจับยึดกับตัวฟันชุดเดิมซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานได้เพิ่มขึ้นเป็น 19–20 ชั่วโมง หรือประมาณ 18,000 ตัน สาเหตุหลักของการสึกหรอของฟันชุดบั้งกีในรถขุดบั้งกีหมุนนั้นมาจากสภาพหน้างานเหมืองถ่านหินลึกในดัดที่มีชั้นหินและชั้นดินที่ต่างกันก่อให้เกิดการสึกหรอ นอกจากนี้แล้วยังส่งผลให้บริษัทต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเสริมแรงตัวฟันชุดรถขุดบั้งกีหมุนไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนฟันใหม่หรือการเสริมฟันด้วยวัสดุ SS400 และเชื่อมด้วยลวดเชื่อม L-55 (มาตรฐานสากล AWS A5.1: E7016) ดังรูปที่ 2 ซึ่งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนดังกล่าวเป็นจำนวนที่มากถึงปีละ 1 ล้านบาท โดยประมาณ



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอติวิปเมนต์ จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 2: ฟันชุดบั้งกีหมุนและการเสริมแรงด้วยวัสดุเหล็กเพลลา SS400 ในปัจจุบัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของฟันชุดบุงก์ในรถชุดบุงก์ที่หมุน วิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอฟันชุดบุงก์ที่หมุนด้วยเทคนิค Why-Why Analysis ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยคัดเลือกวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ได้แก่ SS400 S50C และ SCM440 ในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุแต่ละชนิดในการทดลองแสดงผลโดยสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบคุณสมบัติและเหตุผลความเหมาะสมของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

SS400	S50C	SCM440
เป็นวัสดุพื้นฐานที่บริษัทใช้อยู่แล้ว (baseline) มีความเหนียวดี เชื่อมง่าย และต้นทุนต่ำ จึงเป็นตัวเลือกเปรียบเทียบเชิงปฏิบัติ (benchmark) เพื่อวัดประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ “คุ้มค่า” ในภาคสนาม	เหล็กคาร์บอนระดับกลางที่สามารถให้ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า SS400 ในขณะที่เดียวกันยังคงมีคุณสมบัติการเชื่อมและการชุบที่เหมาะสม จึงเป็นตัวเลือกที่สมดุลระหว่างประสิทธิภาพและต้นทุน	เหล็กกล้าอัลลอย chromoly (chromium-molybdenum steel) ที่เมื่อผ่านการอบชุบหรือการผลิตที่เหมาะสมจะให้ความแข็งแรงสูงและทนต่อการสึกหรอได้ดีที่สุดในกลุ่มที่ทดลอง แต่ยังคงมีความเหนียวเพียงพอหากควบคุมกระบวนการผลิต/เชื่อมอย่างเหมาะสม จึงเป็นตัวเลือกเชิงวิศวกรรมที่คาดว่าจะยืดอายุการใช้งานมากที่สุด

วัสดุเสริมแรงที่บริษัทเลือกใช้ในปัจจุบันเมื่อนำมาเทียบกับวัสดุ SCM440 และ S50C ที่มีขนาดเท่ากันคือ 38x38x250 มิลลิเมตร และทำการทดลองใช้งานในสภาพหน้าดินที่มีความเหมือนหรือใกล้เคียงกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค้นหาวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมสำหรับเสริมแรงฟันชุด การออกแบบวัสดุเสริมแรง ดังรูปที่ 2 ในการทดลองและทดสอบวัสดุเสริมแรงนี้จะทำการเสริมแรงด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด และเชื่อมด้วยลวดเชื่อม YAWATA L-55 (มาตรฐานสากล AWS A5.1: E7016) ที่มีคุณสมบัติทนต่อการแตกร้าวและสึกหรอได้ดี โดยทำการเชื่อมที่อุณหภูมิเหมาะสมคือ 140–190 องศาเซลเซียส (°C) ทำการทดลองใช้งานจริงและเก็บข้อมูลชั่วโมงการใช้งานหลังทำการทดสอบวัสดุเสริมแรงดังกล่าว นำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และวิเคราะห์ผลการทดลองทำการสรุปผลและจัดทำต้นแบบฟันชุดบุงก์ที่หมุนที่มีประสิทธิภาพเพื่อขยายผลในอนาคต

1. ขอบข่ายงานวิจัย

1.1 อิทธิพลของปัจจัยแวดล้อมที่หลากหลาย: งานวิจัยนี้ได้พิจารณาสภาพหน้าดินที่มีทรายปนในสัดส่วนที่จำกัด ร้อยละ 100 และ 50 ในความเป็นจริง หน้าดินในสภาพการทำงานจริงอาจมีความหลากหลายมากกว่านี้ เช่น ปริมาณความชื้น ขนาดและรูปร่างของอนุภาคดิน หรือการปนเปื้อนของวัสดุอื่น ๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอที่แตกต่างกัน

1.2 การทดสอบภาคสนามดำเนินการในพื้นที่เหมืองถ่านหินแห่งเดียว: ซึ่งมีสภาพธรณีวิทยาและองค์ประกอบของดินเฉพาะตัว การเปรียบเทียบผลในสภาพดินหรือเหมืองอื่นที่มีระดับความชื้น ความแข็งแรงของชั้นหิน หรือองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน อาจให้ผลลัพธ์ที่หลากหลายมากขึ้นและเพิ่มความครอบคลุมของข้อมูล

1.3 ลักษณะชั้นดินที่เปลี่ยนแปลงตามแนวลาดของการขุด: โดยในบริเวณด้านบนมีดินเหนียวปนทราย (ร้อยละ 50 โดยประมาณ) และบริเวณด้านล่างเป็นทรายหยาบล้วน (ร้อยละ 100 โดยประมาณ) การปรับเปลี่ยนให้ใช้ดินชนิดเดียวกันจึงเป็นไปได้ยากในภาคสนามจริง

1.4 การประยุกต์ใช้เทคนิคการเสริมแรงอื่น ๆ: นอกเหนือจากการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกันแล้ว ยังมีเทคนิคการเสริมแรงอื่น ๆ ที่อาจมีศักยภาพ เช่น การเคลือบผิวแข็ง (surface hardening) หรือการเชื่อมพอกผิวแข็ง (hard facing) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุที่เลือกใช้กับเทคนิคการเสริมแรงอื่น ๆ อาจเป็นประโยชน์

2. ความสำคัญของงานวิจัย

2.1 เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน: การใช้วัสดุที่มีความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่า จะช่วยลดความถี่ในการเปลี่ยนฟันชุด ทำให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดเวลาหยุดทำงาน (downtime) และเพิ่มผลผลิตโดยรวม

2.2 การพัฒนาองค์ความรู้: งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยในการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทำงานจริง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการวิศวกรรมวัสดุและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

3. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อวิเคราะห์และระบุสาเหตุหลักของการสึกหรอของฟันชุดบุงกีหมุนที่ใช้งานจริงในสภาพหน้างานเหมืองถ่านหินลึกในดั้น
- 2) เพื่อค้นหาและประเมินปัจจัยของวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ได้แก่ SS400 S50C และ SCM440 ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอของฟันชุดบุงกีหมุน โดยใช้เทคนิค DOE และ one-way ANOVA
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยึดอายุการใช้งานของฟันชุดบุงกีหมุนที่ได้รับการเสริมแรงด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานจริง เพื่อค้นหาวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสมที่สุด

ทบทวนวรรณกรรม

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงภายนอกและการสึกหรอระหว่างการทำงาน โดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่ฟันชุดต้องรับทั้งแรงกระแทกและแรงเสียดสีอย่างต่อเนื่อง คุณสมบัติหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพของฟันชุด ได้แก่ ความแข็ง (hardness) และ ความเหนียว (toughness) ซึ่งทั้งสองคุณสมบัตินี้มีความสัมพันธ์กันในเชิงสมดุล กล่าวคือ วัสดุที่มีความแข็งสูงมักมีแนวโน้มที่จะเปราะมากขึ้น และวัสดุที่เหนียวมากมักมีความแข็งลดลง [2], [3]

ความแข็ง หมายถึง ความต้านทานของวัสดุต่อการเปลี่ยนรูปแบบถาวร เช่น การขีดข่วน การกด หรือการสึกหรอ วัสดุที่มีความแข็งสูงจะทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่า ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของฟันชุดที่สัมผัสดิน หิน และทรายโดยตรง [4] เหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ มีความแข็งแตกต่างกันตามองค์ประกอบทางเคมีและกระบวนการทางความร้อน เช่น SS400 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีความแข็งต่ำ (ประมาณ 130 HB) แต่มีความเหนียวสูง เหมาะกับงานทั่วไปที่ไม่ต้องรับแรงสึกหรอมาก S50C เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ความแข็งสูงขึ้น (ประมาณ 180–220 HB) และสามารถชุบแข็งได้ เหมาะกับงานที่ต้องการสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียว SCM440 (AISI 4140) เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งสูง (ประมาณ 250 HB) หรือสูงกว่าเมื่อผ่านการอบชุบ และมีโครงสร้างจุลภาคที่ให้ความต้านทานต่อการสึกหรอและแรงกระแทกได้ดี [5], [6] ในทำนองเดียวกัน Ranjan [7] รายงานว่าเหล็ก SCM440 เมื่อผ่านกระบวนการ Gas Metal Arc Welding (GMAW) ให้ค่าความแข็งสูงกว่าวัสดุคาร์บอนทั่วไปกว่าร้อยละ 80

ความเหนียว เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานก่อนแตกหัก วัสดุที่มีความเหนียวสูงจะสามารถต้านแรงกระแทกซ้ำ ๆ ได้โดยไม่แตกหัก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในฟันชุดที่ต้องรับแรงกระแทกจากหินหรือดินแข็ง [2] แม้ว่าวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น SCM440 จะทนต่อการสึกหรอได้ดี แต่หากขาดความเหนียว อาจเกิดการแตกบิ่นในบริเวณขอบฟันได้ง่าย ดังนั้นการเลือกวัสดุสำหรับฟันชุดจึงต้องคำนึงถึงสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียว [3], [6] จากผลการทดลองในงานวิจัยปัจจุบัน พบว่า SCM440 มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด (ประมาณ 249.5 HB) และทนต่อการสึกหรอได้ดีที่สุดในสภาพดินที่มีทรายปนร้อยละ 100 ซึ่งเป็นสภาวะกัดกร่อนรุนแรงที่สุด ขณะที่ S50C ให้ผลลัพธ์ที่ดีในระดับปานกลาง และ SS400 มีความแข็งต่ำสุดและสึกหรอเร็วที่สุด [4] ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับทฤษฎีคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า กล่าวคือ ความแข็งที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอโดยตรง โดยเฉพาะเมื่อฟันชุดทำงานในสภาพที่มีการเสียดสีสูง [7], [8] อย่างไรก็ตาม ความเหนียวของวัสดุยังคงมีบทบาทสำคัญ โดยวัสดุที่แข็งมากเกินไปอาจเปราะ ซึ่งต้องพิจารณาการอบชุบหรือเคลือบผิวเพื่อปรับสมดุล เช่น กระบวนการการชุบ (tempering) หรือ case hardening เพื่อให้ SCM440 มีทั้งความแข็งและความเหนียวที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อเนื่องในเหมืองเปิด [9]

การสึกหรอ (wear) ของฟันชุดบุงกีหมุนเกิดจากการทำงานภายใต้แรงเสียดทานและแรงกระแทกซ้ำ ๆ ระหว่างพื้นผิวโลหะกับอนุภาคดิน ทราย และหินในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง กลไกการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิดจึงแตกต่างกันไปตาม องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) และโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของวัสดุ [10], [11], [12] ซึ่งสามารถสรุปกลไกการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: กลไกการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุ	โครงสร้างจุลภาคหลัก	กลไกการสึกหรอเด่น	ลักษณะการสึกหรอที่สังเกตได้
SS400	Ferrite + Pearlite	Abrasive + Adhesive	ผิวเกิดร่องลึกและการลอกผิว
S50C	Ferrite + Pearlite (หนาแน่นกว่า)	Mild Abrasive + Surface Fatigue	ผิวเป็นรอยขีดและหลุดเป็นแผ่นบาง
SCM440	Tempered Martensite	Oxidative + Micro-cutting	ผิวเรียบกว่า มีร่องตื้นและฟิล์มออกไซด์บาง ๆ

การศึกษาถึงการออกแบบวัสดุสำหรับฟันชุดบุงกีหมุนถือเป็นหัวข้อที่สำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมก่อสร้างและเหมืองแร่ โดยฟันชุดเป็นส่วนสำคัญที่ต้องเผชิญกับการสึกหรอในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย ซึ่งการวิเคราะห์และพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมในการเสริมแรงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อยืดอายุการใช้งานและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา [13] ในระยะหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุและวิธีการเสริมแรงที่มีผลต่อการสึกหรอของฟันชุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เทคนิค DOE ที่ช่วยให้สามารถวางแผนการทดลองได้อย่างเป็นระบบ ลดจำนวนครั้งในการทดสอบที่ไม่จำเป็น แต่ยังคงไว้ซึ่งความแม่นยำในการทำนายผลลัพธ์ ทำให้สามารถพัฒนาวัสดุคอมโพสิตหรือสูตรการชุบแข็งฟันชุดได้รวดเร็วและประหยัดงบประมาณมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาที่สำคัญเกี่ยวกับวัสดุเสริมแรงหลายชนิด แต่ก็ยังมีช่องว่างในการทำความเข้าใจลักษณะเฉพาะของการสึกหรอภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่แตกต่างกัน รวมถึงการวิเคราะห์เชิงสถิติ เช่น one-way ANOVA ที่สามารถใช้เพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ [14], [15] นอกจากนี้ ยังมีการวิจัยที่เน้นย้ำว่าการใช้วิธีการที่เหมาะสมในการออกแบบการทดลองสามารถช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเรื่องการเลือกวัสดุ [16], [17] การบูรณาการความรู้จากการศึกษาเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของวัสดุและกระบวนการในการทำฟันชุดที่เหมาะสม แต่ยังมีการศึกษาที่น้อยครั้งเกี่ยวกับปัจจัยเฉพาะที่สามารถส่งผลต่อการสึกหรออย่างชัดเจนในแต่ละชนิดของวัสดุ การทดสอบประสิทธิภาพที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขทางกลต่าง ๆ [18], [19]

ในการศึกษานี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อเติมเต็มช่องว่างนี้ โดยการสำรวจรูปแบบการสึกหรอและการทดลองวัสดุเสริมแรงในฟันชุดบุงกีหมุนทั้งสามชนิด พร้อมใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบได้อย่างสมบูรณ์ [20], [21] ความหมายและความสำคัญของการศึกษานี้ไม่เพียงแต่จะช่วยในการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุในฟันชุด แต่ยังส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมโดยรวมที่ใช้เครื่องจักรเหล่านี้ ทำให้เกิดการประหยัดต้นทุนและเพิ่มความน่าเชื่อถือในการดำเนินงาน [22], [23] การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวัสดุทั้งสามชนิดในบริบทนี้จึงถือว่าสำคัญและมีคุณค่าต่อการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต [24]

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ค้นหาสาเหตุของปัญหา

จากการสัมภาษณ์วิศวกรเครื่องกล และหัวหน้าผู้ควบคุมงาน ซึ่งสรุปประเด็นที่นำมาพิจารณาได้ 3 สาเหตุหลักคือ 1) ตำแหน่งของฟันชุดบุงกีหมุนเกิดการสึกหรอ 2) ฟันเดิมที่ติดกับตัวรถชุดบุงกีหมุน 3) การเสริมแบบเดิมในปัจจุบัน ซึ่งสรุปได้ว่าผู้วิจัยทำการเสริมแรงด้วยวัสดุ 3 ชนิด ประกอบด้วย SS400 S50C และ SCM440 เพื่อเปรียบเทียบชั่วโมงในการทำงานของเหล็กทั้ง 3 ชนิด ดังตารางที่ 3

จากการวิเคราะห์ปัญหา Why-Why Analysis สรุปได้ว่า ปัญหาที่ทางบริษัทพบเจอบ่อยครั้งคือการเปลี่ยนฟันชุดของรถชุดบุงกีหมุน (tooth bucket wheel) บ่อย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้กำหนดหัวข้อสำรวจขึ้นมาดังนี้

1.1 การสึกหรอของตำแหน่งฟันชุด: พบว่าตำแหน่งของฟันชุดที่มีความเสียหายน้อยที่สุดคือ ฟันซ้ายในและขวาใน มีความเสียหายอยู่ที่ร้อยละ 10 ของความเสียหายพิจารณาเป็น OK และฟันซ้ายนอก มีความเสียหายอยู่ที่ร้อยละ 50 ของความเสียหาย ฟันขวานอกมีความเสียหายอยู่ที่ร้อยละ 30 ของความเสียหายพิจารณาเป็น NG เนื่องจากฟันซ้ายนอกและขวานอกเป็นตำแหน่งที่ชุดดักหน้าดินก่อนโดยวิธีการแก้ไขปัญหาคือเปลี่ยนฟันซี่ใหม่และเสริมแรงฟันชุด

1.2 ฟันชุดเดิมที่ติดกับตัวรถชุดบุงกีหมุน: เกิดการแตกหักและสึกหรอพิจารณาเป็น NG สาเหตุเกิดจากวัสดุเกรดต่ำและส่วนผสมของโลหะไม่ได้มาตรฐานที่ใช้สำหรับงานชุดวิธีการแก้ไขปัญหาคือทำการหล่อโลหะโลหะผสมที่ได้มาตรฐาน

1.3 การเสริมแรงด้วยวัสดุแบบเดิม: ทำให้วัสดุเสริมแรงหลุด แตกหัก และสึกหรอ สาเหตุเกิดจากการเชื่อมไม่ได้มาตรฐานและเหล็กเพลามีความแข็งแรงเกินไป วิธีการแก้ไขปัญหาคือใช้ลวดเชื่อมทนต่อการแตกร้าวยี่ห้อ YAWATA L-55 ขนาด 4 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิในการหลอมละลายของลวดเชื่อม 140-190 °C (pre-heating) และเพิ่มความเหนียวในเนื้อเหล็ก

1.4 การเสริมแรงด้วยวัสดุต้นแบบที่วิจัย: พิจารณาเป็น OK วิธีการแก้ไขปัญหาคือทำการเปรียบเทียบวัสดุเสริมแรงทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธีการออกแบบการทดลองโดยนำเหล็กเพลาลูก SC440 ขนาด 38x38x250 มิลลิเมตร เหล็กเพลาลูก SS400 ขนาด 38x38x250 มิลลิเมตร เหล็กเพลาลูก S50C ขนาด 38x38x250 มิลลิเมตร

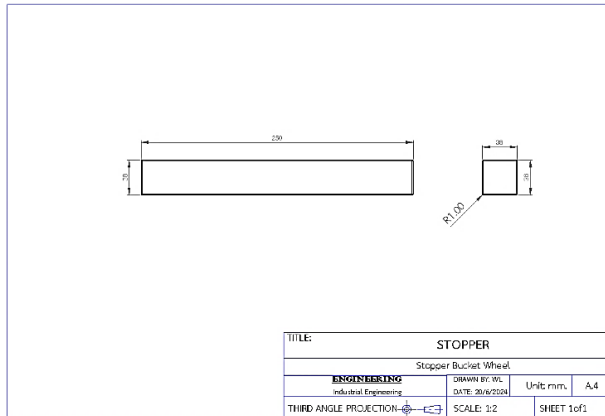
ตารางที่ 3: การวิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค Why-Why Analysis

กิจกรรม		การบำรุงรักษา		แบบฟอร์ม Why Why Analysis					หมายเลขที่	
		การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง	✓	ปรับปรุง Machine Failure การหยุดเล็กน้อยๆ ✓ Delect&Rework อุบัติเหตุ การเพิ่มประสิทธิภาพ					วันที่จัดทำ	
แผนก			Lineการผลิต/เครื่องจักรหมายเลข		สิ่งที่ต้องการดำเนินการ		เนื้อหาสาระ	ผู้รับผิดชอบ	กำหนดเสร็จ	
สภาพที่เกิดขึ้น	ปรากฏการณ์	เปลี่ยนTooth Bucket Wheel บ่อย	ตำแหน่งที่เกิด	ฟันชุดบุงกีของรถขุดบุงกีทั้งหมด	เขียน One Point Lesson					
					ทบทวนมาตรฐานเดิม		✓	กำหนดมาตรฐานใน	Process En	
					ทำCorrective Maintenance			Tool Characteristics	Process En	
					ขยายผลการปรับปรุง		✓	แผนการขยายผล	Process En	
สภาพที่เกิด		หัวข้อสำรวจ	พิจารณา	ทำไม 1.	ทำไม 2.	ทำไม 3.	พิจารณา	การแก้ไขและมาตรการป้องกัน		
 มีการเปลี่ยน Tooth Bucket Wheelบ่อย	1.การสึกหรอของตำแหน่งฟันชุด	OK	ซ้ายใน	ร้อยละ 10 ของความเสียหาย	เป็นตำแหน่งที่น้ำชุดตกหน้าดินก่อน	NG	เปลี่ยนฟันชุดซี่ใหม่ เสริมแรงฟันชุด			
		NG	ซ้ายนอก	ร้อยละ 50 ของความเสียหาย						
		OK	ขวาใน	ร้อยละ 10 ของความเสียหาย						
		NG	ขวานอก	ร้อยละ 30 ของความเสียหาย						
	2. ฟันชุดเดิมที่ติดกับตัวรถขุดบุงกีทั้งหมด	NG	ฟันแตกหักและสึกหรอ		วัสดุเกรดต่ำ	ส่วนผสมโลหะไม่ได้มาตรฐานที่ใช้สำหรับงานชุด	NG	หล่อใหม่ด้วยโลหะผสมที่ได้มาตรฐาน		
		3. วัสดุเสริมแรง (แบบเดิมในปัจจุบัน)	NG	วัสดุเสริมแรง หลุด	เชื่อมไม่ได้มาตรฐาน	เปลี่ยนลวดเชื่อม	NG	ใช้ลวดเชื่อมชนิดทนทาน ทนการแตกร้าว YAWATA L-55 ขนาด 4 มม. เชื่อมที่อุณหภูมิ 100-140°C		
	NG		วัสดุเสริมแรง แตก หัก และสึกหรอ	เหล็กเพลามีความแข็งแรงเกินไปไปเกิดการเปราะ แตกหัก	สภาพหน้าดินแข็ง	NG	เพิ่มความเหนียวในเนื้อเหล็ก			
	4. วัสดุเสริมแรงต้นแบบที่ได้มาตรฐาน	OK					OK	เปรียบเทียบวัสดุเสริมแรงทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง		
								เหล็กเพลาลูก SCM440 ขนาด 38x38x250 มม. เหล็กเพลาลูก SS400 ขนาด 38x38x250 มม. เหล็กเพลาลูก S50C ขนาด 38x38x250 มม.		

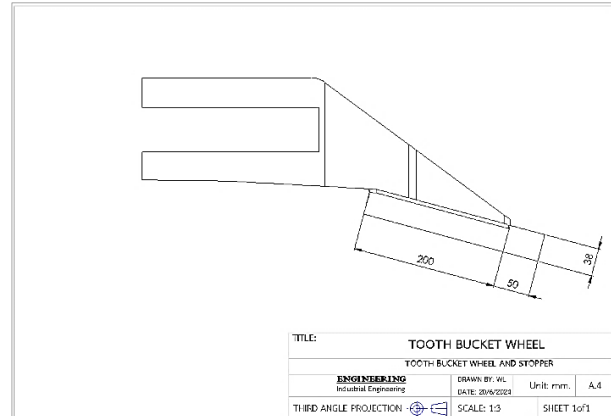
2. การออกแบบและสร้างฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมดเสริมแรง

2.1 การกำหนดวัสดุเสริมแรง : การออกแบบและการกำหนดวัสดุเสริมแรงฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ติดตั้งเข้ากับฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมดโดยการเชื่อม

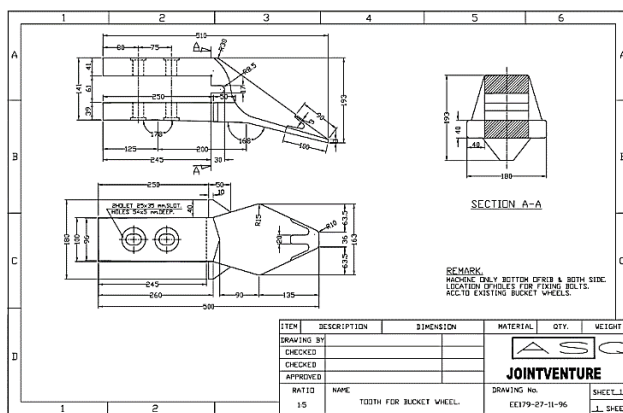
2.2 การออกแบบวัสดุเสริมแรง : หาวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด และได้ทำการกำหนดความยาวของวัสดุเสริมแรงให้เหมาะสมกับฟันชุดบ่งชี้ทั้งหมดโดยใช้เหล็ก SS400 SC440 และ S50C ชนิดละ 48 อัน ขนาดเท่ากันคือ 38x38x250 มิลลิเมตร เพราะเหล็กเพลาลูกขนาด 38x38 มิลลิเมตร เหมาะที่สุดในการเลือกมาเป็นวัสดุในครั้งนี้ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3: แบบเหล็กกล้าเสริมแรง 2D



รูปที่ 4: แบบฟันชุดบั้งก็้หมุนติดตั้งวัสดุเสริมแรง 2D



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลกิจวิปแมน จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 5: แบบขนาดฟันชุดบั้งก็้หมุน 2D

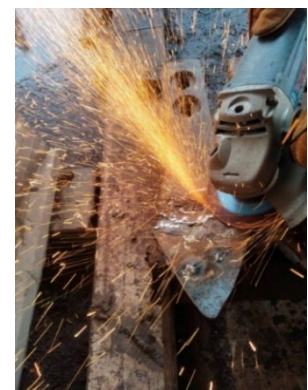
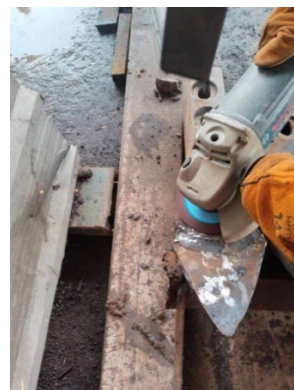
รูปที่ 6: แบบฟันชุดบั้งก็้หมุนติดตั้งวัสดุเสริมแรง 3D

3. ขั้นตอนการติดตั้งวัสดุเสริมแรง

3.1 ขั้นตอนที่ 1: นำฟันชุดบั้งก็้หมุนมาตัดเหล็กเสริมแรงอันเก่าที่เหลืออกโดยใช้หัวตัดแก๊สเลาะออกจนไม่ให้เหลือเศษเหล็กเดิมหมดเพื่อที่จะนำไปเจียรผิวดังรูปที่ 7



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลกิจวิปแมน จำกัด (มหาชน)

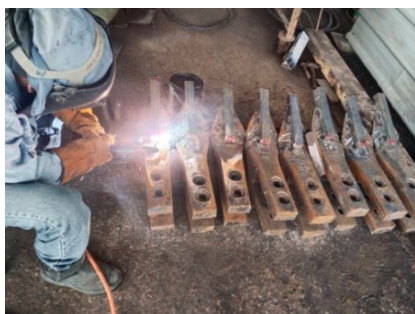


รูปที่ 7: การตัดหรือเลาะวัสดุเสริมแรงเดิมที่เหลืออก

รูปที่ 8: การเจียรผิวฟันชุดบั้งก็้หมุน

3.2 ขั้นตอนที่ 2: ทำการกำจัดสแลกออกจากแนวเชื่อมจนหมดแล้วจากนั้นนำไปเจียรผิวพื้นชุดบั้งก็หมุนให้และสะอาดที่สุด เพื่อที่จะติดตั้งเหล็กเสริมแรง และในงานเชื่อมที่ติดต้องทำขึ้นงานให้สะอาดที่สุดดังรูปที่ 8

3.3 ขั้นตอนที่ 3: นำพื้นชุดบั้งก็หมุนมาเชื่อมติดตั้งเหล็ก โดยใช้ลวดเชื่อม YAWATA L-55 ในการเชื่อมนั้นก็จะมีเชื่อมทับซ้อนแนวอย่างน้อย 3 แนว เนื่องจากความหนาของชิ้นงานและมาตรฐานการเชื่อม (WPS) ดังรูปที่ 9



แหล่งที่มา: บริษัท สหกลอควิเบนท์ จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 10: พื้นชุดบั้งก็หมุนที่ติดตั้งวัสดุเสริมแรงเสร็จสิ้น

ขั้นตอนการติดตั้งเสริมวัสดุเสริมแรงของพื้นชุดบั้งก็หมุนนั้นก็จะไม่แตกต่างกันของทั้ง 3 วัสดุ และจำกั้น้ำหนักต่อพื้นชุดในการติดตั้งเสริมวัสดุเสริมแรงจะไม่เกิน 50 กิโลกรัม ต่อ 1 พื้นชุด หากเกินจะส่งผลทำให้เครื่องจักรส่วนอื่นพังและส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการทำงานรวมถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

4. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

4.1 ขั้นตอนที่ 1 การทำความเข้าใจปัญหาและตั้งวัตถุประสงค์ (Understanding the Problem and Setting Objectives)

4.1.1 ปัญหา: ตารางแสดงค่าความแข็งของวัสดุ 3 ชนิด (SS400 SCM440 และ S50C) โดยมีระดับความแข็ง “ต่ำ” และ “สูง” ของแต่ละวัสดุ

4.1.2 วัตถุประสงค์: 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุต่อความแข็งของวัสดุ 2) เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างวัสดุแต่ละชนิดที่ระดับความแข็งต่างกัน (ต่ำและสูง) 3) เพื่อระบุวัสดุที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดหรือต่ำสุดตามต้องการในบริบทของการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ

4.2 ขั้นตอนที่ 2 การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Selecting Factors, Levels, and Ranges)

4.2.1 ปัจจัย: สิ่งที่ต้องการศึกษาว่ามีผลต่อผลลัพธ์อย่างไร กำหนดให้ปัจจัยหลักคือ “ชนิดของวัสดุ”

4.2.2 ระดับ: ค่าหรือลักษณะเฉพาะของแต่ละปัจจัยที่สนใจ “ชนิดของวัสดุ” มี 3 ระดับ ได้แก่ SS400 SCM440 และ S50C

4.2.3 ขอบเขต: ระบุ “ระดับต่ำ” และ “ระดับสูง” ของความแข็งสำหรับแต่ละวัสดุด้วยวิธีการทดสอบความแข็งของวัสดุด้วยเครื่องวัดความแข็ง (hardness tester) รุ่น MH600 MITECH ผลการวัดค่าความแข็งของวัสดุแต่ละชนิดและการระบุระดับได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4: การควบคุมปัจจัย

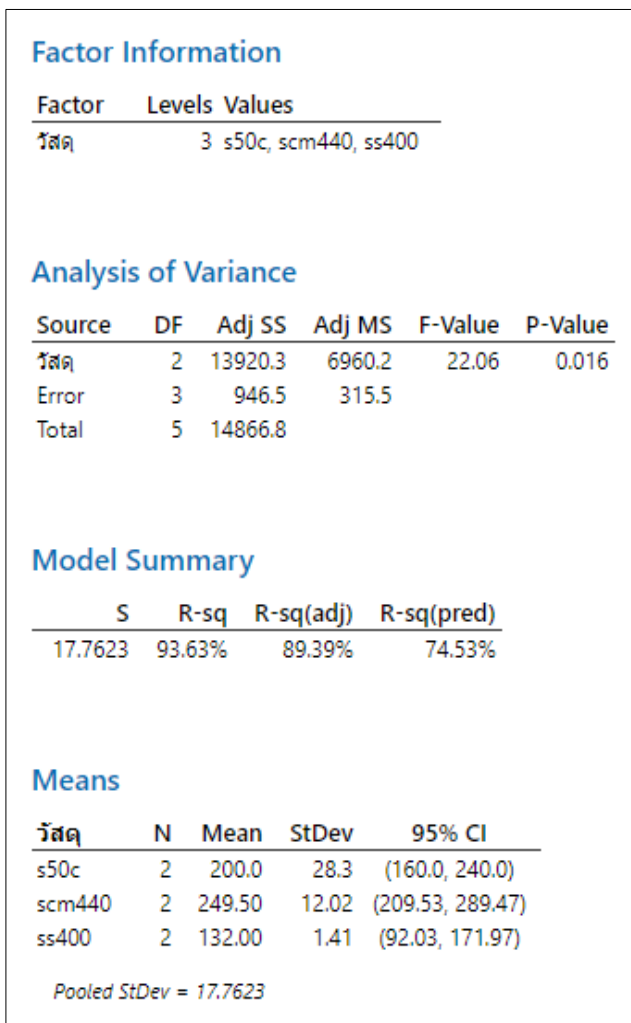
ปัจจัย		ระดับ		หน่วย
		ระดับต่ำ	ระดับสูง	
ความแข็งวัสดุ SS400	A	131	133	HB
ความแข็งวัสดุ SCM440	B	241	258	HB
ความแข็งวัสดุ S50C	C	180	220	HB

4.3 ขั้นตอนที่ 3 การเลือกตัวแปรผลลัพธ์ (Selecting Response Variables): ตัวแปรคือ “ความแข็ง” โดยใช้มาตรฐานการทดสอบด้วยวิธีทดสอบ Brinell (HB) ตามลักษณะวัสดุ

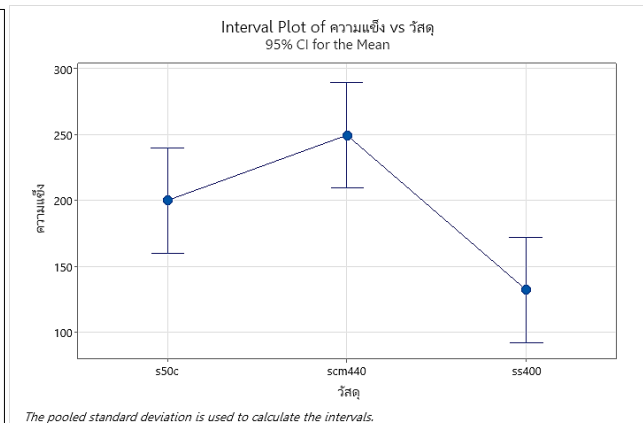
4.4 ขั้นตอนที่ 4 การเลือกรูปแบบการทดลอง (Selecting the Experimental Design): ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และจำนวนปัจจัย/ระดับ จากข้อมูลในตาราง (ปัจจัยเดียว 3 ระดับ) รูปแบบการทดลองที่เหมาะสมอาจเป็นการทดลองแบบปัจจัยเดียว (one-way ANOVA or single factor design) 1) เนื่องจากมีปัจจัยเดียวคือ “ชนิดของวัสดุ” ที่มี 3 ระดับ (SS400 SCM440 และ S50C) สามารถใช้การทดลองแบบปัจจัยเดียวเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งระหว่างวัสดุทั้งสามชนิดได้ 2) การเก็บข้อมูลความแข็งสำหรับวัสดุแต่ละชนิดโดยอาจจะมีการทำซ้ำ (replications) สำหรับแต่ละชนิด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์และสามารถทำการวิเคราะห์ทางสถิติได้ เช่น ANOVA

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ ANOVA

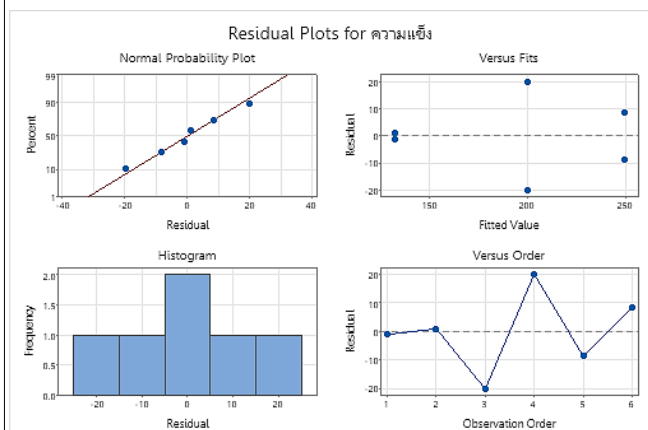
การพัฒนาวัสดุเสริมแรงของฟันชุดบุงกีหมุ่น เป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงแก้ไขและพัฒนากระบวนการผลิต และรูปแบบ one-way ANOVA เป็นหนึ่งในวิธีการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบของวัสดุเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ แสดงขั้นตอนการทำงานและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการออกแบบการทดลอง และเมื่อพิจารณาตัวแปรสำหรับวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด ดังรูปที่ 11 และสามารถคำนวณได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11: การวิเคราะห์ผลทางสถิติ ANOVA
ด้วยโปรแกรม Minitab Statistical Software 22.3.1.0



รูปที่ 12: การวิเคราะห์ผล interval plots ความแข็งกับวัสดุ
ด้วยโปรแกรม Minitab Statistical Software 22.3.1.0



รูปที่ 13: การวิเคราะห์ผล residual plots สำหรับความแข็ง
ด้วยโปรแกรม Minitab Statistical Software 22.3.1.0

ผลการวิเคราะห์ค่า $p\text{-value} = 0.016$ ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha = 0.05$) แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของวัสดุ (ที่ระดับนัยสำคัญทั่วไป) สามารถสรุปได้ว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ชนิดของวัสดุเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ใช่เกิดจากความบังเอิญ อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว การรู้นัยสำคัญทางสถิติยังไม่เพียงพอ จำเป็นต้องพิจารณาขนาดของผลกระทบเพื่อทำความเข้าใจถึงความสำคัญในเชิงปฏิบัติของความแตกต่างนี้

Partial Eta-squared (η_p^2) หรือ Eta-squared (η^2) ในบริบทของ ANOVA, η^2 บอกสัดส่วนของความแปรปรวนในตัวแปรตาม (ความแข็งแรง) ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ (วัสดุ) สามารถคำนวณ η^2 ได้จากตาราง ANOVA รายละเอียดดังสมการที่ (1)

$$\eta^2 = \frac{\text{Adj SS for Factor}}{\text{Total SS}} = \frac{13,920.3}{14,866.8} \approx 0.9363 \text{ หรือ } 93.63\% \quad (1)$$

การตีความ ค่า $\eta^2 = 0.9363$ หรือร้อยละ 93.63 เป็นค่าที่สูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า R-sq ใน model summary หมายความว่า ประมาณร้อยละ 93.63 ของความแปรปรวนทั้งหมดในค่าความแข็งแรงสามารถอธิบายได้ด้วยชนิดของวัสดุ แสดงให้เห็นว่าชนิดของวัสดุมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งแรง และเป็นปัจจัยหลักที่ขับเคลื่อนความแตกต่างของความแข็งแรงที่สังเกตเห็น

จากแนวทางการตีความของ Cohen 1) $\eta^2 = 0.01$: ผลกระทบเล็ก 2) $\eta^2 = 0.06$: ผลกระทบปานกลาง 3) $\eta^2 = 0.14$: ผลกระทบใหญ่ ค่า 0.9363 นั้นสูงกว่าเกณฑ์ ผลกระทบใหญ่มาก แสดงให้เห็นถึง ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก (very large effect) ของชนิดวัสดุต่อความแข็งแรง

6. Cohen's d สำหรับการเปรียบเทียบแต่ละคู่ (จากการเปรียบเทียบภายหลัง; Post-hoc Tests)

ถึงแม้จะไม่ได้ผลลัพธ์ของ post-hoc tests โดยตรง แต่สามารถคำนวณ Cohen's d โดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม (Pooled St.Dev = 17.7623) เพื่อประเมินขนาดของความแตกต่างระหว่างคู่ของวัสดุ สามารถคำนวณเปรียบเทียบคู่วัสดุและวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5: การเปรียบเทียบแต่ละคู่วัสดุด้วยวิธี Cohen's d

คู่ที่ 1 : SCM440 vs. SS400	คู่ที่ 2 : SCM440 vs. S50C	คู่ที่ 3 : S50C vs. SS400
Mean (SCM440) = 249.50 Mean (SS400) = 132.00 Pooled St.Dev = 17.7623 Cohen's d = $\frac{249.50-132.00}{17.7623}$ ≈ 6.61	Mean (SCM440) = 249.50 Mean (S50C) = 200.00 Pooled St.Dev = 17.7623 Cohen's d = $\frac{249.50-200.00}{17.7623}$ ≈ 2.79	Mean (S50C) = 200.00 Mean (SS400) = 132.00 Pooled St.Dev = 17.7623 Cohen's d = $\frac{200.00-132.00}{17.7623}$ ≈ 3.83
ค่า d = 6.61 เป็น ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก แสดงว่าความแตกต่างของความแข็งแรงระหว่าง SCM440 และ SS400 ค่าความแข็งแรงของ SCM440 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ SS400	ค่า d = 2.79 ยังคงเป็น ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก แสดงว่า SCM440 ให้ความแข็งแรงที่สูงกว่า S50C อย่างมีนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติ	ค่า d = 3.83 ก็เป็น ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มากเช่นกัน แสดงว่า S50C ให้ความแข็งแรงที่สูงกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติ

การรายงานผลขนาดของผลกระทบ (effect size reporting in psychology) ได้กำหนดเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการตีความค่าขนาดของผลกระทบในงานวิจัยเชิงสถิติไว้ดังนี้

$\eta^2 = 0.01$ หมายถึง ผลกระทบขนาดเล็ก (small effect)

$\eta^2 = 0.06$ หมายถึง ผลกระทบขนาดปานกลาง (medium effect)

$\eta^2 = 0.14$ หมายถึง ผลกระทบขนาดใหญ่ (large effect)

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ($\eta^2 \approx 0.9363$) พบว่าอยู่ในระดับที่สูงกว่าเกณฑ์ผลกระทบขนาดใหญ่หลายเท่า ซึ่งจัดเป็น ผลกระทบขนาดใหญ่มาก และสอดคล้องกับแนวทางการวิเคราะห์เชิงปฏิบัติที่ระบุว่าค่าที่เกินกว่า 0.14 สามารถจัดอยู่ในระดับ “มีอิทธิพลอย่างมากในทางปฏิบัติ” ได้ [25], [26], [27] นอกจากนี้ ในส่วนของการคำนวณค่า Cohen's d สำหรับการเปรียบเทียบแต่ละคู่ของวัสดุ (ตารางที่ 5–7) ก็ใช้เกณฑ์มาตรฐานเดียวกัน โดยอ้างอิงจาก ซึ่งกำหนดไว้ดังนี้

$d = 0.2 \rightarrow$ ผลกระทบขนาดเล็ก

$d = 0.5 \rightarrow$ ผลกระทบขนาดปานกลาง

$d = 0.8 \rightarrow$ ผลกระทบขนาดใหญ่

โดยค่าที่ได้ในงานวิจัยนี้ (เช่น $d = 6.61$ สำหรับคู่ SCM440 vs. SS400) แสดงถึงผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มากในเชิงปฏิบัติ ซึ่งสนับสนุนข้อสรุปเกี่ยวกับความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทั้งเชิงสถิติและการใช้งานจริง

7. การทดสอบ Tukey's Honest Significant Difference (Tukey's HSD)

ใช้ค่า q (studentized range statistic) ในการคำนวณ โดยมีสูตรสำหรับการคำนวณค่า HSD ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \text{HSD} &= q_{\alpha, df_{\text{error}}, k} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \\ \text{HSD} &= 4.60 \times \frac{17.7623}{\sqrt{2}} \approx 57.776 \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ $q_{\alpha, df_{\text{error}}, k}$ คือ ค่า studentized range statistic ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$; df_{error} ; $df = 3$; จำนวนกลุ่ม $k = 3$ ได้ค่า $q \approx 4.60$ (ค่าอาจแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับตารางที่ใช้)

S คือ pooled standard deviation (17.7623)

n คือ จำนวนตัวอย่างต่อกลุ่ม (ซึ่งในที่นี้คือ 2)

การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกับ HSD จะเปรียบเทียบความแตกต่างสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยแต่ละคู่กับค่า HSD ที่คำนวณได้ หาก $|\text{Mean}_i - \text{Mean}_j| > \text{HSD}$ แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ สามารถคำนวณเปรียบเทียบคู่วัสดุและวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: การเปรียบเทียบแต่ละคู่วัสดุด้วยวิธี Tukey's HSD

คู่ที่ 1: SCM440 vs. SS400	คู่ที่ 2: SCM440 vs. S50C	คู่ที่ 3: S50C vs. SS400
$= \text{Mean (SCM440)} - \text{Mean (SS400)} $ $= 249.50 - 132.00 = 117.50$ เปรียบเทียบ: $117.50 > 57.776$	$= \text{Mean (SCM440)} - \text{Mean (S50C)} $ $= 249.50 - 200.00 = 49.50$ เปรียบเทียบ: $49.50 < 57.776$	$= \text{Mean (S50C)} - \text{Mean (SS400)} $ $= 200.00 - 132.00 = 68.00$ เปรียบเทียบ: $68.00 > 57.776$
SCM440 และ SS400 มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ	SCM440 และ S50C ไม่มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$	S50C และ SS400 มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

8. การทดสอบ Bonferroni Correction

จะปรับระดับนัยสำคัญ (α) สำหรับแต่ละการเปรียบเทียบ เพื่อควบคุม Family-wise Error Rate จำนวนการเปรียบเทียบที่เป็นไปได้ (m) ดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} m &= \frac{k(k-1)}{2} \\ &= \frac{3(3-1)}{2} \\ &= 3 \text{ คู่} \end{aligned} \quad (3)$$

ระดับนัยสำคัญที่ปรับแล้ว ($\alpha_{\text{Bon ferroni}}$) ดังสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} (\alpha_{\text{Bon ferroni}}) &= \frac{\alpha}{m} \\ &= \frac{0.05}{3} \\ &\approx 0.0167 \end{aligned} \quad (4)$$

ทำการทดสอบ t-test สำหรับแต่ละคู่และเปรียบเทียบ p-value ที่ได้กับ $\alpha_{\text{Bon ferroni}} = 0.0167$ ดังสมการที่ (5)

$$t\text{-statistic:} \quad t = \frac{\text{Mean}_1 - \text{Mean}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (5)$$

degrees of freedom (df) สำหรับ t-test ในแต่ละคู่ คือ $df_{\text{error}} = 3$ สามารถคำนวณเปรียบเทียบคู่วัสดุและวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7: การเปรียบเทียบแต่ละคู่วัสดุด้วยวิธี Bonferroni correction

คู่ที่ 1: SCM440 vs. SS400	คู่ที่ 2: SCM440 vs. S50C	คู่ที่ 3: S50C vs. SS400
$t = \frac{249.50 - 132.00}{17.7623 \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}}$ ≈ 6.61	$t = \frac{249.50 - 200.00}{17.7623 \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}}$ ≈ 2.79	$t = \frac{200.00 - 132.00}{17.7623 \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}}$ ≈ 3.83
ที่ $df = 3$, ค่า $t = 6.61$ มี p -value (สองทาง) ที่ต่ำกว่า 0.0167 มาก (เนื่องจาก $t_{0.0167/2,3}$ จะมีค่าต่ำกว่า 6.61 มาก)	ที่ $df = 3$, ค่า $t = 2.79$ มี p -value (สองทาง) อยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 0.10 (ประมาณ 0.06-0.07 จากตาราง t-distribution) ซึ่งสูงกว่า 0.0167	ที่ $df = 3$, ค่า $t = 3.83$ มี p -value (สองทาง) อยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.05 (ประมาณ 0.03-0.04 จากตาราง t-distribution) ซึ่งสูงกว่า 0.0167
SCM440 และ SS400 มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ	SCM440 และ S50C ไม่มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ที่ระดับ $\alpha_{\text{Bon ferroni}} = 0.0167$)	S50C และ SS400 ไม่มีความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ที่ระดับ $\alpha_{\text{Bon ferroni}} = 0.0167$)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. อภิปรายผลทางสถิติ

1.1 ผล post-hoc tests: จากทั้ง Tukey's HSD และ Bonferroni correction ได้ข้อสรุปที่คล้ายกันแต่ก็มีความแตกต่างกันในบางประเด็นเนื่องจากความเข้มงวดของวิธีการ

1.1.1 SCM440 vs. SS400: 1) Tukey's HSD: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($117.50 > 57.776$) 2) Bonferroni: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0167$) โดยทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน คือ วัสดุ SCM440 มีความแข็งแรงสูงกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างชัดเจน ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (117.50) มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความผันผวนของข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับการตีความขนาดของผลกระทบ (Cohen's $d = 6.61$) ที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้านี้ บ่งชี้ว่าการเลือกใช้วัสดุสองชนิดนี้จะส่งผลต่อความแข็งแรงในเชิงปฏิบัติอย่างมาก

1.1.2 SCM440 vs. S50C: 1) Tukey's HSD: ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($49.50 < 57.776$) 2) Bonferroni: ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.0167$) โดยทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันว่า แม้ SCM440 จะมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงสูงกว่า S50C แต่ความแตกต่าง 49.50 หน่วยนั้นยังไม่ถือว่ามีความสำคัญทางสถิติเมื่อควบคุมอัตราความผิดพลาดสำหรับการเปรียบเทียบแล้ว อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดของผลกระทบ (Cohen's $d = 2.79$) ที่เป็นขนาดใหญ่มาก ความแตกต่างนี้อาจยังมีความสำคัญในเชิงปฏิบัติหากมีความต้องการความแข็งแรงที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่อการใช้งาน

1.1.3 S50C vs. SS400: 1) Tukey's HSD: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($68.00 > 57.776$) 2) Bonferroni: ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.0167$) โดยผลลัพธ์สำหรับคู่นี้มีความแตกต่างกันระหว่างสองวิธี Bonferroni เป็นวิธีที่อนุรักษ์นิยมกว่า (เข้มงวดกว่า) และพบว่าไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ Tukey's HSD พบว่ามีนัยสำคัญ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคือ 68.00 หน่วย ซึ่งจากการวิเคราะห์ Cohen's d (3.83) ถือเป็นผลกระทบที่มีขนาดใหญ่มาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติอาจกล่าวได้ว่า S50C มีความแข็งแรงสูงกว่า SS400 อย่างชัดเจน แต่ในทางสถิติด้วยการควบคุมที่เข้มงวดของ Bonferroni ก็อาจจะไม่พบความแตกต่าง ซึ่งอาจเกิดจากขนาดตัวอย่างที่เล็ก

1.2 สำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างวัสดุ: SCM ให้ค่าเฉลี่ยสูงสุด (249.5) ผลนี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุ SCM มีแนวโน้มที่จะให้ค่าของตัวแปรที่วัดสูงกว่าวัสดุอื่น ๆ อย่างชัดเจน ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ การที่ค่า F มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) สนับสนุนข้อสังเกตว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างวัสดุนั้นไม่ใช่เรื่องบังเอิญ ช่วงความเชื่อมั่น (ร้อยละ 95 CI) ไม่ซ้อนทับกันมาก เนื่องจากช่วงความเชื่อมั่นที่ไม่ซ้อนทับกัน หรือซ้อนทับกันน้อยมาก เป็นหลักฐานที่สนับสนุนว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มวัสดุมีความแตกต่างกันอย่างแท้จริงในประชากร การซ้อนทับกันของช่วงความเชื่อมั่นน้อยบ่งชี้ว่าความแตกต่างที่สังเกตได้นั้นมีความเสถียรและไม่น่าจะเกิดจากความผันแปรของการสุ่มตัวอย่างดังรูปที่ 12 และจากรูปที่ 12 แผนภูมิช่วง (interval plot) ที่แสดงช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของวัสดุทั้ง 3 ชนิด สามารถวิเคราะห์ผลจากกราฟได้ดังนี้

1.2.1 SCM440: มีจุดที่แสดงค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 250 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองวัสดุ ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แท่งบอกความคลาดเคลื่อน (error bar) สำหรับ SCM440 อยู่ในช่วงประมาณ 210 ถึง 290 ช่วงนี้ค่อนข้างกว้าง แสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลในกลุ่มนี้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ช่วงความเชื่อมั่นนี้ไม่ทับซ้อนกับช่วงความเชื่อมั่นของ SS400 อย่างชัดเจน

1.2.2 S50C: มีจุดที่แสดงค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 200 ซึ่งอยู่ระหว่างค่าเฉลี่ยของ SCM440 และ SS400 ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับ S50C อยู่ในช่วงประมาณ 160 ถึง 240 ช่วงนี้ค่อนข้างกว้างที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งสาม แสดงว่าข้อมูลความแข็งแรงสำหรับ S50C มีความแปรปรวนมากที่สุด

1.2.3 SS400: มีจุดที่แสดงค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 130 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับ SS400 อยู่ในช่วงประมาณ 90 ถึง 170 ช่วงนี้มีความกว้างปานกลาง และไม่ทับซ้อนกับช่วงความเชื่อมั่นของ SCM440 อย่างชัดเจน

1.3 การวิเคราะห์พล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plots) สำหรับความแข็งแรง: จากรูปที่ 13 สามารถสรุปได้ดังนี้

1.3.1 พล็อตความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot): จุดของข้อมูลพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน เรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นตรงในแนวทแยงมุม ซึ่งบ่งชี้ว่า พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ (normally distributed) สมมติฐานเรื่องความเป็นปกติของข้อมูลในการวิเคราะห์ ANOVA ได้รับการยืนยัน ทำให้การสรุปผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ

1.3.2 พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าที่ทำนายได้ (Versus Fits): จุดข้อมูลกระจายตัวแบบสุ่มรอบ ๆ เส้นศูนย์ (แกนนอน) และไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน (เช่น รูปทรงกรวย โค้งงอ หรือกลุ่มก้อน) แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนข้อมูลคงที่ (constant variance) หรือเป็นภาวะความแปรปรวนเท่ากัน (homoscedasticity) ซึ่งเป็นไปตามข้อสมมติฐานที่สำคัญของการวิเคราะห์ ANOVA

1.3.3 กราฟฮิสโทแกรม (Histogram): กราฟเส้นโค้งรูประฆัง (bell-shaped curve) และอยู่กึ่งกลางที่ค่าศูนย์ (0) เป็นการยืนยันอีกครั้งว่า พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากพล็อตความน่าจะเป็นปกติ

1.3.4 พล็อตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับลำดับการสังเกต (Versus Order): จุดข้อมูลกระจายตัวอย่างสุ่มตลอดแนวแกน x และไม่มีรูปแบบที่เป็นระบบ เช่น แนวโน้มขาขึ้นหรือขาลง บ่งบอกว่า ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูล หรือไม่มีอิทธิพลจากตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมซึ่งเกิดขึ้นตามเวลา

2. อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังตารางการประเมินการสึกหรอหรือการซ่อมบำรุงฟันชุดของรถชุดบั้งก็๋หมุ่น ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8: การประเมินการสึกหรอหรือการซ่อมบำรุงฟันชุดของรถชุดบั้งก็๋หมุ่น

ชุดที่	วัสดุ	วัน/เดือน/ปี ติดตั้ง-สิ้นสุด (x)	สถานะ หน้าดิน	การปนของ ทราย (%)	Service Meter Units (SMU)	ชั่วโมงการทำงาน ทั้งหมด (hr)	ค่าเฉลี่ยชั่วโมงการ ทำงานต่อวัน ($\bar{x}$)
1	S50C	28/08/2024–05/09/2024	ดินปนทราย	50	38631–38517	114	12.6
2	SCM440	05/09/2024–10/09/2024	ดินปนทราย	100	38677–38631	46	7.6
3	SS400	12/09/2024–14/09/2024	ดินปนทราย	50	38730–38696	34	11.3

หมายเหตุ: ช่วงเวลาติดตั้ง-สิ้นสุดการทำงานนับเป็นวัน 24 ชั่วโมงต่อวันแทนค่า x และชั่วโมงการทำงานทั้งหมดแทนด้วย hr โดยที่ค่าเฉลี่ยชั่วโมงการทำงาน

ต่อวันหาได้จาก $\bar{x} = \frac{hr}{x}$ ชั่วโมงต่อวัน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าวัสดุ SCM440 มีการทำงานในสภาพหน้าดินที่มีทรายปนอยู่ร้อยละ 100 และมีชั่วโมงการทำงานน้อยกว่า S50C อย่างมาก (46 ชั่วโมง เทียบกับ 114 ชั่วโมง) และวัสดุ SS400 ทำงานในสภาพหน้าดินเดียวกับ S50C ดินที่มีทรายปนอยู่ร้อยละ 50 มีชั่วโมงการทำงานน้อยกว่า (34 ชั่วโมง เทียบกับ 114 ชั่วโมง) บ่งชี้ว่าวัสดุ SCM440 มีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่า S50C ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง หากพิจารณาจากอัตราการสึกหรอต่อชั่วโมงการทำงาน สภาพหน้าดินที่มีทรายปนอยู่มากมีผลต่ออัตราการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ และวัสดุ SCM440 อาจมีความทนทานต่อการสึกหรอที่ดีกว่าภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง

สรุปผล

การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าชนิดของวัสดุเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยมีความสำคัญทางสถิติสูง (p -value = 0.016) และมีขนาดของผลกระทบที่ใหญ่มาก ($\eta^2 \approx 93.63\%$) ซึ่งหมายถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติ วัสดุ SCM440 ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด และแตกต่างจาก SS400 อย่างมีนัยสำคัญทั้งทางสถิติและเชิงปฏิบัติอย่างชัดเจน ในขณะที่ S50C แข็งกว่า SS400 อย่างมีนัยสำคัญเชิงปฏิบัติเช่นกัน ถึงแม้ว่าการเปรียบเทียบระหว่าง SCM440 กับ S50C และ S50C กับ SS400 จะมีข้อขัดแย้งในผล post-hoc tests บางค่า แต่ขนาดของผลกระทบที่สูงยังคงยืนยันถึงความแตกต่างที่มีความหมายต่อการใช้งานจริง ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การเพิ่มความแข็งแรงการเลือกใช้ SCM440 แทน SS400 จึงเป็นการตัดสินใจที่มีเหตุผลทางสถิติและเชิงปฏิบัติอย่างยิ่ง

ความแข็งแรงที่สูงของ SCM440 สอดคล้องกับคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอแบบกัดกร่อนที่สูงกว่า ซึ่งอ้างอิงได้จากผลการทดลอง แม้ว่าเงื่อนไขการทำงานจะแตกต่างกันโดย SCM440 ที่มีความแข็งแรงสูงสุดต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมการกัดกร่อนที่รุนแรงที่สุด (ทรายปนร้อยละ 100) ในขณะที่ S50C และ SS400 ทำงานในสภาวะที่มีทรายปนร้อยละ 50 การที่ SCM440 ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีภายใต้สภาวะกัดกร่อนที่รุนแรงกว่าอย่างชัดเจน บ่งชี้ถึงความทนทานต่อการสึกหรอที่มากกว่า เมื่อพิจารณาว่าอัตราการสึกหรอจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในสภาพดินทรายร้อยละ 100 ผลการทดลองนี้จึงยืนยันว่า SCM440 มีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่า S50C และ SS400 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงทางสถิติและเชิงปฏิบัติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท สหกลอวิปเมนท์ จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรสำหรับงานชุดขนหน้าดินรถชุดบั้งก็๋หมุ่น คุณไตรมาส ปิดกันภัย ตำแหน่ง วิศวกรควบคุมงาน และคุณสุธี นารอด ตำแหน่ง หัวหน้าควบคุมงาน ที่ให้ความสนับสนุนการทดลองและข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้

REFERENCES

- [1] Admins. "Bucket wheel excavator: Welding trial & comparison VAUTID hard facing," VARAKANA.com, 2024. Accessed: Mar. 9, 2026. [Online]. Available: <https://varakana.com/vautid/bucket-wheel-excavator/>
- [2] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [3] J. R. Davis, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Materials Park, OH, USA: ASM Int., 2001.
- [4] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [5] *Handbook of Comparative World Steel Standards*, 5th ed. West Conshohocken, PA, USA: ASTM Int., 2016.
- [6] M. Tantrabandit, *Engineering Materials*, 5th ed. Bangkok, Thailand: TPA Publishing (in Thai), 1997.
- [7] R. Ranjan, "An overview on enhancing materials' tribological and mechanical characteristics by using gas metal arc weld hardfacing," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 17, no. 1, pp. 8–16, 2024, doi: 10.25103/jestr.171.08.
- [8] B. A. M. Mohan, M. U. Rahaman, P. G. R. Madhu, and M. B. Khot, "Finite element analysis & topology optimization of excavator bucket teeth for optimal performance," *Mining Technol.*, vol. 133, no. 3, pp. 214–225, 2024.
- [9] G. H. Lee, J. K. Park, and K. W. Nam, "Improvement of safety and reliability of SCM440 steel with induction hardening," *Key Eng. Mater.*, vol. 972, pp. 31–42, 2023, doi: 10.4028/p-ol5yEy.
- [10] K. Holmberg and A. Matthews, *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2009.
- [11] G. P. Tilly, "Erosion caused by impact of solid particles," in *Treatise on Materials Science and Technology*, vol. 13. New York, NY, USA: Academic Press, 1979, pp. 287–319.
- [12] I. Hutchings and P. Shipway, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [13] N. E. Berdimuratov, Y. Y. Kambarov, M. Maulet, S. D. Bolatov, Z. B. Saadoldina, and D. R. Baizhan, "Electro friction treatment of Plow shares," *Bull. Karaganda Univ. Phys. Ser.*, vol. 29, no. 1, pp. 66–72, 2024.
- [14] M. Younas, A. Khan, S. H. I. Jaffery, Z. Khan, and N. Khan, "Investigation of tool wear and energy consumption in machining Ti6Al4V alloy with uncoated tools," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 132, pp. 3785–3799, 2024.
- [15] G. S. Ghule et al., "Investigation of conventional and ultrasonic vibration-assisted turning of hardened steel using a coated carbide tool," *Front. Mech. Eng.*, vol. 10, 2024, Art no. 1391315.
- [16] G. B. Sathishkumar, B. Asaithambi, and V. Srinivasan, "Surface modification of AZ61 magnesium alloy with stelcar alloy powder using laser cladding technique," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 14, pp. 1485–1496, 2024.
- [17] P. Reiss et al., "Editorial: Technologies for prospecting, extraction, and utilization of space resources," *Front. Space Technol.*, vol. 5, 2024. Art. no. 1493494.
- [18] A. Christou et al., "Sustainable wastewater reuse for agriculture," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 5, no. 7, pp. 504–521, 2024.
- [19] Z. Zhang et al., "Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa," *Sci. Total Environ.*, vol. 930, 2024, Art. no. 172794.
- [20] X. Zhang, H. Zhu, X. Jiang, and W. Broere, "Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 16, no. 9, pp. 3841–3863, 2024.
- [21] T. Chen et al., "Aero-engine blade cryogenic cooling milling deformation simulation and process parameter optimization," *Materials*, vol. 16, no. 11, 2023, Art. no. 4072.
- [22] R. Brighenti, A. Carpinteri, and F. Artoni, "Crack Paths in soft thin sheets," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 13, no. 48, pp. 1–9, 2019.
- [23] R. Kraiklang et al., "Influence of factors on wear resistance property in aluminum surface composite by friction stir processing," *J. Manuf. Manage. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2022.



- [24] H. N. Altalhi, "Dig limits optimization using binary integer linear programming method in open pit mines," M.S. thesis, Mining Explosives Eng. Dept., Missouri Univ. Sci. Technol., Rolla, MO, USA, 2023.
- [25] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. New York, NY, USA: Routledge, 1988.
- [26] D. Lakens, "Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs," *Front. Psychol.*, vol. 4, 2013, Art. no. 863.
- [27] A. Field, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*, 6th ed. London, U.K.: SAGE Publications, 2024.

การประยุกต์การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อการตัดสินใจเชิงข้อมูลในการลดของเสียจากการ ดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด : กรณีศึกษาบริษัทอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง

จิรนนท์ ใจเอื้อ¹ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข^{2*} กนกกรรณ ลีโรจนาประภา³ ไยแก้ว ศีลรักษ์⁴

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

³ ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

⁴ คณะศิลปศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บทความ: kittiwat.sirikasemsuk@gmail.com

รับต้นฉบับ: 1 สิงหาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 10 กันยายน 2568; ตอบรับบทความ: 23 กันยายน 2568

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

บริษัทอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง พบว่า อัตราความล้มเหลวในการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดอยู่ในระดับสูงคิดเป็นร้อยละ 43.5 ส่งผลให้เกิดของเสียจำนวนมากและเพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (discriminant analysis) เพื่อจำแนกชิ้นงานเป็นกลุ่มของดีและกลุ่มของเสีย พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรหลักที่มีผลต่อการลดของเสียในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยใช้ข้อมูลจริงจำนวน 180 ชุดเพื่อสร้างและทดสอบสมการ ตัวแปรทำนาย (X) ได้แก่ ระยะเข็ม (X_1) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ ระยะเข็ม (X_1) และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสำเร็จของกระบวนการ แบบจำลองหรือสมการเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวต้นได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีความแม่นยำร้อยละ 95.14 ในการสร้างโมเดล และร้อยละ 97.22 ในการทดสอบ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าที่เหมาะสม คือ ระยะเข็ม (X_1) เท่ากับ 502 ไมโครเมตร และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) เท่ากับ -0.55 มิลลิบาร์ ขณะเดียวกันมีการเสนอให้ตั้งค่าแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) เท่ากับ -0.15 มิลลิบาร์ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนจำนวนแผ่นที่ดึงวงจรรวมไม่ขึ้นลดลงร้อยละ 13.25 และค่าเฉลี่ยจำนวนวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นลดลงร้อยละ 43.36 อันทำให้ลดต้นทุนการกำจัดของเสียได้ถึงร้อยละ 48.25

คำสำคัญ: การลดของเสีย เทปรองรับการตัด การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม วงจรรวม การดึงวงจรรวม

Applying Discriminant Analysis for Data-Driven Decision Making to Reduce Defects in Integrated Circuit Pick-Up from Dicing Tape: A Case Study of an Electronics Company

Jiranan Jaior¹ Kittiwat Sirikasemsuk^{2*} Kanogkan Leerojanaprapa³ Yaikaew Silrak⁴

^{1, 2*}*Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

³*Department of Statistics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

⁴*School of Liberal Arts, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

*Corresponding author e-mail: kittiwat.sirikasemsuk@gmail.com

Received: 1 August 2025; Revised: 10 September 2025; Accepted: 23 September 2025

Published online: 27 April 2026

Abstract

An electronics manufacturer experienced a high failure rate in picking up integrated circuits (ICs) from dicing tape at 43.5 percent, leading to increased waste and production costs. This research aimed to investigate the factors affecting the IC pick-up process by applying discriminant analysis to classify the workpieces into two groups: good and defective. The study also sought to identify the optimal values of key variables contributing to defect reduction in the inspection and packaging processes. A total of 180 actual production data sets were used to build and validate the model. Predictor variables included needle distance (X_1), vacuum suction force of the pick-up head (X_2), and vacuum suction force of the dicing tape needle (X_3). The analysis revealed that the two key factors—needle distance and vacuum suction force of the pick-up head—significantly influenced the success of the process. The model achieved 95.14 percent accuracy in training and 97.22 percent in testing. The optimal settings were 502 micrometers for X_1 and -0.55 millibar for X_2 . Additionally, the suction force of the dicing tape needle (X_3) was recommended to be set at -0.15 millibar. This resulted in an average proportion of IC pick-up failures decreased by 13.25 percent and the average number of IC that failed to pull up decreased by 43.36 percent that leads to a disposal cost reduction by 48.25 percent.

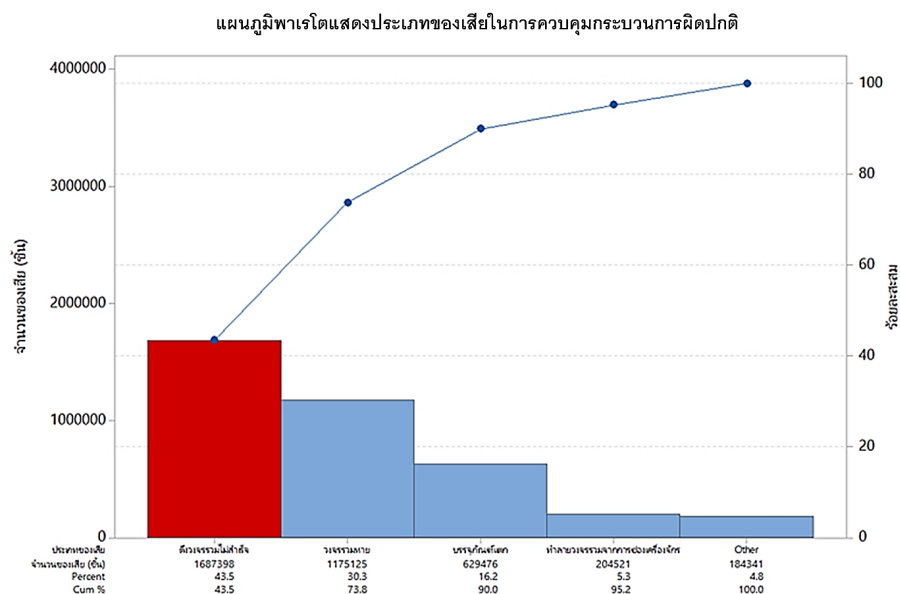
Keywords: Defect reduction, Dicing tape, Discriminant analysis, Integrated circuit, Pick-up integrated circuit

บทนำ

การผลิตเซมิคอนดักเตอร์เป็นการผลิตสารกึ่งตัวนำ หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติกึ่งนำไฟฟ้าโดยนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องมือสื่อสาร รถยนต์ และสินค้าเทคโนโลยีอื่น ๆ ซึ่งถูกพัฒนาให้ทันสมัย [1] อุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์จึงเป็นหัวใจสำคัญของเศรษฐกิจการค้ายุคใหม่ และเป็นตัวขับเคลื่อนทางเทคโนโลยีที่มีความท้าทายซึ่งถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีขนาดเล็กและประมวผลได้อย่างรวดเร็ว [2] ส่งผลให้ยอดขายเซมิคอนดักเตอร์มีแนวโน้มขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 7.1 ต่อปีระหว่างปี พ.ศ. 2564–2569 [3] เมื่อพิจารณาการเติบโตของอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ทำให้ผู้ผลิตต้องเผชิญกับภาวะการแข่งขันสูงไม่ว่าจะเป็น การส่งมอบสินค้าที่รวดเร็ว การเพิ่มกำลังการผลิต การลดของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขันด้านธุรกิจมากยิ่งขึ้น

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ โรงงานกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายเซมิคอนดักเตอร์ คือ วงจรรวม (integrated circuit) สำหรับรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ระบบรักษาความปลอดภัย เครื่องมือสื่อสาร และอื่น ๆ ซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของผู้บริโภค ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงให้ความสำคัญกับการพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็น การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และนำเทคโนโลยีมาช่วยในการตรวจสอบเพื่อความแม่นยำเพื่อให้วงจรรวมมีความน่าเชื่อถือ [4] กระบวนการผลิตวงจรรวมของโรงงานกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการ ได้แก่ 1) กระบวนการเตรียมประกอบ (pre-assembly) 2) กระบวนการประกอบ (assembly) 3) กระบวนการทดสอบค่าทางไฟฟ้า (electrical test) และ 4) กระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ (inspection and packaging) [5]

จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าโรงงานกรณีศึกษามียอดการผลิตวงจรรวม 4,586 ล้านชิ้นต่อปี โดยวงจรรวมไม่มีขาขึ้น (Quad Flat No-Lead) หรือ QFN มีของเสียมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 55.3 เมื่อจำแนกประเภทของเสียแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ 1) ความเสียหายที่ขางจรรวม คิดเป็นร้อยละ 25 2) ความเสียหายของวงจรรวมด้านเครื่องหมาย คิดเป็นร้อยละ 23.3 และ 3) ของเสียจากการควบคุมกระบวนการผลิต คิดเป็นร้อยละ 51.7 ซึ่งพบมากที่สุดเป็นอันดับ 1 และมีสาเหตุมาจากการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด (dicing tape) ไม่สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 43.5 ของจำนวนของเสียจากการควบคุมกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 1 โดยมีสัดส่วนของจำนวนแผ่นที่ดึงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อล้อต่อการผลิต คิดเป็นร้อยละ 3.02 และมีค่าเฉลี่ยของจำนวนวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นต่อล้อต่อการผลิตอยู่ที่ 113 ตัว จากปัญหาดังกล่าวทำให้โรงงานกรณีศึกษาจำเป็นต้องกำจัด (scrap) วงจรรวมที่นำออกจากเทปรองรับการตัดไม่สำเร็จ และเพิ่มผลผลิตเพื่อทดแทนวงจรรวมที่ถูกลำจัด ส่งผลให้ต้นทุนในการทำลายวงจรรวมเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 1: แผนภูมิพารेटโต้ (pareto chart) แสดงความสำคัญของปัญหาที่เกิดจากการควบคุมกระบวนการผลิต

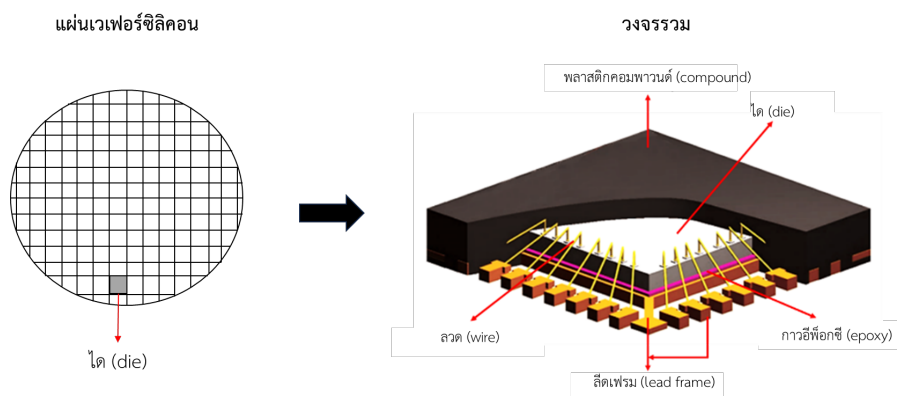
ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงมีความต้องการที่จะลดจำนวนของเสียจากการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตวงจรรวม และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อให้กระบวนการมีคุณภาพมากที่สุด

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ คือ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดโดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (discriminant analysis) เพื่อสร้างสมการพยากรณ์สำหรับการจำแนกกลุ่ม และหาค่าที่เหมาะสมเพื่อลดของเสียจากการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยกำหนดให้ตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ อัตรา หรือสัดส่วนของจำนวนแผ่นที่ดึงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิต (จำนวนแผ่นต่อจำนวนแผ่นทั้งหมดที่สนใจ) และตัวชี้วัดรอง ได้แก่ จำนวนหรือสัดส่วนของจำนวนวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิต และต้นทุนใช้ในการทำลายวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิต

1. การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

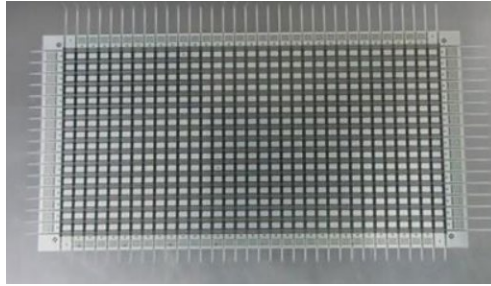
การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยการผลิตวงจรรวม การดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดและการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 *ทฤษฎีการผลิตวงจรรวม:* วงจรรวม คือ วงจรที่นำไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และองค์ประกอบวงจรต่าง ๆ มาประกอบรวมกันบนผลึกเดี่ยว หรือแผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนโดยอาศัยการถ่ายภาพอย่างละเอียดและการผสมระหว่างขบวนการทางเคมีเพื่อสร้างลายวงจรที่มีความละเอียดสูง แผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนดังกล่าวจะถูกนำมาตัดเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กแต่มีโครงสร้างของวงจรรวมอยู่ในชิ้นส่วนขนาดเล็กเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้ ทางอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงเรียกชิ้นส่วนนี้ว่า ได (die) เมื่อได้ผ่านการห่อหุ้มวงจรเรียบร้อยแล้วจึงเรียกว่า วงจรรวม หรือ ชิป (chip) ข้อดีของการผลิตวงจรรวมคือ มีน้ำหนักเบา และใช้พลังงานน้อยเนื่องจากวงจรรวมมีขนาดเล็กจึงใช้พื้นที่น้อย ผลิตเป็นจำนวนมาก และราคาวัตถุดิบต่ำ แต่มีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากไม่มีการเชื่อมต่อตะกั่วภายในวงจรรวม [4] วงจรรวมจะถูกผลิตในพื้นที่ควบคุมปริมาณฝุ่น อุณหภูมิและความชื้นเนื่องจากอุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงด้านสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม [6] ลักษณะวงจรรวมดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยลีดเฟรม (lead frame) หรือขางานทำหน้าที่รองรับได จากนั้นนำไดติดลีดเฟรมด้วยกาวอีพ็อกซี (epoxy) และเชื่อมลวด (wire) โดยใช้ลวดทองหรือลวดทองแดงเป็นเส้นทางนำกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นจะห่อหุ้มวงจรรวมเพื่อป้องกันความเสียหายโดยใช้พลาสติกคอมพาวนด์ (compound) และวงจรรวมจะถูกส่งไปทดสอบค่าทางไฟฟ้าที่กระบวนการทดสอบค่าทางไฟฟ้าก่อนนำลงบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ [4], [7]



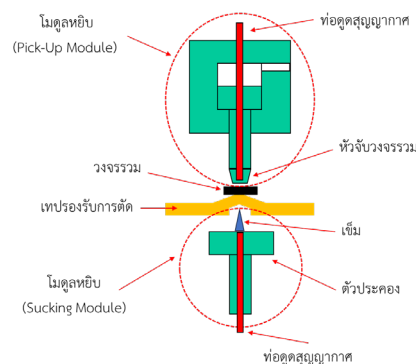
รูปที่ 2: โครงสร้างของวงจรรวม [6]

1.2 *หลักการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด:* โรงงานกรณีศึกษาได้ผลิตวงจรรวมมาบนเทปรองรับการตัดเพื่อเพิ่มผลผลิตและช่วยลดของเสียที่เกิดจากการเคลื่อนย้าย วงจรรวมจะถูกนำออกจากเทปที่เครื่องจักรในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ (inspection and packaging machine) ซึ่งเทปรองรับการตัดอาจต่างชนิดกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน [8] ลักษณะการผลิตวงจรรวมบนเทปรองรับการตัด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3: การผลิตวงจรรวมบนเทปรองรับการตัด

สำหรับการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด มีดังนี้ 1) โมดูลดูด (sucking module) จะเคลื่อนที่เข้าหาวงจรรวมโดยตัวประกอบ (supporter) สัมผัสกับเทปรองรับการตัดและปล่อยแรงดูดออกจากท่อสุญญากาศเพื่อประกอบเทปรองรับการตัดให้ตึง 2) โมดูลหยิบ (pick-up module) เคลื่อนลงมาจนกระทั่งใกล้กับวงจรรวม 3) เข็ม (needle) โมดูลดูดยกขึ้นเพื่อดันเทปรองรับการตัด 4) หัวจับวงจรรวม (pick-up head) ในโมดูลหยิบจะปล่อยแรงดูดสุญญากาศจากท่อสุญญากาศเพื่อดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด [8] แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4: โครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดที่เครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ [8]

1.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม: การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป [9] จากการหาความสัมพันธ์ที่ทำให้หน่วยตัวอย่างมีความแตกต่างกัน โดยสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรทำนาย และนำสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มที่ได้ไปพยากรณ์หน่วยตัวอย่างใหม่ [10] โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนาย (independent variable) เป็นตัวแปรต่อเนื่อง (continuous variable) 1 ตัวขึ้นไป สำหรับตัวแปรตาม (dependent variable) กำหนดเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (quantitative variable) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม และตัวแปรทำนายจะอยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น (linear) สมการจำแนกกลุ่ม (model of sample) ดังสมการที่ (1) [10]

$$\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (1)$$

โดย $\hat{Y}$ แทนค่าคะแนนของหน่วยตัวอย่างที่ได้จากสมการจำแนกกลุ่ม

a แทนค่าคงตัว (constant) ในรูปแบบคะแนนดิบ (unstandardized)

b_j แทนค่าถ่วงน้ำหนักของตัวแปรทำนายซึ่ง $j = 1, 2, \dots, p$

X_j แทนตัวแปรทำนายซึ่ง $j = 1, 2, \dots, p$

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม มีดังนี้ [10]

1) เพื่อศึกษาตัวแปรทำนายที่ทำให้กลุ่มมีความแตกต่างกันจากการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

2) เพื่อพยากรณ์จัดกลุ่มหน่วยตัวอย่างใหม่จากสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

ลักษณะของข้อมูลและการเตรียมข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย 5 ประการ ดังต่อไปนี้ [10], [11]

1) ตัวแปรตาม (Y) ประกอบด้วยกลุ่มประชากร หรือกลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 2 กลุ่ม

2) กำหนดตัวแปรตาม (X) หรือตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะสามารถแบ่งกลุ่มตัวแปรตามได้แตกต่างกัน

3) ตัวแปรตาม (Y) เป็นตัวแปรที่มีระดับการวัดในมาตราอันดับ (ordinal scale) และถ้าหากมีข้อมูลอยู่ในระดับอื่นให้แปลงข้อมูลเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มก่อนนำไปวิเคราะห์

4) ตัวแปรทำนาย (X) เป็นตัวแปรต่อเนื่องที่มีระดับการวัดในมาตราอัตราภาค (interval scale) หรือมาตราอัตราส่วน (ratio scale) หากมีข้อมูลอยู่ในระดับอื่นให้แปลงข้อมูลเป็นตัวแปรหุ่น (dummy coding) ก่อนนำไปวิเคราะห์

5) ชุดข้อมูลประกอบด้วย 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลฝึกฝน (training data set) เพื่อสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม และชุดข้อมูลทดสอบ (testing data set) เพื่อทดสอบสมการ

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มจำเป็นต้องมีกลุ่มข้อมูลที่นำมาทดสอบอย่างน้อย 10 เท่าของจำนวนตัวแปรทำนายเพื่อลดความผิดพลาดในการสร้างสมการจำแนกกลุ่ม และการกำหนดค่ากลางเพื่อจำแนกกลุ่มของชุดข้อมูล [12] สำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม แสดงเงื่อนไขดังต่อไปนี้ [10], [12], [13], [14]

1) ตัวแปรอิสระมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร (normality of independent variables) ในแต่ละกลุ่มของตัวแปรตาม (Y)

2) การตรวจสอบชุดข้อมูลฝึกฝน ในแต่ละกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ต้องไม่พบค่านอกเกณฑ์ (outlier)

3) เมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม (variance-covariance matrix) ของตัวแปรทำนาย (X) แต่ละกลุ่มต้องเท่ากัน

4) การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น (linearity of relationship) ของตัวแปรทำนาย (X)

5) ตัวแปรทำนาย (X) ต้องไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุสูงเกินไป (multicollinearity)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม คือ การสร้างสมการเพื่อนำมาวิเคราะห์และจำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) โดยอ้างอิงจากตัวแปรทำนาย (X) ซึ่งสามารถประเมินความแม่นยำของสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มได้จากร้อยละของการทำนายที่ถูกต้อง ดังสมการที่ (2)

$$\text{ความถูกต้อง} = \frac{\text{จำนวนข้อมูลที่ทำนายถูกต้อง}}{\text{จำนวนข้อมูลที่ถูกทำนายทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเคมีคอนกรีต: จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ามีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับการติดตั้งหรือวางจรรยาบรรณออกจากเตปรงรับการตัด โดยเน้นไปที่ปัจจัยทางกายภาพ เช่น การกระจายเข็ม ความหนาและขนาดของโดยรวมถึงแรงดูดสุญญากาศ ซึ่งล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ตัวอย่างเช่น

Liu et al. [15] ได้ศึกษาการกระจายเข็มในโมดูลดูด เพื่อปรับปรุงความสำเร็จในการนำไดออกไซด์ออกจากเตปรงรับการตัด พบว่า การกระจายเข็มไม่สามารถเพิ่มความสำเร็จในการนำไดออกไซด์ออกจากเตปรงรับการตัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเข็มเพียง 1 ตัว แต่สามารถช่วยลดอัตราการแตกร้าวของไดได้ ขณะที่ Ogasawara et al. [16] ได้ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความแตกต่างของเตปรงรับการตัด 2) ความหนาของไดที่แตกต่างกัน และ 3) ระยะห่างระหว่างเข็มกับเตปรงรับการตัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไดออกไซด์ออกจากเตปรงรับการตัด พบว่าความแตกต่างของเตปรงรับการตัดและระยะห่างระหว่างเข็มกับเตปรงรับการตัดให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเมื่อความหนาไดต่างกัน

Zhoulong [17] ได้ศึกษาการนำจรรยาบรรณออกจากเตปรงรับการตัดโดยใช้แรงดูดสุญญากาศ ซึ่งพิจารณาจากปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการ ได้แก่ 1) ความยาวที่ถูกติดบนเตปรงรับการตัด 2) ความแรงของแรงดูดสุญญากาศ และ 3) การเคลื่อนที่ของหัวจับงาน อีกทั้งได้นำถึงความเสี่ยงของไดที่จะเกิดขึ้น สรุปได้ว่าความยาวของบริเวณที่ติดกาวควรควบคุมให้น้อยกว่าร้อยละ 40 ของความ

ยาววงจรรวมเพื่อลดผลกระทบจากความหนาของวงจรรวมต่อประสิทธิภาพในการนำวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด และเมื่อเพิ่มแรงดูดสุญญากาศมากขึ้นจะสามารถเร่งการหลุดของวงจรรวมได้มากขึ้น ขณะที่ Cheng et al. [18] ได้ศึกษาความหนาของวงจรรวมที่แตกต่างกัน แต่ความยาวของวงจรรวมเท่ากัน (5 มิลลิเมตร) พบว่าความหนาของวงจรรวมมีผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด แม้ว่าวงจรรวมที่มีความหนาเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ได้รับแรงในการดึงวงจรรวมมากกว่าแต่ไม่สามารถแยกออกจากเตปรงรับการตัดได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่วงจรรวมที่มีความหนา 0.34 มิลลิเมตร ได้รับแรงน้อยกว่าแต่สามารถแยกออกจากเตปรงรับการตัดได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่แตกหัก

สุดท้าย Peng et al. [19] ได้วิเคราะห์เชิงกลไกของการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัดที่ได้จากการใช้เข็มดันเตปรงรับการตัดในมุมมองของกลศาสตร์การแตกหัก ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด คือ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาของวงจรรวม ดังนั้นหากวงจรรวมบาง หรือใหญ่จะทำให้ประสิทธิภาพในการดึงวงจรรวมลดลง

โดยสรุป งานวิจัยก่อนหน้านี้มุ่งเน้นปัจจัยทางกายภาพของวัสดุและอุปกรณ์ จากการสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระยะเข็มแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม และความหนาของวงจรรวมเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านทฤษฎีการวิเคราะห์แบบสถิติเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงพยากรณ์ งานวิจัยนี้จึงเสนอการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อระบุปัจจัยสำคัญและกำหนดค่าที่เหมาะสมอย่างเป็นระบบ ช่วยลดข้อเสียและต้นทุนในกระบวนการผลิต

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม: การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม เป็นเทคนิคทางสถิติที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ที่อยู่ในรูปของข้อมูลจำแนกประเภท (categorical data) ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขา ตัวอย่างเช่น

Deeprom [20] ได้ศึกษาแบบจำลองในการพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินระยะเริ่มต้นดำเนินการของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมในประเทศไทย และสร้างจำลองสำหรับพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินล่วงหน้าโดยใช้วิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม พบว่ามี 4 ตัวแปรทำนายที่ส่งผลต่อการจำแนกกลุ่มมีความถูกต้องของการทดสอบสมการคิดเป็นร้อยละ 92.86 ในลักษณะเดียวกัน ธนากร ดันติกาญจน์ [21] ได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงิน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเชิงขั้นตอน (stepwise discriminant analysis) เพื่อคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างสมการพยากรณ์ และสามารถจำแนกกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความถูกต้องของการทดสอบเท่ากับร้อยละ 73.8 และความถูกต้องของชุดข้อมูลทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 78.9

ในภาคเกษตรกรรม Thonglor et al. [22] ได้นำข้อมูลจำนวน 120 ข้อมูล และตรวจสอบความเหมาะสมของสมการที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 80 เพื่อทำนายปริมาณน้ำนมของฟาร์มโคนมว่าจัดอยู่ในกลุ่มฟาร์มให้น้ำนมสูงหรือต่ำ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการใช้วิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มกับการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกแบบทวิ (binary logistic regression analysis) พบว่าค่าความถูกต้องที่ใกล้เคียงกัน โดยการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีความถูกต้องร้อยละ 65.0 ในขณะที่การวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกแบบทวิมีความถูกต้องร้อยละ 64.2

ในด้านการผลิต Yoothai et al. [12] ได้นำการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกกลุ่มชิ้นงานว่าเป็นของดีหรือของเสียเพื่อลดจำนวนของเสียในกระบวนการพิมพ์พลาสติก โดยใช้ข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด 180 มีตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 2 ตัวแปร และได้กำหนดค่าจำแนกกลุ่มเป็นเกณฑ์ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อนำไปปรับตั้งเครื่องจักร

นอกจากนี้ Preme et al. [23] ได้ศึกษาการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มและการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติก (logistic regression) โดยอธิบายว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มจะสร้างสมมติฐานโดยใช้ข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ ส่วนการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกเป็นวิธีที่ยืดหยุ่นกว่าถ้าใช้จำนวนข้อมูลน้อย และข้อมูลไม่จำเป็นต้องมีการแจกแจงแบบปกติ และ Liong and Foo [24] ได้อธิบายว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มจะต้องทดสอบชุดข้อมูลก่อนว่าเป็นสมมติฐานของตัวแปรที่มีการแจกแจงปกติ และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมระหว่างกลุ่มต้องเท่ากัน หากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าวการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น และการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีความถูกต้องสูงขึ้นเมื่อข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐาน ในทำนองเดียวกัน Mustafa [25] ได้เปรียบเทียบการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มและการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกกับข้อมูลจริงของการคลอดโดยการผ่าตัดคลอดและการคลอดตามธรรมชาติ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็น

เห็นว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีความถูกต้องในการจำแนกมากกว่าการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกเล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 87 และร้อยละ 86.1 ตามลำดับ

จากการสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับความนิยมในการพยากรณ์และจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ที่เป็นข้อมูลเชิงกลุ่ม โดยมีการประยุกต์ใช้ในหลากหลายบริบท เช่น การพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินของวิสาหกิจ [20], [21] การจำแนกปริมาณน้ำมันในฟาร์มโคนม [22] และการคัดแยกของเสียในกระบวนการผลิต [12] โดยมีข้อสังเกตว่าวิธีการนี้ให้ผลการจำแนกที่แม่นยำ โดยเฉพาะเมื่อชุดข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ [24], [25]

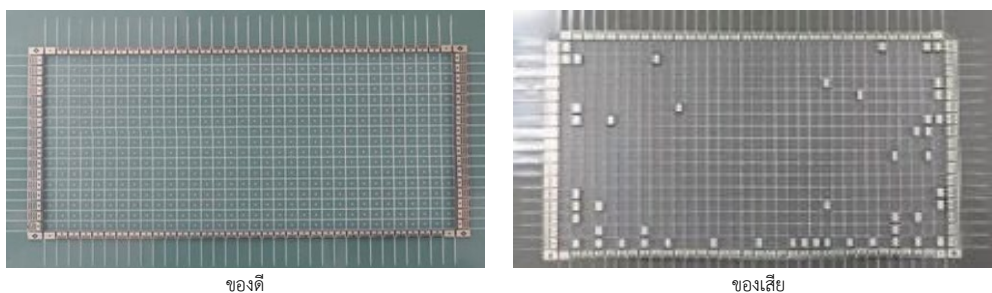
ภายใต้บริบทของการผลิตวงจรรวม งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยกำหนดให้วงจรรวมมีความหนา 0.85 มิลลิเมตร และใช้ตัวแปรทำนาย (X) ได้แก่ ระยะเข็ม (ตามแนวทางของ Ogasawara et al. [16]) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม [17] และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด ซึ่งเพิ่มเติมขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ ส่วนตัวแปรตาม (Y) คือ การจำแนกเป็นกลุ่มของดีหรือกลุ่มของเสีย ตามแนวทางของ Yoothai et al. [12] ทั้งนี้ ยังให้ความสำคัญกับคุณภาพของวงจรรวมที่ต้องไม่เกิดความเสียหาย [19] และพิจารณาลักษณะข้อมูลเบื้องต้นที่เข้าเงื่อนไขของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม [21], [24]

ดังนั้น เพื่อให้สามารถจำแนกและพยากรณ์ผลของกระบวนการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มในการสร้างสมการพยากรณ์ พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต้น เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. วิธีการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นขั้นตอนการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดเนื่องจากไม่สามารถนำวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดได้สำเร็จ ส่งผลให้จำนวนวงจรรวมถูกส่งไปยังกระบวนการถัดไปมีปริมาณน้อยลง โดยกำหนดให้ของดี คือ วงจรรวมถูกดึงขึ้นทั้งหมดต่อแผ่น (ไม่มีวงจรรวมเหลือบนเทปรองรับการตัด) และหากพบวงจรรวมหลงเหลือบนเทปรองรับการตัดจะถือว่าเป็นของเสีย ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5: ของดีและของเสีย

การปรับปรุงการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดให้มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังต่อไปนี้ ระยะเข็ม (X_1) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) หากสามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้จะทำให้ประสิทธิภาพของการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดเพิ่มมากขึ้น จำนวนของเสียลดลง สำหรับช่วงชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย (X) แต่ละปัจจัยถูกกำหนดจากความสามารถของเครื่องจักรที่สามารถดำเนินการผลิตได้จริง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ช่วงของชุดข้อมูลตัวแปรทำนาย

ตัวแปรทำนาย (X)	ช่วงชุดข้อมูล
X_1	400 ถึง 600 ไมโครเมตร
X_2	-0.35 ถึง -0.55 มิลลิบาร์
X_3	-0.10 ถึง -0.30 มิลลิบาร์

จากการกำหนดจำนวนชุดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์สมการจำแนกกลุ่มได้ทำการรวบรวมข้อมูลอย่างน้อย 10 เท่าของจำนวนตัวแปรทำนายเพื่อความแม่นยำในการสร้างสมการ [12] ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูล 180 ข้อมูล โดยแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลที่ 1 ใช้สำหรับสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม คิดเป็นร้อยละ 80 หรือ 144 ข้อมูล และชุดข้อมูลที่ 2 ใช้ทดสอบการพยากรณ์จากสมการที่ได้จากชุดข้อมูลที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 20 หรือ 36 ข้อมูล และกำหนดตัวแปรตาม (Y) เป็นประเภทของชิ้นงาน ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของดีกำหนดค่าเป็น 1 และกลุ่มของเสียกำหนดค่าเป็น 0 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: ชุดข้อมูลตัวแปรทำนาย

ประเภทชุดข้อมูล	ลำดับข้อมูล (N)	X_1	X_2	X_3	Y
ชุดข้อมูลสร้างสมการ	1	510	-0.47	-0.14	1
	2	555	-0.47	-0.18	0
	3	545	-0.51	-0.25	1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	144	450	-0.46	-0.21	0
ชุดข้อมูลทดสอบสมการ	1	550	-0.45	-0.21	1
	2	410	-0.36	-0.22	0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	36	445	-0.40	-0.15	0

2. วิธีการวิจัย

การตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานและการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม ดังต่อไปนี้

1) ตรวจสอบการแจกแจงของตัวแปรทำนาย (X) โดยใช้ Anderson-Darling ตรวจสอบค่าผิดปกติของชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย (X) โดยใช้ Grubbs' test ตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรทำนาย (X) และตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุของตัวแปรทำนาย (X) และใช้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทำนาย (X) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (Y) โดยใช้โปรแกรม Minitab 18

2) ประยุกต์ใช้โปรแกรม SPSS ในการตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วมโดยใช้ Box's M test ตรวจสอบโดยการพิจารณาเมทริกซ์สหสัมพันธ์ หาค่ากลางจำแนกกลุ่ม และสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

นำข้อมูลชุดที่ 1 มาทดสอบเงื่อนไขพื้นฐานเพื่อใช้สำหรับสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีข้อมูลทั้งหมด 144 ข้อมูลประกอบด้วยกลุ่มของดี ($Y = 1$) 68 ข้อมูล และกลุ่มของเสีย ($Y = 0$) 76 ข้อมูล ผลการทดสอบเงื่อนไขพื้นฐาน แสดงดังต่อไปนี้

1.1 การตรวจสอบการแจกแจงตัวแปรทำนาย (X) หลายตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05: โดยทดสอบตัวแปรทำนาย (X) ของแต่ละกลุ่มตัวแปรตาม (Y) โดยกำหนดข้อสมมติฐานไว้ดังนี้ [10]

H_0 = ตัวแปรทำนาย (X) มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 = ตัวแปรทำนาย (X) ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

เมื่อพิจารณาค่า p -value มากกว่า 0.05 ทุกตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวแปรทำนาย (X) ทุกตัวมีการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3: ผลการวิเคราะห์การแจกแจงของตัวแปรทำนาย (X) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	ตัวแปรทำนาย (X)	Mean	Standard Deviation (SD)	p -value
ของดี (Y = 1)	X ₁	549.3	33.47	0.077
	X ₂	-0.495	0.032	0.230
	X ₃	-0.208	0.055	0.132
ของเสีย (Y = 0)	X ₁	458.8	35.59	0.083
	X ₂	-0.408	0.035	0.186
	X ₃	-0.205	0.057	0.213

1.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติของชุดข้อมูลตัวแปรทำนาย (X) ของแต่ละกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05: โดยมีข้อสมมติฐานไว้ดังนี้

H_0 = ไม่มีค่าผิดปกติในชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย

H_1 = มีค่าผิดปกติในชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย

เมื่อพิจารณาค่า p -value ของทุกตัวแปรทำนาย (X) ในแต่ละกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ในตารางที่ 4 มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่มีค่าผิดปกติในชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย

ตารางที่ 4: ผลการตรวจสอบค่าผิดปกติของชุดข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	ตัวแปรทำนาย (X)	Mean	Standard Deviation (SD)	G-Value	p -value
ของดี (Y = 1)	X ₁	549.26	33.47	2.97	0.150
	X ₂	-0.495	0.032	3.22	0.055
	X ₃	-0.208	0.055	1.94	1.00
ของเสีย (Y = 0)	X ₁	458.82	35.59	3.26	0.055
	X ₂	-0.408	0.035	2.67	0.479
	X ₃	-0.205	0.057	1.83	1.00

1.3 การตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม: สำหรับตัวแปรทำนาย (X) ในแต่ละกลุ่มตามตัวแปรตาม (Y) ซึ่งกำหนดสมมติฐานไว้ คือ $H_0: \Sigma_0 = \Sigma_1$ และ $H_1: \Sigma_0 \neq \Sigma_1$

จากสมมติฐานข้างต้น Σ_0 แทนเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม (variance-covariance matrix) ของตัวแปรตามที่เป็นของเสีย (Y = 0) และ Σ_1 แทนเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วมของตัวแปรตามที่เป็นของดี (Y = 1) ผลลัพธ์จาก Box's M test พบว่าค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.190 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วมระหว่างกลุ่มของเสียและกลุ่มของดีไม่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5: ผลการตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

Box's M test result		4.833
F	Approx.	1.586
	df ₁	3
	df ₂	6048377.689
	Sig.	0.190

1.4 การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรทำนาย (X): โดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) พบว่าตัวแปรทำนายทุกตัวมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับตัวแปรตาม (Y) เนื่องจากค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 และ X_1 กับ Y มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน X_2 กับ Y และ X_3 กับ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางตรงกันข้าม ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรทำนาย

	X_1 และ Y	X_2 และ Y	X_3 และ Y
Pearson correlation coefficient	0.796	-0.793	-0.023

1.5 การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุของตัวแปรทำนาย (X): โดยการพิจารณา Variance Inflation Factor (VIF) หากมีค่าน้อยกว่า 10 จะสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทำนาย (X) ทุกตัวไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7: ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ

	X_1	X_2	X_3
VIF	2.20	2.18	1.03

2. การสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

การสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นการนำข้อมูลชุดที่ 1 ที่ผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานมาสร้างสมการเพื่อระบุค่ากลางเพื่อใช้จำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ดังต่อไปนี้

2.1 การคัดเลือกตัวแปรทำนาย (X): จากค่า Wilks' Lambda พบว่าตัวแปรทำนาย (X) ที่ส่งผลต่อการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมากที่สุด คือ ระยะเข็ม (X_1) และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) โดยมีค่านัยสำคัญ (Sig) <0.001 และมีค่า Wilk's Lambda เท่ากับ 0.367 และ 0.270 ตามลำดับ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8: การคัดเลือกตัวแปรทำนาย (X) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Step	Variables	Lambda	df ₁	df ₂	df ₃	Exact F			
						Statistic	df ₁	df ₂	Sig
1	X_1	0.367	1	1	142	245.167	1	142	<0.001
2	X_2	0.270	2	1	142	190.522	2	141	<0.001

2.2 ทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยพิจารณาค่าเฉพาะ (Eigenvalue): แสดงความแตกต่างระหว่างกลุ่ม จากข้อมูลที่น่ามาทดสอบมีตัวแปรตาม (Y) 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของดี (Y = 1) และกลุ่มของเสีย (Y = 0) จึงมีค่าเฉพาะเพียง 1 ค่า เท่ากับ 2.702 เมื่อค่าเฉพาะมีค่าไม่เข้าใกล้ 0 แสดงว่าความแตกต่างระหว่างกลุ่มมาก ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9: ค่าเฉพาะ

Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	2.702	100.0	100.0	0.854

2.3 ทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนาย (X): โดยทำการทดสอบตัวแปรทำนายทุกตัวในกลุ่มของเสีย (Y = 0) และกลุ่มของดี (Y = 1) ซึ่งกำหนดสมมติฐานไว้เป็น $H_0: \mu_0 = \mu_1$ และ $H_1: \mu_0 \neq \mu_1$

ค่า Wilks' Lambda ดังตารางที่ 10 เท่ากับ 0.270 และค่านัยสำคัญ (Sig) < 0.001 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนาย (X) ในกลุ่มของดี (Y = 1) และกลุ่มของเสีย (Y = 0) แตกต่างกัน ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยนี้สามารถสร้างสมการที่วิเคราะห์จำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 10: ผลลัพธ์การตรวจสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนาย (X) ทุกตัวในกลุ่มตัวแปรตาม (Y)

Wilks' Lambda	Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig.
	1	0.270	184.5668	2	<0.001

2.4 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าถ่วงน้ำหนัก) ของตัวแปรทำนาย (X) ที่นำมาสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มในรูปแบบมาตรฐาน (Standardized): เพื่อหาตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการจำแนกกลุ่ม พบว่าระยะเข็ม (X_1) มีความสำคัญต่อการจำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) มากที่สุด เนื่องจากมีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.634 ซึ่งมากกว่าแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) ที่มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ -0.623 ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11: Standardized canonical discriminant function coefficients

ตัวแปรทำนาย	Function
	1
X_1	0.634
X_2	-0.623

2.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าถ่วงน้ำหนัก) ของตัวแปรทำนาย (X): เพื่อนำมาสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มในรูปแบบคะแนนดิบ (unstandardized) ซึ่งประกอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวแปรทำนาย (X) และค่าคงตัว ซึ่งระยะเข็ม (X_1) ค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.018 และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ -18.577 ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12: Unstandardized canonical discriminant function coefficients

ตัวแปรทำนาย	Function
	1
X_1	0.018
X_2	-18.577
(Constant)	-17.527

เนื่องจากตัวแปรตามมี 2 กลุ่มคือ ของดี ($Y = 1$) และของเสีย ($Y = 0$) ดังนั้นสมการจำแนกกลุ่ม $\hat{Y}$ จึงมี 1 สมการเพื่อใช้คำนวณคะแนนจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ดังสมการที่ (3)

$$\hat{Y} = -17.527 + 0.018X_1 - 18.577X_2 \quad (3)$$

2.6 การกำหนดค่ากลางจำแนกกลุ่ม (Group Centroids): เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ชี้วัดว่าคะแนนที่ได้จากสมการที่ (3) ควรจัดอยู่ในกลุ่มใด โดยกลุ่มของดี ($Y = 1$) และกลุ่มของเสีย ($Y = 0$) มีค่ากลางเท่ากับ 1.726 และ -1.544 ตามลำดับ ดังตารางที่ 13 สำหรับความน่าจะเป็นที่หน่วยใหม่จะอยู่ในกลุ่มใดคิดเป็น 0.5 เนื่องจากมีตัวแปรตาม (Y) เพียง 2 กลุ่ม

ตารางที่ 13: Functions at group centroids

Y	Function
	1
1	1.726
0	-1.544

2.7 การตรวจสอบความแม่นยำของสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม: แสดงการพยากรณ์สำหรับชุดข้อมูลที่ 1 พบว่าการพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำร้อยละ 96.05 การพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิงเท่ากับร้อยละ 5.88 การพยากรณ์กลุ่มของดี ($Y = 1$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 94.12 และการพยากรณ์กลุ่มของดี ($Y = 1$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิงเท่ากับร้อยละ 3.95 ดังตารางที่ 14 และความแม่นยำของสมการเท่ากับร้อยละ 95.14 (คำนวณจากสมการที่ (1))

ตารางที่ 14: ความถูกต้องของการพยากรณ์แบ่งตามกลุ่มของดีและกลุ่มของเสียของชุดข้อมูลสร้างสมการ

	Y ตามค่าอ้างอิง	Y ตามการพยากรณ์		รวม
		0	1	
จำนวนในแต่ละกลุ่ม	0	73	3	76
	1	4	64	68
ร้อยละความแม่นยำ และร้อยละความผิดพลาด	0	96.05	3.95	100
	1	5.88	94.12	100

3. ทดสอบสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบสมการ

การทดสอบสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเริ่มต้นจากการนำชุดข้อมูลทดสอบสมการ มีทั้งหมด 36 ข้อมูล ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของดี ($Y = 1$) 18 ข้อมูล และกลุ่มของเสีย ($Y = 0$) 18 ข้อมูล หาคะแนนของหน่วยตัวอย่างใหม่โดยใช้สมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม ดังสมการที่ (3) และนำคะแนนที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ากลางของแต่ละกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ดังตารางที่ 13 หากคะแนนจำแนกกลุ่มเข้าใกล้ค่าใดมากที่สุด แสดงว่าหน่วยตัวอย่างใหม่เป็นสมาชิกของกลุ่มนั้น จากคะแนนจำแนกกลุ่ม $\hat{Y}$ ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด 36 ข้อมูล อธิบายได้ว่าช่วงคะแนนการจำแนกกลุ่ม คือ -3.735 ถึง 3.304 ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15: การพยากรณ์กลุ่มตัวแปรตาม (Y) ของชุดข้อมูลทดสอบสมการ

ลำดับข้อมูล (N)	X_1	X_2	X_3	Y ค่าอ้างอิง	คะแนน $\hat{Y}$	Y พยากรณ์
1	600	-0.45	-0.21	1	1.633	1
2	410	-0.36	-0.22	0	-3.459	0
3	570	-0.47	-0.29	1	1.464	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
36	455	-0.40	-0.15	0	-1.906	0

หมายเหตุ: *คะแนน $\hat{Y}$ ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (3)

นอกจากนี้ได้ทดสอบความแม่นยำของสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มโดยเปรียบเทียบตัวกลุ่มที่พยากรณ์กับค่าอ้างอิง พบว่าการพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำร้อยละ 94.44 การพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิงเท่ากับร้อยละ 5.56 การพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 1$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำร้อยละ 100 และไม่พบการพยากรณ์กลุ่มของดี ($Y = 1$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิง ดังตารางที่ 16 ดังนั้นความแม่นยำของสมการเท่ากับร้อยละ 97.22 (คำนวณจากสมการที่ (1))

ตารางที่ 16: ความถูกต้องของการพยากรณ์แบ่งตามกลุ่มของดีและกลุ่มของเสียของชุดข้อมูลทดสอบสมการ

	Y ตามค่าอ้างอิง	Y ตามการพยากรณ์		รวม
		0	1	
จำนวนในแต่ละกลุ่ม	0	17	1	18
	1	0	18	18
ร้อยละความแม่นยำ และร้อยละความผิดพลาด	0	94.44	5.56	100
	1	0	100	100

4. การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการลดของเสียจากการดิงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด

สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทำนาย (X) ประกอบด้วยระยะเข็ม (X_1) ตั้งแต่ 400 ถึง 600 ไมโครเมตร แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) ตั้งแต่ -0.35 ถึง -0.55 มิลลิบาร์ และแรงดันสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ตั้งแต่ -0.10 ถึง -0.30 มิลลิบาร์ และกำหนดให้ตัวแปรตาม (Y) คือ ค่ากลางจำแนกกลุ่มของดีเท่ากับ 1.726 แสดงค่าที่เหมาะสมดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17: ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทำนาย (X)

Solution	X_1	X_2	คะแนน Fit
1	502	-0.55	1.726

ค่าที่เหมาะสมที่เข้าใกล้ค่ากลางจำแนกกลุ่มของดีเท่ากับ 1.726 คือ ระยะเข็ม (X_1) เท่ากับ 502 ไมโครเมตร แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) เท่ากับ -0.55 มิลลิบาร์ (ซึ่งเป็นตัวแปรทำนาย (X) ที่ส่งผลต่อการดิงวงจรรวมดังงานวิจัยของ Ogasawara & Zhoulong) และได้กำหนดการตั้งค่าแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) เท่ากับ -0.15 มิลลิบาร์ เพื่อป้องกันปัญหาคุณภาพอื่น ๆ เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมจึงนำไปปรับตั้งที่เครื่องจักรเพื่อติดตามผล 43 ล็อตการผลิต โดยใช้เวลาในการติดตามผลจำนวน 1 สัปดาห์ แสดงผลดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18: ผลหลังจากปรับตั้งค่าตัวแปรทำนาย (X) ที่เหมาะสม

วันที่	ล็อตการผลิต	จำนวนต่อล็อตการผลิต		ของดี (Y = 1)				ของเสีย (Y = 0)				ปัญหาคุณภาพอื่น ๆ
		จำนวนแผ่น	จำนวนวงจรรวม	จำนวนแผ่น	สัดส่วนจำนวนแผ่น (%)	จำนวนวงจรรวม	สัดส่วนวงจรรวม	จำนวนแผ่น	สัดส่วนจำนวนแผ่น (%)	จำนวนวงจรรวม	สัดส่วนวงจรรวม (%)	
1	1	81	42,294	75	92.59	42,074	99.48	6	7.41	220	0.52	ไม่พบ
1	2	54	28,437	52	96.30	28,396	99.86	2	3.70	41	0.14	ไม่พบ
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	43	81	42,726	77	95.06	42,646	99.81	4	4.94	80	0.19	ไม่พบ
ค่าเฉลี่ย		-	-	81	97.38	43,771	99.85	2	2.62	64	0.15	-

จากการติดตามผลจำนวน 43 ล็อตการผลิต ดังตารางที่ 18 พบว่ากลุ่มของเสีย (Y = 0) มีอัตรา หรือสัดส่วนจำนวนแผ่นที่ดิงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อจำนวนแผ่นทั้งหมดที่สนใจคิดเป็นร้อยละ 2.62 มีจำนวนวงจรรวมที่ดิงไม่ขึ้นเฉลี่ยต่อล็อตการผลิตคิดเป็น 64 ตัว และได้มีการติดตามผลดังงานวิจัยของ Peng et al. [19] สรุปผลได้ว่าไม่พบปัญหาด้านคุณภาพอื่น ๆ เพิ่มเติมหลังจากมีการปรับตั้งค่าปัจจัยดังกล่าว และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนการปรับปรุงพบว่า หลังปรับปรุงทำให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนจำนวนแผ่นที่ดิงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิตลดลงจากร้อยละ 3.02 เป็นร้อยละ 2.62 (ลดลงไปร้อยละ 13.25) และค่าเฉลี่ยของจำนวนวงจรรวมที่ดิงไม่ขึ้นลดลงไปร้อยละ 43.36 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของต้นทุนการกำจัดวงจรรวมก่อนปรับปรุงเท่ากับ 10.44 ดอลลาร์ต่อล็อตการผลิต และหลังปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยต้นทุนการกำจัดวงจรรวมเท่ากับ 5.40 ดอลลาร์ต่อล็อตการผลิต ส่งผลให้ต้นทุนการกำจัดวงจรรวมลดลงถึงร้อยละ 48.28

สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดิงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อตัดสินใจเชิงข้อมูล (data-driven decision making) ในการลดของเสียในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ของบริษัท

อิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง โดยกำหนดตัวแปรต้นที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระยะเข็ม (X_1) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ขณะที่ตัวแปรตาม (Y) ถูกกำหนดเป็นผลลัพธ์ของการดึงวงจรรวม คือ ของดี ($Y = 1$) และของเสีย ($Y = 0$) จากการรวบรวมข้อมูลทั้งหมด 180 ข้อมูลได้ทำการตรวจสอบเงื่อนไขขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม การสร้างสมการหาคะแนนของการจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม พบว่าระยะเข็ม (X_1) และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) ส่งผลต่อการจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม และได้ตรวจสอบความแม่นยำสมการของข้อมูลสร้างสมการและข้อมูลทดสอบสมการมีค่าร้อยละ 95.14 และร้อยละ 97.22 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของการใช้ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจปรับตั้งค่าเครื่องจักรให้เหมาะสม โดยได้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปร คือ ระยะเข็ม (X_1) มีค่า 502 ไมโครเมตร แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) มีค่า -0.55 มิลลิบาร์ สำหรับแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ที่ไม่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมได้กำหนดค่าเป็น -0.15 มิลลิบาร์ ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดที่เครื่องจักรสามารถดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดได้โดยไม่พบปัญหาคุณภาพอื่น ๆ และยังช่วยประหยัดพลังงาน ยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์ อีกทั้งยังสามารถกำหนดเป็นมาตรฐานของการปรับตั้งค่าเครื่องจักรได้อีกด้วย

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการใช้ข้อมูลภายในกระบวนการผลิตเพื่อการจัดการที่มีประสิทธิภาพ (data-driven management) โดยไม่ต้องเปลี่ยนวัตถุดิบหรือเครื่องจักร และยังสามารถกำหนดเป็นมาตรฐานในการตั้งค่าเครื่องจักรในอนาคตได้ นอกจากนี้ ยังมี ความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเปลี่ยนจากการศึกษาทางกลไกเชิงวิศวกรรมมาเป็นการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อการจัดการเชิงกลยุทธ์

นอกจากนี้ความท้าทายของงานวิจัยฉบับนี้ คือ การกำหนดให้กลุ่มของดีโดยวงจรรวมจะต้องถูกดึงออกจากเทปรองรับการตัดทั้งหมด หากมีวงจรรวมหลงเหลือเพียง 1 ตัวจะถือว่าเป็นของเสียทันทีเนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถนำแผ่นนั้นกลับมาทำซ้ำได้อีก ซึ่งถือเป็นผลลัพธ์ที่โรงงานกรณีศึกษามุ่งเน้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านวัตถุดิบ เช่น เทปรองรับและพลาสติกห่อหุ้ม ที่ไม่สามารถเปลี่ยนได้เพราะข้อกำหนดของลูกค้า รวมถึงข้อจำกัดด้านข้อมูลบางรายการ เช่น ลีตของวัตถุดิบ รวมถึงข้อจำกัดของเทคนิควิเคราะห์จำแนกกลุ่มที่ต้องตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานหลายขั้นตอน

ข้อเสนอแนะในอนาคตสำหรับสถานประกอบการ (managerial implementation) ได้แก่ การขยายขอบเขตไปยังขั้นตอนก่อนหน้า เช่น ขั้นตอนการอบวงจรรวม การควบคุมระยะเวลาในกระบวนการผลิตวงจรรวม รวมถึงการเลือกชนิดเทปรองรับการตัด และ ข้อเสนอแนะทางการวิจัยในอนาคต (future research) ได้แก่ การใช้เทคนิคอื่น ๆ ที่ยืดหยุ่นกว่า เช่น logistic regression, QDA, SVM, ANN หรือ k-NN รวมถึงการปรับกระบวนการให้รองรับการตัดสินใจโดยอิงจากข้อมูลมากยิ่งขึ้น เพื่อยกระดับคุณภาพและลดของเสียได้อย่างยั่งยืน

REFERENCES

- [1] R. Zorich, *Handbook of Quality Integrated Circuit Manufacturing*. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1991.
- [2] Office of Trade Policy and Strategy, Macroeconomic Trade Research Division, "Global Semiconductor Industry Situation and Trends and Implications for Thailand," (in Thai), in *Thailand: Office of Trade Policy and Strategy*, pp. 1–18, 2022.
- [3] ttb analytics, "Semiconductor shortage issue in 2023," (in Thai), 2022, [Online]. Available: https://media.ttbbank.com/5004/analytics_business_and_industry/26-highlight-desktop-th.pdf
- [4] G. S. May and C. J. Spanos, *Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [5] S. Kumar and A. Gupta, *Integrated Circuit Fabrication*. Boca Raton, FL, USA: Manakin Press, 2021.
- [6] L. H. Lau, *Fan-Out Wafer-Level Packaging*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2018.
- [7] A. Chen and R. H. Lo, *Semiconductor Packaging: Materials Interaction and Reliability*. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group, 2012.
- [8] T. H. Cheng, C. C. Du, and C. H. Tseng, "Study in IC chip failure during pick-up process by using experimental and finite element methods," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 172, no. 3, pp. 407–416, 2006.
- [9] W. R. Klecka, *Discriminant Analysis*. Newbury Park, CA, USA: SAGE Publications, 1980.

- [10] S. Sinsomboonthong, *Multivariate Analysis Using SPSS and MINITAB*. Bangkok, Thailand: Chamchuri Products (in Thai), 2016.
- [11] J. H. Carl and O. Stephen, *Applied MANOVA and Discriminant Analysis*. New Jersey, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [12] K. Yoothai, K. Sirikasemsuk, and K. Leerojanaprapa, "Discriminant analysis for defect reduction in plastic printing process of beverage closures," (in Thai), *J. Sci. Ladkrabang*, vol. 32, no. 2, pp. 17–37, 2023.
- [13] K. Vanichbancha, *Advanced Statistical Analysis Using SPSS for Windows*, 6th ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Printing House (in Thai), 2008.
- [14] C. Teerawiriya, *Statistical Data Analysis Using Minitab*. Bangkok, Thailand: Simplify Publishing (in Thai), 2020.
- [15] Z. Liu, Y. A. Huang, H. Liu, J. Chen, and Z. Yin "Reliable peeling of ultrathin die with multi needle ejector," *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 9, pp. 1545–1554, 2014.
- [16] T. Ogasawara, N. Saiki, and S. Takyu, "Quantitative investigation of pick-up performance for UV-curable dicing tape," in *Proc. IEEE CPMT Symp. Jpn. (ICSJ)*, Kyoto, Japan, 2018, pp. 163–166.
- [17] X. Zhoulong, Z. Liu, Y. Huang, and J. Chen, "Vacuum-based picking-up of thin chip from adhesive tape," *J. Adhesion Sci. Technol.*, vol. 29, no. 13, pp. 1315–1329, 2015.
- [18] T. H. Cheng, C.-H. Tseng, and C.-H. Hung, "Application of a genetic algorithm associated with adhesive joint analysis to the IC chip pick-up process," *J. Adhesion Sci. Technol.*, vol. 22, no. 10, pp. 1057–1072, 2008.
- [19] B. Peng, Y. Huang, Z. Yin, and Y. Xiong, "Analysis of interfacial peeling in IC chip pick-up process," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 7, 2011, Art. no. 073508. doi: 10.1063/1.3642975.
- [20] A. Deeprom, "Financial failure prediction in the early stage of small and medium enterprises (SMEs) in Thailand using discriminant analysis," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Accounting, Thammasat Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [21] T. Tantikan, "Making the financial model with discriminant analysis for small and medium enterprises in construction sector," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Accounting, Thammasat Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [22] O. Thonglor, S. Manatrainon, and A. Chaokhruea, "Discriminant analysis and binary logistic regression for prediction of milk production of dairy cattle farms," (in Thai), *KKU Sci. J.*, vol. 40, no. 4, pp. 1195–1204, 2012.
- [23] M. P. Perme, M. Blas, and S. Turk, "Comparison of logistic regression and linear discriminant analysis: a simulation study," *Adv. Methodology Statist.*, vol. 1, no. 1, pp. 143–161, 2004.
- [24] C. Y. Liong and S. F. Foo, "Comparison of linear discriminant analysis and logistic regression for data classification," presented at the 20th Nat. Symp. Math. Sci.: Res. Math. Sci.: Catalyst Creativity Innov., Putrajaya, Malaysia, 2013.
- [25] Q. Mustafa, "Comparison of discriminant analysis and logistic regression analysis: An application on caesarean births and natural births data," *J. Inst. Natural Appl. Sci.*, vol. 20, no. 1-2, pp. 34–46, 2015.

การพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองโดยใช้เทคนิคการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ และแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง

ภูริทรัพย์ เดชพิพัฒนประชา¹ วรรัตน์ จงไกรจักร^{2*} อัครชัย อินทนิล³ วิมลณัฐ สุขพล⁴

^{1,3,4} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต, ภูเก็ต, ประเทศไทย

^{2*} คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต, ภูเก็ต, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บทความ: worrarat.j@pkru.ac.th

รับต้นฉบับ: 7 สิงหาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 8 ตุลาคม 2568; ตอรับบทความ: 5 กุมภาพันธ์ 2569

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองในประเทศไทย โดยใช้เทคนิคการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์และแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง ข้อมูลถูกรวบรวมจากเว็บไซต์ Kaidee.com, One2Car.com และ Chobrod.com จำนวน 55,989 รายการ หลังการทำความสะอาดเหลือ 42,823 รายการ ซึ่งได้คุณลักษณะพื้นฐาน 13 รายการสำหรับสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองสองลักษณะ ได้แก่ 1) การใช้เฉพาะคุณลักษณะพื้นฐาน และ 2) การเพิ่มคุณลักษณะใหม่ 6 รายการ ได้แก่ อายุรถยนต์ อัตราการใช้งานต่อปี กำลังสองของระยะทางสะสม กำลังสองของขนาดเครื่องยนต์ ภาระสะสมการใช้งาน และภาระเชิงเวลา เพื่อเพิ่มศักยภาพของแบบจำลองในการเรียนรู้เชิงลึก โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง XGBoost, Random Forest, LightGBM, CatBoost และ Gradient Boosting ด้วยตัวชี้วัด MAE, RMSE, MAPE, R² และ Accuracy ผลการทดลองพบว่า XGBoost ให้ผลดีที่สุด โดยเมื่อเพิ่มคุณลักษณะใหม่ ค่า R² เพิ่มขึ้นจาก 0.9262 เป็น 0.9419 และ Accuracy จากร้อยละ 89.42 เป็นร้อยละ 92.38 พร้อมลดค่า MAPE จากร้อยละ 10.58 เหลือร้อยละ 7.62 แสดงว่าการสร้างคุณลักษณะใหม่ช่วยเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์ความสำคัญของคุณลักษณะระบุว่าปัจจัยหลักคือ ประเภทเชื้อเพลิง ประเภทรถ ขนาดเครื่องยนต์ ยี่ห้อ และค่ากำลังสองของขนาดเครื่องยนต์ ผลการวิจัยยืนยันว่าการผสมผสานเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องร่วมกับการสร้างคุณลักษณะใหม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการพยากรณ์ และสนับสนุนการตัดสินใจอย่างโปร่งใสในตลาดรถยนต์มือสองของประเทศไทย

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ข้อมูล การเรียนรู้ของเครื่อง การพยากรณ์ราคา รถยนต์มือสอง การสกัดข้อมูล



Used Car Price Prediction Using Web Scraping and Machine Learning Models

Bhurisub Dejjipatpracha¹ Worrarat Jongkrajak^{2*} Akarachai Inthanil³ Wimonnat Sukpol⁴

^{1,3,4}*Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket, Thailand*

^{2*}*Faculty of Management Sciences, Phuket Rajabhat University, Phuket, Thailand*

*Corresponding author e-mail: worrarat.j@pkru.ac.th

Received: 7 August 2025; Revised: 8 October 2025; Accepted: 5 February 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

This study aimed to develop a predictive model for used car prices in Thailand using web scraping techniques and machine learning algorithms. Data were collected from Kaidee.com, One2Car.com, and Chobrod.com, totaling 55,989 records. After data cleaning, 42,823 valid records remained, containing 13 fundamental attributes for model construction. Two experiments were conducted: (1) using only the basic features and (2) incorporating six newly engineered features—car age, annual usage rate, squared mileage, squared engine size, cumulative usage load, and temporal load—to enhance the model's learning capability. The performance of five models, including XGBoost, Random Forest, LightGBM, CatBoost, and Gradient Boosting, was compared using MAE, RMSE, MAPE, R^2 , and accuracy. The results showed that XGBoost achieved the best prediction performance. With the additional features, the R^2 value improved from 0.9262 to 0.9419, accuracy increased from 89.42% to 92.38%, and MAPE decreased from 10.58% to 7.62%, indicating that feature engineering significantly enhanced model accuracy. Feature importance analysis revealed that the most influential factors affecting used car prices were fuel type, car type, engine size, brand, and squared engine size. The findings confirm that integrating machine learning with feature engineering substantially improves predictive performance and can serve as a decision-support tool for buyers, sellers, and financial institutions to promote transparency and fairness in Thailand's used car market.

Keywords: Data analysis, Machine learning, Price prediction, Used car, Web scraping

บทนำ

ปัจจุบันตลาดรถยนต์มือสองมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลก รวมถึงในประเทศไทย ซึ่งรถยนต์มือสองเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคที่ต้องการเป็นเจ้าของรถยนต์ในราคาที่ประหยัดกว่ารถยนต์ใหม่ รถยนต์มือสองสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ ครอบคลุมผู้ใช้ทั่วไปและผู้ที่ต้องการรถยนต์สำหรับใช้งานเฉพาะทาง ในราคาที่เข้าถึงได้ ส่งผลให้ธุรกิจซื้อขายรถยนต์มือสองมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ทั้งในรูปแบบของโชว์รูม การซื้อขายแบบดั้งเดิม และแพลตฟอร์มการตลาดออนไลน์ที่เพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้ซื้อและผู้ขายให้สามารถเข้าถึงการทำธุรกรรมได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม การกำหนดราคาของรถยนต์มือสองในตลาดยังคงขาดมาตรฐานราคากลาง โดยราคาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพรถยนต์ ปีที่ผลิต เลขไมล์ ยี่ห้อรุ่นของรถยนต์ ประวัติการใช้งานและกลยุทธ์ทางการตลาด [1], [2] อีกทั้งราคาที่ตั้งขึ้นโดยร้านค้าหรือผู้ขายรายย่อยนั้น ไม่ได้เป็นการการันตีราคาที่แท้จริงของรถยนต์ ส่งผลให้ผู้ซื้อที่มีความเสี่ยงที่จะซื้อในราคาเกินราคาปกติ หรือซื้อรถที่มีคุณภาพต่ำกว่าที่ควรจะเป็น แม้ว่าผู้ซื้อจะสามารถเปรียบเทียบราคาได้จากหลากหลายแหล่งข้อมูล เช่น เว็บไซต์ซื้อขายรถยนต์มือสอง หรือแพลตฟอร์มออนไลน์ แต่ต้องใช้เวลาและความชำนาญ อีกทั้งยังขาดเครื่องมือที่สามารถช่วยพยากรณ์ราคาได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำ [3], [4]

การพยากรณ์ราคามีหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมคือ การเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) ที่ใช้การสร้างแบบจำลองพยากรณ์ราคา โดยใช้ชุดข้อมูลเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำเข้าแบบจำลอง [5] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการรวบรวมข้อมูลรถยนต์มือสองเพื่อนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจของแบบจำลองและเปรียบเทียบแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ (web scraping) โดยเลือกเว็บไซต์ที่ได้รับความนิยมในการซื้อขายรถยนต์มือสองในประเทศไทย ได้แก่ Kaidee.com, One2Car.com และ Chobrod.com ที่สะท้อนราคาจริงในตลาดประเทศไทย หลังจากเปรียบเทียบและได้แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดแล้ว การใช้แบบจำลองจะช่วยให้ผู้ซื้อสามารถประเมินราคาที่เหมาะสมของรถยนต์แต่ละคันได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ลดความเสี่ยงจากการซื้อรถในราคาที่ไม่สมเหตุสมผลและส่งเสริมให้ตลาดรถยนต์มือสองมีความโปร่งใส ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ รวบรวมข้อมูลรถยนต์มือสองจากเว็บไซต์ประกาศขายออนไลน์โดยใช้เทคนิคการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องที่เหมาะสมกับการพยากรณ์ราคาของรถยนต์มือสอง ทั้งนี้ผลลัพธ์จากงานวิจัยยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในการซื้อขายรถยนต์มือสองทั้งในระดับผู้บริโภคทั่วไปและธุรกิจที่เกี่ยวข้อง

ทบทวนวรรณกรรม

การพยากรณ์ราคาของรถยนต์มือสองถือเป็นปัญหาวิจัยที่มีความสำคัญต่อผู้ที่ต้องการซื้อรถยนต์ เนื่องจากชุดข้อมูลมีลักษณะซับซ้อนและหลากหลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดราคาในตลาด เช่น สภาพทางกายภาพของรถยนต์มือสอง พฤติกรรมและรูปแบบการใช้งาน รวมถึงความผันผวนและแนวโน้มของกลไกตลาด ทั้งนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถจัดแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) การสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ 2) แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง 3) การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง และ 4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ราคาของรถยนต์มือสอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์

ในปัจจุบันข้อมูลที่ปรากฏบนเว็บไซต์นับเป็นแหล่งข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนาระบบอัจฉริยะต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตาม เว็บไซต์ส่วนใหญ่มักแสดงข้อมูลในรูปแบบของ HTML ซึ่งไม่อยู่ในโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานโดยตรง ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์เพื่อดึงข้อมูลที่ต้องการออกจากโครงสร้างหน้าเว็บไซต์และแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ ซึ่งจากงานวิจัยที่ [6] ได้อธิบายข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ เช่น HTTP programming, DOM parsing และ HTML parsers รวมถึงแนะนำซอฟต์แวร์และเครื่องมือยอดนิยมสำหรับการดึงข้อมูลจากเว็บไซต์ เช่น BeautifulSoup และ Scrapy การสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์มีจุดเด่นในเรื่องการช่วยดึงข้อมูลที่อยู่บนเว็บเพจมาใช้อย่างรวดเร็วและสะดวก ข้อมูลสามารถนำไปจัดเก็บ วิเคราะห์ หรือแปลงเป็นรูปแบบตามที่ต้องการได้ทันที โดยอาจจะมีข้อจำกัดในเรื่องนโยบายหรือข้อกำหนดการใช้งานบนบางเว็บไซต์ และยังคงจัดการกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเว็บไซต์ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง

2. แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง

แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้แบบจำลองเรียนรู้จากชุดข้อมูล ระบุรูปแบบ และตัดสินใจได้อัตโนมัติ ซึ่งแบบจำลองการเรียนรู้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก คือ 1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) เป็นกระบวนการฝึกฝนแบบจำลองด้วยชุดข้อมูลที่มีป้ายกำกับ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ เพื่อเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ตัวอย่างเช่น การจำแนกประเภท (classification) และการถดถอย (regression) ดังงานวิจัยที่ [7] 2) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) เป็นกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่มีป้ายกำกับ เพื่อหารูปแบบของข้อมูล ด้วยเทคนิคการจัดกลุ่ม (clustering) การค้นหากฎความสัมพันธ์ (association rule mining) และการลดมิติข้อมูล (dimensionality reduction) ดังงานวิจัยที่ [8] 3) การเรียนรู้แบบกึ่งมีผู้สอน (semi-supervised learning) เป็นวิธีการที่ประยุกต์ข้อมูลที่มีป้ายกำกับและไม่มีป้ายกำกับในการฝึกฝนแบบจำลอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายในสถานการณ์ที่ข้อมูลที่มีป้ายกำกับมีจำนวนจำกัด ดังงานวิจัยที่ [9] 4) การเรียนรู้เชิงเสริมแรง (reinforcement learning) เป็นการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้สัญญาณป้อนกลับในรูปของการกำหนดรางวัลหรือบทลงโทษเพื่อนำข้อมูลมาพัฒนาแบบจำลองดังงานวิจัยที่ [10]

3. การประเมินแบบจำลอง

การประเมินแบบจำลองต้องใช้เกณฑ์ที่เหมาะสมกับลักษณะและประเภทของปัญหา เนื่องจากแต่ละปัญหามีเป้าหมายและข้อกำหนดในการวัดที่แตกต่างกัน สำหรับการเรียนรู้แบบจัดกลุ่มสามารถประเมินได้ทั้งกรณีที่ไม่มี Ground truth โดยพิจารณาจากความหนาแน่นและการแยกของข้อมูลโดยมีตัวชี้วัด เช่น Silhouette score และ Davies–Bouldin index และกรณีที่มี Ground truth ใช้ตัวชี้วัด เช่น Adjusted rand index หรือ Normalized mutual information ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับกลุ่มข้อมูลจริง ส่วนการเรียนรู้แบบจำแนกประเภทใช้ตัวชี้วัดสำหรับการประเมินได้แก่ Accuracy, Precision, Recall, F1-score และ Receiver-operator curve ดังงานวิจัยที่ [11], [12], [13] นอกจากนี้ยังมีตัวชี้วัด Matthews correlation coefficient และ Cohen’s kappa ที่มีความน่าเชื่อถือในกรณีข้อมูลไม่สมดุล และในการเรียนรู้แบบถดถอยใช้กับการทำนายตัวแปรต่อเนื่อง โดยใช้ตัวชี้วัดสำหรับการประเมินได้แก่ รากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ร้อยละเฉลี่ย (MAPE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ (Forecast Accuracy: FA) ดังงานวิจัยที่ [18], [19] ซึ่งแต่ละตัวชี้วัดมีข้อจำกัดที่ต่างกันไป ดังนั้นการเลือกตัวแปรเพื่อการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวิจัยและลักษณะของชุดข้อมูลเป็นสำคัญ

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสอง

ผู้วิจัยได้รวบรวมและวิเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสอง โดยพิจารณาจากวิธีการหรืออัลกอริทึมที่ใช้ชุดข้อมูล การประเมินประสิทธิภาพ และผลการวิจัย เพื่อนำมาประกอบการเลือกแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบในงานวิจัยฉบับนี้ ทั้งนี้สาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยสรุปไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1: สรุปสาระสำคัญของการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ชื่องานวิจัย	วิธีการ/อัลกอริทึมที่ใช้	ชุดข้อมูล	การประเมินประสิทธิภาพ	ผลการวิจัย
1	Forecasting the Used Car Price Index Using Time Series Forecasting Methods [4]	- วิธีแยกส่วนประกอบ - วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลัง	ดัชนีราคารถยนต์มือสอง (ม.ค. 2562 – ธ.ค. 2566, 60 เดือน)	- Mean Absolute Deviation (MAD) - MAPE	วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังแบบวินเทอร์มีความเหมาะสมที่สุด MAD = 3.9535 และ MAPE = 4.0722

ตารางที่ 1: สรุปสาระสำคัญของการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับ	ชื่องานวิจัย	วิธีการ/อัลกอริทึมที่ใช้	ชุดข้อมูล	การประเมินประสิทธิภาพ	ผลการวิจัย
2	Comparative Analysis of Supervised Learning Algorithms for Valuating Used Car Prices [11]	- Multiple Linear Regression - Decision Tree Regression - Random Forest Regression	ชุดข้อมูล Car Dekho (13 คุณลักษณะ, 19974 รายการ)	- R^2 - RMSE - MAE	Random Forest Regression ความแม่นยำสูงสุดร้อยละ 94.10 เทียบกับ Decision Tree ที่ร้อยละ 92.45 และ Multiple Linear Regression ที่ร้อยละ 89.85
3	Comparative Analysis of XGBoost and Random Forest for Used Car Price Prediction [12]	- XGBoost - Random Forest	ชุดข้อมูลจาก OLX Indonesia (40,596 แถว, 7 คุณลักษณะหลัก ขยายเป็น 11 คุณลักษณะ)	- R^2 - RMSE - MAE	สำหรับแบบจำลองทั่วไป Random Forest มีประสิทธิภาพดีกว่า ($R^2 = 0.9485$) ด้วยความเสถียรและความสอดคล้องกันที่ดีกว่า สำหรับแบบจำลองเฉพาะแบรนด์ XGBoost ประสิทธิภาพดีอย่างสม่ำเสมอ สำหรับแบรนด์ส่วนใหญ่ เช่น Toyota โดยมี R^2 อยู่ที่ 0.96
4	Predicting the Selling Price of Cars Using Business Intelligence with the Feed-forward Backpropagation Algorithms [13]	Feed-forward Backpropagation	ชุดข้อมูล BMW จาก Kaggle (15 คุณลักษณะ, 325 กรณี, ปี ค.ศ. 1995–2017)	Mean Error	ราคาที่ทำนายใกล้เคียงกับราคาจริงด้วยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดร้อยละ 11.46
5	Predicting Used Car Prices in Metro Manila Using Artificial Neural Networks on Web-Scraped Data [14]	Artificial Neural Network (ANN) - Multilayer Feedforward Neural Network (MFNN) with Back Propagation Algorithm	สกัดข้อมูลจากเว็บ “cars.trovit.ph” ใน Metro Manila	- MAE - MSE - RMSE - R^2 - Adjusted R^2	- หลังการปรับจูน Hyperparameter: MSE = 31,905,395,405.08, RMSE = 179,402.63, MAE = 125,546.52, R^2 Score = 0.7031 - ค่า RMSE และ MAE สูงเกินไปในบริบทของราคารถยนต์มือสอง
6	Prediction of Used Car Price Based on Supervised Learning Algorithm [15]	- Extra Trees Regressor - Random Forest Regressor (RF) - Ridge Regression - Decision Tree Regressor (DT)	ชุดข้อมูลราคาจาก Ali Tian Chi (ปี ค.ศ. 1996–2019, 6019 รายการ, 12 คุณลักษณะ)	- R^2 - MAE - MSE - RMSE - RMSLE - MAPE	- ผลการวิจัยพบว่า Extra Trees Regressor (ET) ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ($R^2 = 0.9807$) หลังการปรับปรุง ซึ่งสูงกว่า RF (0.8448), Ridge (0.8417), DT (0.8001) - คุณลักษณะ ระบบเกียร์อัตโนมัติ (automatic transmission) มีความสำคัญสูงสุด
7	Predictive Analytics on Used Car Prices Using Business Intelligence of Bayesian Networks for Sales Risk Reduction [16]	Bayesian Networks (BN) - Probabilistic Modelling	ชุดข้อมูลจาก Craigslist (18,319 รายการ: 2,884 รถหุ, 15,435 รถไม่หุ)	Accuracy	- แบบจำลองเฉพาะสำหรับรถหุ มีความแม่นยำสูงสุด (ร้อยละ 83.5) - BN สามารถทำนายราคาภายใต้สภาวะที่ไม่แน่นอนได้

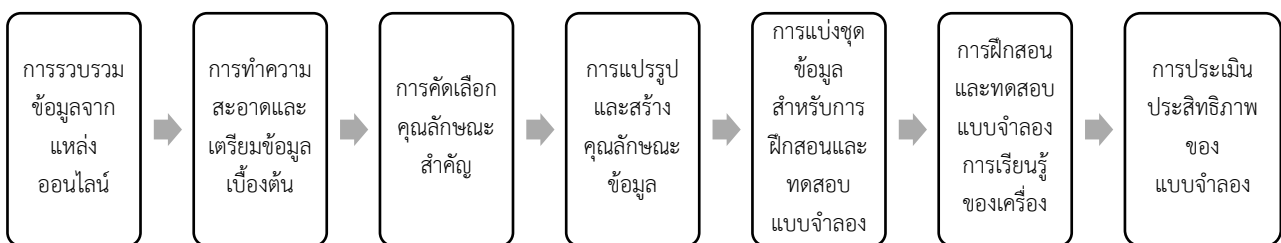
ตารางที่ 1: สรุปสาระสำคัญของการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ชื่องานวิจัย	วิธีการ/อัลกอริทึมที่ใช้	ชุดข้อมูล	การประเมินประสิทธิภาพ	ผลการวิจัย
8	Residual Value of Used Car Analysis and Prediction [17]	Neural Network, CatBoost, XGBoost, LightGBM, Random Forest, Decision Tree, LASSO regression	บันทึกการขายต่อจริงของรถยนต์เช่าซื้อ (กว่า 7,800 คัน) จากบริษัทในนิวซีแลนด์	- MAE - MAPE	- แบบจำลอง CatBoost ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ในการทำนายมูลค่างเฉลี่ย (MAE = 1195.29, MAPE = ร้อยละ 5.88) - ประสิทธิภาพดีกว่าวิธีเดิมของบริษัทประมาณร้อยละ 50 - การรวมตัวแปรเศรษฐกิจมหภาคช่วยเพิ่มความแม่นยำ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องอย่างหลากหลาย โดยเฉพาะการเรียนรู้ของเครื่องแบบมีผู้สอน เช่น Random Forest, XGBoost, Extra Trees และ Neural Network แสดงผลลัพธ์ที่แม่นยำ เมื่อนำไปใช้กับชุดข้อมูลจริงจากเว็บไซต์หรือธุรกิจรถยนต์มือสอง ตัวแปรในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ R^2 , RMSE, MAE และ MAPE ซึ่งแบบจำลองที่มีค่า R^2 สูงและค่าความคลาดเคลื่อนต่ำจะถูกพิจารณาว่ามีความเหมาะสมที่สุด การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยใช้คุณลักษณะสำคัญจากข้อมูลจริง และประเมินผลด้วยเกณฑ์มาตรฐานเพื่อให้สามารถพยากรณ์ราคาที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดในตลาดรถยนต์มือสองของไทย

ระเบียบวิธีวิจัย

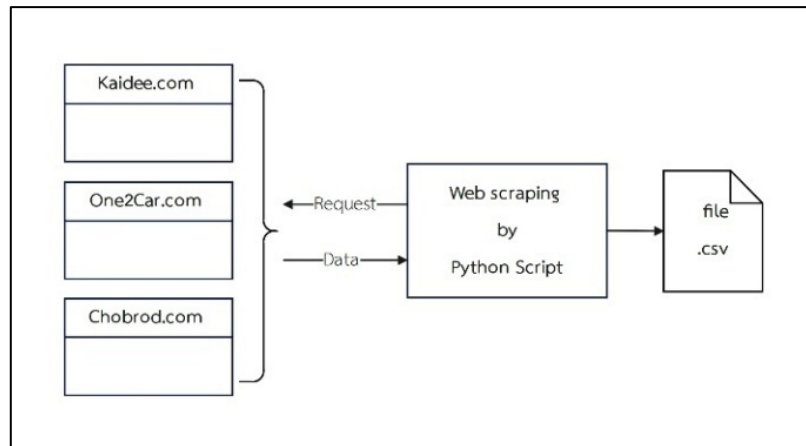
งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1: ขั้นตอนการดำเนินวิจัย

1. การรวบรวมข้อมูลจากแหล่งออนไลน์

ผู้วิจัยทำการรวบรวมข้อมูลรถยนต์มือสองจากเว็บไซต์ประกาศขายออนไลน์ ซึ่งประกอบด้วย Kaidee.com One2Car.com และ Chobrod.com โดยใช้เทคนิคการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ ผ่าน Requests Library และ BeautifulSoup ด้วยภาษา Python เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงได้ตามขั้นตอนในรูปที่ 2 ตัวอย่างเช่น ยี่ห้อและรุ่นของรถยนต์ ปีที่ผลิต เลขไมล์ ราคาขาย ระบบเกียร์ ประเภทเชื้อเพลิง ประเภทของระบบขับเคลื่อน และจังหวัดที่ประกาศขาย เป็นต้น ข้อมูลในขั้นตอนนี้อยู่ในรูปแบบไฟล์ .csv อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ นั้นจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง เนื่องจากความไม่เหมือนกันของข้อมูล เช่น บางแหล่งข้อมูลไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องยนต์ หรือข้อมูลที่สกัดได้ไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ ดังนั้นต้องนำข้อมูลเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดข้อมูลและเตรียมข้อมูลเบื้องต้นต่อไป



รูปที่ 2: ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งออนไลน์

2. การทำความสะอาดและเตรียมข้อมูลเบื้องต้น

ข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมจะผ่านการทำความสะอาด และปรับข้อมูลให้พร้อมใช้งานได้อย่างถูกต้อง ซึ่งมีกระบวนการดังต่อไปนี้

2.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของข้อมูล: เพื่อระบุข้อมูลที่ขาดหายไป เนื่องจากรูปแบบการกรอกข้อมูลในเว็บไซต์จากผู้ขายแต่ละแหล่งข้อมูลไม่เป็นมาตรฐานเดียวกัน รวมถึงไม่บังคับให้ผู้ลงขายกรอกข้อมูลที่ครบถ้วน โดยข้อมูลลักษณะนี้จะถูกลบออกไป

2.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติของข้อมูล: ข้อมูลที่สัปดาห์นั้นประกอบด้วยข้อมูลราคาของรถยนต์ที่แพงเกินความเป็นจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าของข้อมูล ณ จุดที่ 75 เป็นค่าอ้างอิง เพื่อกำหนดกรอบของราคารถยนต์มือสองที่ไม่ผิดปกติ ดังนั้นข้อมูลที่ไม่เข้าเงื่อนไขนี้จะถูกลบออกไป

2.3 การตรวจสอบข้อมูลที่มีความซ้ำซ้อนกัน: เนื่องจากในแต่ละเว็บไซต์ไม่มีข้อจำกัดสำหรับการลงขายสินค้าขึ้นเดียวกันกับเว็บไซต์อื่น ดังนั้นข้อมูลบางชุดที่ผู้ขายลงจะซ้ำซ้อนกับเว็บไซต์อื่น เพราะผู้ขายต้องการให้ผู้ซื้อสามารถมองเห็นการขายรถยนต์เพิ่มขึ้น ดังนั้นขั้นตอนนี้จะมีการลบข้อมูลที่ซ้ำซ้อนออกจากข้อมูลดิบ

2.4 การตรวจสอบรูปแบบข้อมูลว่าตรงกันหรือไม่: เช่น ข้อมูลวันที่และเวลา ซึ่งแต่ละแหล่งข้อมูลไม่เหมือนกัน ในกระบวนการนี้ใช้วิธีการแปลงข้อมูลเวลาให้อยู่ในรูปแบบของ วัน/เดือน/ปี รวมถึงปรับรูปแบบข้อมูลอื่นให้อยู่ประเภทเดียวกัน เช่น เลขทศนิยม

2.5 การแปลงข้อมูลตัวอักษรให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน: โดยปรับให้เป็นตัวอักษรลักษณะตัวพิมพ์เล็ก เพื่อให้คำเดียวกันมีความหมายตรงกัน เช่น “TOYOTA” “Toyota” และ “toyota”

2.6 การนำข้อมูลไปใช้ในแบบจำลอง: งานวิจัยนี้ได้เข้ารหัสข้อมูลที่เป็นข้อความให้เป็นตัวเลขและแยกเป็นคอลัมน์แต่ละลักษณะ เช่นคำว่า “toyota” หรือ “honda” ที่ถูกจัดรูปให้เป็นตัวพิมพ์เล็กจะถูกเข้ารหัสด้วยตัวเลข เช่น 1 และ 0 ซึ่งจะช่วยให้สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ได้

2.7 การตรวจสอบข้อมูลที่ผิดพลาด: เช่น ข้อมูลรุ่น Giulia และ Giulis ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหมายของข้อมูลคือ Giulia ดังนั้นข้อมูลที่ผิดจะถูกแก้ไขให้ถูกต้อง

เมื่อข้อมูลผ่านกระบวนการทำความสะอาดและเตรียมข้อมูลเบื้องต้นแล้วจะได้ข้อมูลที่พร้อมใช้งานเพื่อที่จะดำเนินการในขั้นตอนการแปรรูปและสร้างคุณลักษณะต่อไป

3. การแปรรูปและสร้างคุณลักษณะ

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้นำคุณลักษณะของชุดข้อมูลบางคุณลักษณะไปคำนวณและสร้างเป็นคุณลักษณะใหม่ เพื่อช่วยให้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองได้แม่นยำมากขึ้น ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะของข้อมูลต่อไปนี้

3.1 อายุรถยนต์: การคำนวณอายุของรถยนต์มือสองสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A_v = Y_p - Y_M \quad (1)$$

เมื่อ A_v คือ อายุรถยนต์

Y_p คือ ปี พ.ศ. ปัจจุบัน

Y_M คือ ปี พ.ศ. ที่รถยนต์ผลิต

3.2 อัตราการใช้งานต่อปี: ผู้วิจัยสร้างคุณลักษณะนี้ขึ้นมาเพื่อนำมาประเมินสภาพรถยนต์มือสอง ซึ่งคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$U_A = \frac{M_v}{A_v} \quad (2)$$

เมื่อ U_A คือ อัตราการใช้งานต่อปี (กิโลเมตร/ปี)

M_v คือ ระยะทางสะสม (กิโลเมตร)

3.3 กำลังสองของระยะทางสะสม: คุณลักษณะนี้ใช้เพื่อประเมินความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างระยะทางที่รถยนต์วิ่งและราคาของรถยนต์มือสอง โดยแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$M_s = M_v^2 \quad (3)$$

เมื่อ M_s คือ กำลังสองของระยะทางสะสม

3.4 กำลังสองของขนาดเครื่องยนต์: คุณลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับกำลังสองของระยะทางสะสม โดยแสดงได้สมการดังต่อไปนี้

$$E_s = E_v^2 \quad (4)$$

เมื่อ E_s คือ กำลังสองของขนาดเครื่องยนต์

E_v คือ ขนาดของเครื่องยนต์

3.5 ภาระการใช้งานสะสม: การสร้างคุณลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงปริมาณการใช้งานสะสมของเครื่องยนต์ดังสมการต่อไปนี้

$$V_t = M_v \times E_v \quad (5)$$

เมื่อ V_t คือ ภาระการใช้งานสะสม

3.6 ภาระเชิงเวลา: แสดงถึงปริมาณการใช้งานสะสมตามเวลาโดยคำนวณจากอายุรถ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_t = M_v \times A_v \quad (6)$$

เมื่อ V_t คือ ภาระเชิงเวลา

4. การแบ่งชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลอง

งานวิจัยนี้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและการทดสอบ โดยมีสัดส่วนการแบ่งข้อมูลคือ ร้อยละ 80 ต่อ ร้อยละ 20 ชุดข้อมูลฝึกสอนนำไปใช้ในการฝึกแบบจำลองเพื่อให้เรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะและราคาของรถยนต์มือสอง ขณะที่ชุดข้อมูลทดสอบสงวนไว้เพื่อประเมินความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ราคาที่ไม่เคยเห็นมาก่อน เพื่อให้ผลการพยากรณ์มีความน่าเชื่อถือและสะท้อนความแม่นยำของแบบจำลองในสถานการณ์จริง

5. การฝึกสอนและทดสอบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องจำนวน 5 แบบจำลอง เพื่อทำการพยากรณ์ราคาของรถยนต์มือสอง โดยแบบจำลองที่เลือกใช้คือ XGBoost, Random Forest, LightGBM, CatBoost และ Gradient Boosting ซึ่งแต่ละแบบจำลองมีคุณลักษณะเชิงโครงสร้างที่แตกต่างกัน และสามารถรองรับข้อมูลที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น การเลือกใช้แบบจำลองทั้ง 5 ประเภท มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองในเชิงปฏิบัติ

6. การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ผลลัพธ์ของแต่ละแบบจำลองจะถูกประเมินโดยใช้ค่าชี้วัด คือค่า RMSE, MAE, MAPE และ R² score เพื่อพิจารณาความแม่นยำในการพยากรณ์และความเหมาะสมของแบบจำลองสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยฉบับนี้ได้สรุปผลวิจัยแต่ละขั้นตอนเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ต้องการ โดยผลการวิจัยในแต่ละขั้นตอนสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการรวบรวมข้อมูลจากเว็บไซต์

จากการวิจัย ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลรถยนต์มือสองมีจำนวนทั้งสิ้น 55,989 รายการจาก 3 แหล่งข้อมูลหลัก ได้แก่ Kaidee.com, One2Car.com และ Chobrod.com โดยเก็บข้อมูลทั้งในด้านยี่ห้อ รุ่น ปีที่ผลิต ระยะทาง ราคา ระบบเกียร์ ระบบขับเคลื่อน และสถานที่ขาย ซึ่งข้อมูลทั้งหมดถูกจัดเก็บในรูปแบบ .csv

2. ผลการทำความสะอาดและเตรียมข้อมูลเบื้องต้น

การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 พบว่าข้อมูลที่สมบูรณ์และสามารถนำไปใช้งานได้มีจำนวนทั้งสิ้น 42,823 รายการ โดยมีการลบข้อมูลที่ขาดหาย ผิดปกติ หรือซ้ำซ้อน รวมถึงการปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลให้สอดคล้องกัน ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะของข้อมูลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: คุณลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการพยากรณ์

คุณลักษณะ	คำอธิบาย
brand	ยี่ห้อ
brand_model	ยี่ห้อและรุ่น
cartype	ประเภทรถ
color	สี
fuel	เชื้อเพลิง
engine	ขนาดเครื่องยนต์
gear	ระบบเกียร์
mileage	ระยะทางที่วิ่งทั้งหมด
model	รุ่น
province	จังหวัด
submodel	รุ่นย่อย
WD	ระบบขับเคลื่อน
year	ปีที่ผลิต

3. ผลการแปรรูปและสร้างคุณลักษณะใหม่

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างคุณลักษณะใหม่ 6 รายการ ได้แก่ อายุรถ อัตราการใช้งานรถยนต์ต่อปี กำลังสองของระยะทางสะสม กำลังสองของขนาดเครื่องยนต์ ภาระสะสมการใช้งานสะสมของรถยนต์ และภาระเชิงเวลาของรถยนต์ โดยพิจารณาจากนัยสำคัญของคุณลักษณะแต่ละตัว ซึ่งข้อมูลที่ชี้แจงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3: คุณลักษณะใหม่ของข้อมูลที่ใช้ในการพยากรณ์

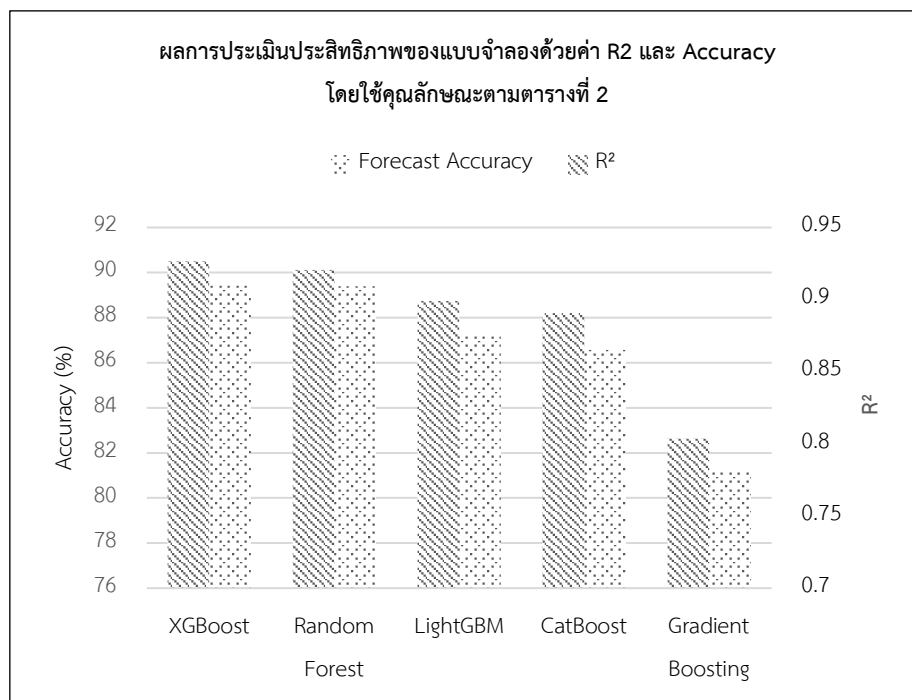
คุณลักษณะ	คำอธิบาย
car_age	อายุรถยนต์
mileage_per_year	อัตราการใช้งานรถยนต์ต่อปี
mileage_squared	กำลังสองของระยะทางสะสม
engine_squared	กำลังสองของขนาดเครื่องยนต์
mileage_engine_interaction	ภาระการใช้งานสะสม
age_mileage_interaction	ภาระเชิงเวลา

4. ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

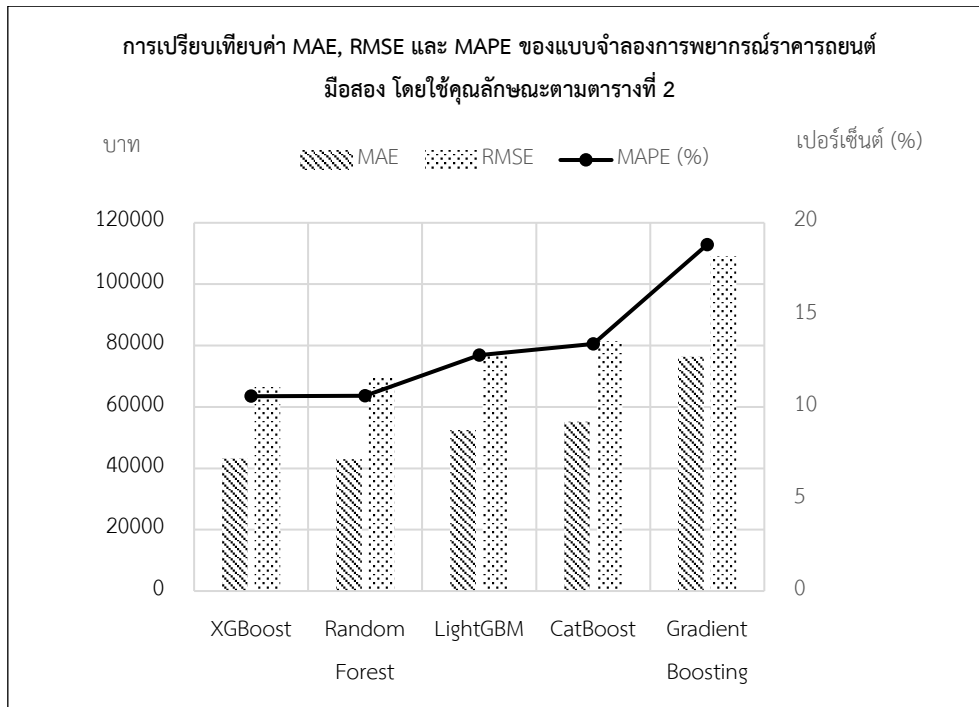
จากข้อมูลทั้งหมด 42,823 รายการ ถูกแบ่งออกเป็นชุดฝึกสอนจำนวน 34,258 รายการและชุดทดสอบจำนวน 8,565 รายการ โดยทดสอบกับแบบจำลองจำนวน 5 แบบ ได้แก่ XGBoost, Random Forest, LightGBM, CatBoost และ Gradient Boosting และตัวชี้วัดได้แก่ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยแบบสัมบูรณ์ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเชิงเปอร์เซ็นต์ และค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ โดยผู้วิจัยได้ทดลอง 2 แบบ คือ 1) ทดสอบโดยใช้คุณลักษณะพื้นฐานในตารางที่ 2 ซึ่งได้ผลการประเมินประสิทธิภาพสรุปได้ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 3-4 และ 2) ทดสอบโดยเพิ่มคุณลักษณะในตารางที่ 3 โดยผลการประเมินประสิทธิภาพแสดงได้ดังตารางที่ 5 และรูปที่ 5-6

ตารางที่ 4: ผลการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลองโดยใช้คุณลักษณะตามตารางที่ 2

Model	MAE (บาท)	RMSE (บาท)	MAPE (%)	R ²	Accuracy (%)
XGBoost	43,141.89	66,871.3	10.58	0.9262	89.42
Random Forest	43,042.89	69,872.79	10.68	0.9195	89.32
LightGBM	53,140.07	79,131.83	13.09	0.8967	86.91
CatBoost	56,009.61	82,600.02	13.68	0.8875	86.32
Gradient Boosting	77,812.95	111,318.41	19.25	0.7956	80.75



รูปที่ 3: ผลการประเมินเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ด้วยค่า R² และ FA โดยใช้คุณลักษณะตามตารางที่ 2



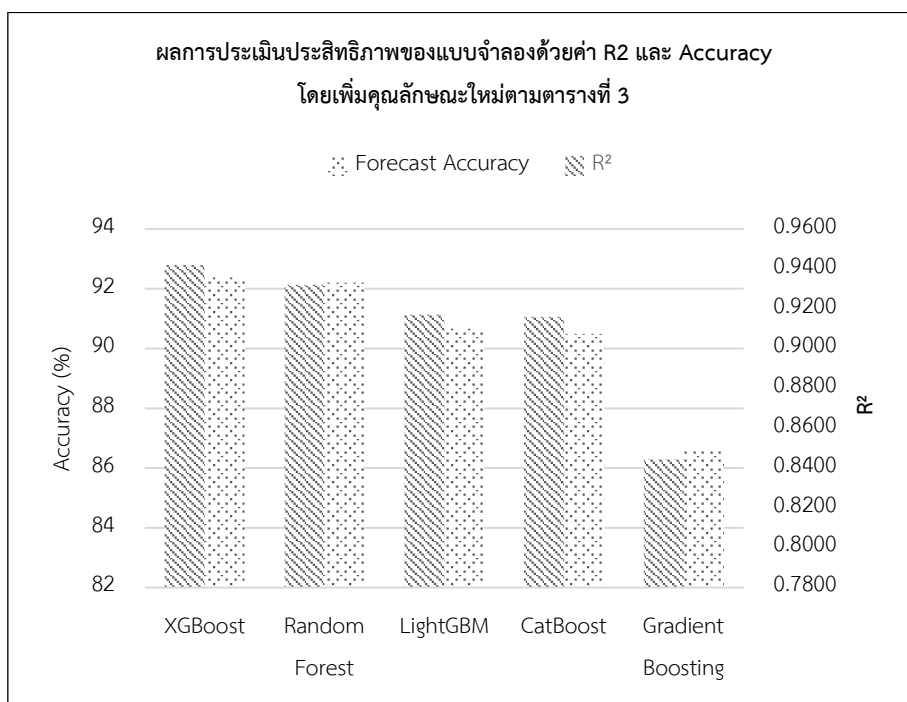
รูปที่ 4: การเปรียบเทียบค่า MAE, RMSE และ MAPE ของแบบจำลองการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสอง โดยใช้คุณลักษณะใหม่ตามตารางที่ 2

ผลการประเมินแบบจำลองทั้ง 5 แบบตามตารางที่ 4 พบว่าแบบจำลอง XGBoost มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9265 และ FA สูงสุดที่ร้อยละ 89.42 ตามที่แสดงในกราฟเปรียบเทียบระหว่าง R^2 และ FA ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากกราฟเปรียบเทียบค่า MAE, RMSE และ MAPE ในรูปที่ 4 พบว่าแบบจำลอง XGBoost มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ โดยเฉพาะค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 66,732.61 บาท และ MAPE เท่ากับร้อยละ 10.58 ซึ่งต่ำกว่าแบบจำลองอื่นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง XGBoost ไม่เพียงแต่มีความสามารถในการอธิบายข้อมูลได้ดี แต่ยังให้ผลการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองตามชุดข้อมูลที่มีความแม่นยำและความเสถียรสูงกว่าด้วย สำหรับแบบจำลอง Random Forest ที่แม้ค่า MAE ต่ำที่สุดที่ 42,954.29 บาท แต่เมื่อพิจารณาจากกราฟเปรียบเทียบ MAE, RMSE และ MAPE ดังแสดงได้ในรูปที่ 4 จะเห็นว่าค่า RMSE และ MAPE ของแบบจำลอง Random Forest ยังสูงกว่าแบบจำลอง XGBoost เล็กน้อย เป็นผลให้ค่า FA โดยรวมใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลอง Random Forest ซึ่งมีค่าเฉลี่ย FA เท่ากับร้อยละ 89.39 จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลอง Random Forest มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองสูงรองลงมา ขณะที่แบบจำลอง LightGBM และ CatBoost ให้ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.89–0.90 และ FA อยู่ในช่วงร้อยละ 86–87 แม้ไม่สูงเท่า XGBoost และ Random Forest แต่จากกราฟในรูปที่ 4 จะเห็นว่าแบบจำลองทั้งสองมีแนวโน้มของค่า MAE, RMSE และ MAPE ที่อยู่ในระดับปานกลาง ถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความสมดุลระหว่างความแม่นยำและการคำนวณ ในทางตรงกันข้าม แบบจำลอง Gradient Boosting มีค่า R^2 ต่ำที่สุดที่ 0.8037 และ FA ต่ำสุดเพียงร้อยละ 81.18 อีกทั้งกราฟในรูปที่ 4 ยังแสดงให้เห็นว่ามีค่า MAE, RMSE และ MAPE สูงที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองการพยากรณ์แบบอื่น แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมกับชุดข้อมูลราคารถยนต์มือสองที่ใช้ในการทดลอง

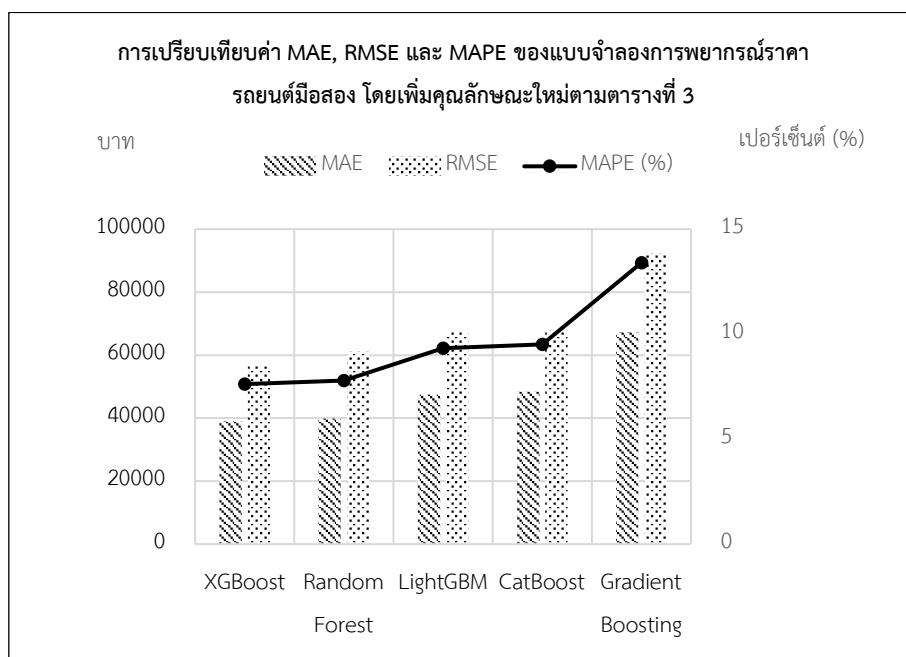
จากผลการทดลองในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง XGBoost และ Random Forest ให้ผลการพยากรณ์ราคาที่แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่น โดยมีค่า R^2 และ Accuracy สูงกว่า 0.92 และร้อยละ 89 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในตัวชี้วัด RMSE และ MAPE ยังคงอยู่ในระดับค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเกิดจากการที่ชุดข้อมูลยังมีคุณลักษณะจำกัด ทำให้แบบจำลองไม่สามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนของข้อมูลได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผู้วิจัยจึงได้ทำการเพิ่มจำนวนคุณลักษณะ โดยเฉพาะคุณลักษณะเชิงอนุพันธ์และคุณลักษณะเชิงปฏิสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจากคุณลักษณะพื้นฐานอีก 6 รายการ ซึ่งได้ผลการประเมินประสิทธิภาพดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5: ผลการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลองโดยเพิ่มคุณลักษณะที่ปรับปรุงใหม่ในตารางที่ 3

Model	MAE (บาท)	RMSE (บาท)	MAPE (%)	R ²	Accuracy (%)
XGBoost	38,900.23	56,447.83	7.62	0.9419	92.38
Random Forest	39,786.85	61,090.38	7.79	0.932	92.21
LightGBM	47,452.14	67,447.82	9.33	0.9171	90.67
CatBoost	48,369.00	67,899.4	9.51	0.916	90.49
Gradient Boosting	67,275.87	92,400.97	13.4	0.8444	86.6



รูปที่ 5: ผลการประเมินเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ด้วยค่า R² และ FA โดยเพิ่มคุณลักษณะใหม่ตามตารางที่ 3

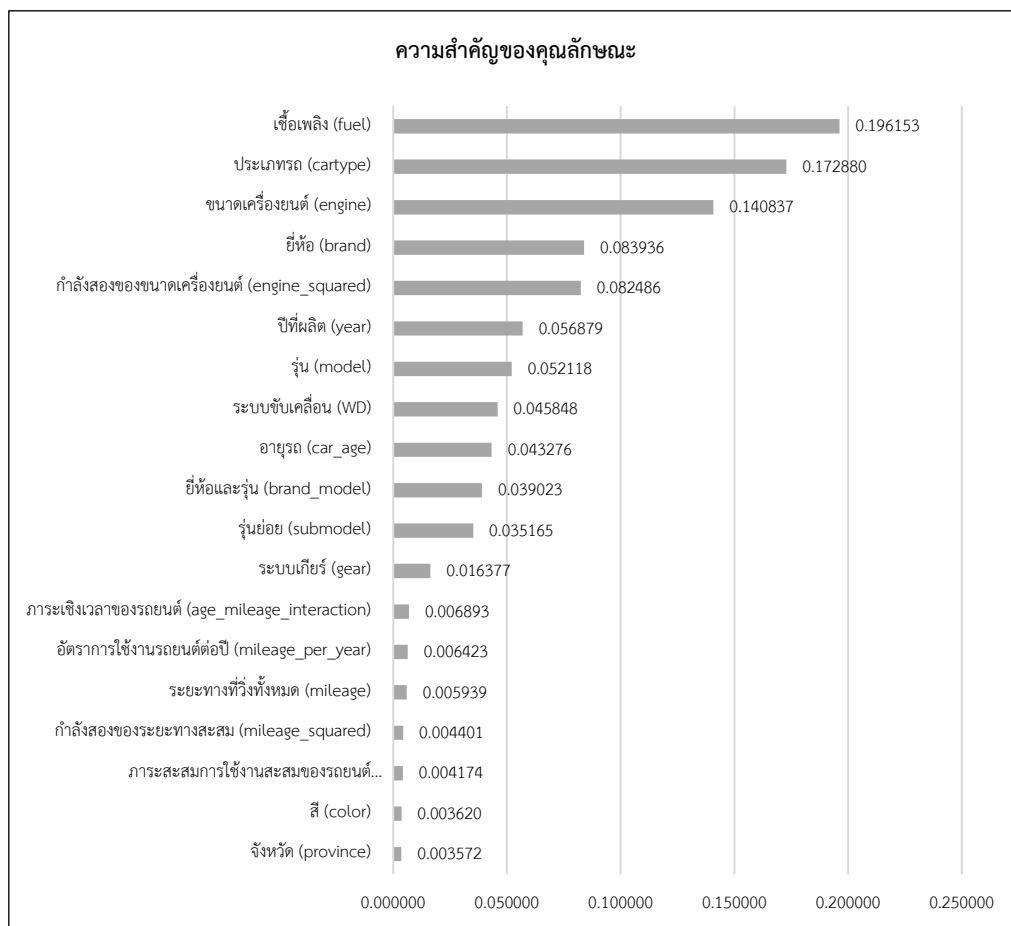


รูปที่ 6: การเปรียบเทียบค่า MAE, RMSE และ MAPE ของแบบจำลองการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองโดยเพิ่มคุณลักษณะใหม่ตามตารางที่ 3

จากตารางที่ 5 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงด้วยการเพิ่มคุณลักษณะตามตารางที่ 3 พบว่า ผลลัพธ์โดยรวมของทุกแบบจำลองดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตารางที่ 4 ทั้งในด้านค่าความคลาดเคลื่อน และค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนคุณลักษณะสร้างใหม่เข้าไปช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงลึกของข้อมูลการถยนต์มือสองได้ดียิ่งขึ้น โดยในรูปที่ 5 ซึ่งเปรียบเทียบค่า R^2 และ FA ของแบบจำลองทั้ง 5 แบบ พบว่าแบบจำลอง XGBoost ยังคงให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9419 และ Accuracy สูงถึงร้อยละ 92.38 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 89.42 ในตารางที่ 4 ขณะที่แบบจำลอง Random Forest มีประสิทธิภาพรองลงมา ($R^2 = 0.932$, Accuracy = ร้อยละ 92.21) โดยมีความคลาดเคลื่อน (MAE, RMSE, MAPE) ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่า MAE, RMSE และ MAPE ของแต่ละแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง XGBoost และ Random Forest ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในระดับต่ำที่สุด โดยเฉพาะ XGBoost ที่มี MAE เพียง 38,900.23 บาท และ MAPE เพียงร้อยละ 7.62 แสดงถึงความแม่นยำในการคาดการณ์ราคาที่มีประสิทธิภาพ ขณะที่ Random Forest แม้มีค่า MAE สูงกว่าเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงรักษาความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ในเชิงเสถียรภาพได้ดี

ส่วนแบบจำลอง LightGBM และ CatBoost ให้ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.916 – 0.917 และ Accuracy ประมาณร้อยละ 90–91 ถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความสมดุลระหว่างความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความเร็วในการประมวลผลมากกว่า ขณะที่ Gradient Boosting ยังคงมีค่าประสิทธิภาพต่ำสุด ($R^2 = 0.8444$, Accuracy = ร้อยละ 86.6) และมีค่า MAE และ RMSE สูงกว่าแบบจำลองอื่น จึงไม่เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลการถยนต์มือสองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เพื่อทำความเข้าใจปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความสำคัญของคุณลักษณะในแบบจำลอง XGBoost ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ให้ผลการพยากรณ์ดีที่สุด ซึ่งผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7: ความสำคัญของคุณลักษณะในชุดข้อมูล

จากรูปที่ 7 พบว่า คุณลักษณะ 5 อันดับแรกที่มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองมากที่สุด ได้แก่ ประเภทเชื้อเพลิง ประเภทรถ ขนาดเครื่องยนต์ ยี่ห้อ และค่ากำลังสองของขนาดเครื่องยนต์ โดยทั้งหมดมีค่าน้ำหนักรวมมากกว่าร้อยละ 68 ของค่าความสำคัญทั้งหมด สะท้อนว่าปัจจัยด้านเทคนิคของรถยนต์มีอิทธิพลอย่างมากต่อการกำหนดราคาเมื่อสอง ในขณะที่คุณลักษณะรอง เช่น ปีที่ผลิต อายุของรถ และ ระบบขับเคลื่อน มีความสำคัญในระดับปานกลาง ส่วนปัจจัยด้าน สี และ จังหวัด มีผลในระดับต่ำกว่า 0.004 แสดงให้เห็นว่ามีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อการประเมินมูลค่ารถยนต์มือสอง

ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในตารางที่ 5 และรูปที่ 5-6 ยืนยันได้ว่า คุณลักษณะใหม่ที่เพิ่มเข้าไป ได้แก่ 1) อายุของรถยนต์มือสอง 2) อัตราการใช้งานรถยนต์ต่อปี 3) กำลังสองของระยะทางสะสม 4) กำลังสองของขนาดเครื่องยนต์ 5) ภาระสะสมการใช้งานสะสมของรถยนต์ 6) ภาระเชิงเวลาของรถยนต์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองตามชุดข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะในแบบจำลอง XGBoost ที่แสดงศักยภาพสูงสุดในการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองจากข้อมูลจริง

สรุปผล

จากการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองโดยใช้เทคนิคการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ประกาศขายรถยนต์ในประเทศไทย ได้แก่ Kaidee.com, One2Car.com และ Chobrod.com รวมข้อมูลทั้งสิ้น 55,989 รายการ หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดและคัดกรองข้อมูลแล้วเหลือข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ได้จำนวน 42,823 รายการ ซึ่งถูกแบ่งเป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบในสัดส่วน 80 ต่อ 20 เพื่อใช้กับแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง 5 แบบ ได้แก่ XGBoost, Random Forest, LightGBM, CatBoost และ Gradient Boosting

ในการทดลองแรกที่ใช้เฉพาะคุณลักษณะพื้นฐาน พบว่าแบบจำลอง XGBoost ให้ผลการพยากรณ์แม่นยำที่สุด ($R^2 = 0.9262$, Accuracy = ร้อยละ 89.42) รองลงมาคือ Random Forest ($R^2 = 0.9195$, Accuracy = ร้อยละ 89.32) ส่วน LightGBM และ CatBoost มีประสิทธิภาพระดับปานกลาง และ Gradient Boosting มีค่าความแม่นยำต่ำที่สุด สะท้อนว่าข้อมูลพื้นฐานเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอต่อการเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนของตัวแปรราคา

เมื่อเพิ่มคุณลักษณะใหม่ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปและสร้างคุณลักษณะ ประกอบด้วย 1) อายุของรถยนต์ 2) อัตราการใช้งานต่อปี 3) กำลังสองของระยะทางสะสม 4) กำลังสองของขนาดเครื่องยนต์ 5) ภาระสะสมการใช้งาน และ 6) ภาระเชิงเวลา พบว่าแบบจำลองทุกแบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะ XGBoost ซึ่งมีค่า R^2 เพิ่มขึ้นเป็น 0.9419 และ Accuracy เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 92.38 ขณะที่ค่า MAPE ลดลงเหลือร้อยละ 7.62 แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงลึกระหว่างคุณลักษณะต่าง ๆ ของรถยนต์มือสอง

ผลการวิเคราะห์ ความสำคัญของคุณลักษณะ ของแบบจำลอง XGBoost ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อราคาเมื่อสองมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ ประเภทเชื้อเพลิง ประเภทรถ ขนาดเครื่องยนต์ ยี่ห้อ และค่ากำลังสองของเครื่องยนต์ โดยรวมมีค่าน้ำหนักมากกว่าร้อยละ 68 ของความสำคัญทั้งหมด ซึ่งแสดงว่าปัจจัยทางเทคนิคของรถยนต์มีผลต่อมูลค่าตลาดโดยตรง ขณะที่ปีผลิต อายุรถ และระบบขับเคลื่อนมีผลในระดับปานกลาง ส่วนสีและจังหวัดมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อย ผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพในตารางที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มคุณลักษณะเชิงอนุพันธ์และเชิงปฏิสัมพันธ์ช่วยให้แบบจำลองลดค่าความคลาดเคลื่อน (MAE, RMSE, MAPE) และเพิ่มความแม่นยำของการพยากรณ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องร่วมกับการสร้างคุณลักษณะใหม่ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการพยากรณ์ราคารถยนต์มือสองได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะแบบจำลอง XGBoost ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงสุดและความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ซื้อ ผู้ขาย และผู้ให้บริการสินเชื่อเพื่อประเมินมูลค่ารถยนต์มือสองอย่างเป็นธรรม โปร่งใส และช่วยยกระดับมาตรฐานของตลาดรถยนต์มือสองในประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และคณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต เป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้การสนับสนุนทรัพยากรและเอื้อเฟื้อสถานที่ บุคลากร และอำนวยความสะดวกที่ช่วยส่งเสริมบรรยากาศแห่งการเรียนรู้ที่เอื้อต่อการพัฒนาศักยภาพของนักวิจัย และขอขอบคุณ เว็บไซต์ Kaidee.com One2Car.com และ Chobrod.com ที่เป็นแหล่งข้อมูลสำคัญของการสกัดข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยในครั้งนี้

REFERENCES

- [1] S. Bergmann and S. Feuerriegel, "Machine learning for predicting used car resale prices using granular vehicle equipment information," *Expert Syst. Appl.*, vol. 263, 2025, Art. no. 125640, doi: 10.1016/j.eswa.2024.125640.
- [2] L. Bukvić, J. P. Škrinjar, T. Fratrović, and B. Abramović, "Price prediction and classification of used-vehicles using supervised machine learning," *Sustainability*, vol. 14, no. 24, 2022, Art. no. 17034, doi: 10.3390/su142417034.
- [3] M. Nandan and D. Ghosh, "Pre-owned car price prediction by employing machine learning techniques," *J. Decis. Anal. Intell. Comput.*, vol. 3, no. 1, pp. 167–184, 2023, doi: 10.31181/jdaic10008102023n.
- [4] A. Theppanya and N. Netpradit, "Forecasting the used car price index using time series forecasting methods," (in Thai), *Maejo Bus. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 81–95, 2024, doi: 10.14456/mbr.2024.10.
- [5] A. AlShared, "Used cars price prediction and valuation using data mining techniques," M.S. thesis, Rochester Inst. Technol., Rochester, NY, USA, 2021. [Online]. Available: <https://repository.rit.edu/theses/11086>
- [6] V. Singrodia, A. Mitra, and S. Paul, "A review on web scrapping and its applications," in *Proc. Int. Conf. Comput. Commun. Inform. (ICCCI)*, Coimbatore, India, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICCCI.2019.8821809.
- [7] N. Burkart and M. F. Huber, "A survey on the explainability of supervised machine learning," *J. Artif. Intell. Res.*, vol. 70, pp. 245–317, 2021, doi: 10.1613/jair.1.12228.
- [8] B. Rolf et al., "A review on unsupervised learning algorithms and applications in supply chain management," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 63, no. 5, pp. 1933–1983, 2025, doi: 10.1080/00207543.2024.2390968.
- [9] L.-Z. Guo, L.-H. Jia, J.-J. Shao, and Y.-F. Li, "Robust semi-supervised learning in open environments," *Front. Comput. Sci.*, vol. 19, 2025, Art. no. 198345, doi: 10.1007/s11704-024-40646-w.
- [10] H. Xie et al., "Reinforcement learning for vehicle-to-grid: A review," *Advances Appl. Energy*, vol. 17, 2025, Art. no. 100214, doi: 10.1016/j.adapen.2025.100214.
- [11] J. S. Jhala and D. Anand, "Comparative analysis of supervised learning algorithms for valuating used car prices," in *Proc. Int. Conf. Advancement Comput. Comput. Technol. (InCACCT)*, Gharuan, India, 2023, pp. 265–270, doi: 10.1109/InCACCT57535.2023.10141827.
- [12] R. Nuzulia, A. Misbullah, L. Farsiah, Rasudin, Husaini, and S. A. Nazhifah, "Comparative analysis of XGBoost and random forest for used car price prediction," in *Proc. Int. Conf. Elect. Eng. Inform. (ICELTICs)*, Banda Aceh, Indonesia, 2024, pp. 125–129, doi: 10.1109/ICELTICs62730.2024.10776051.
- [13] N. O. Idris, A. Achban, S. A. Utiahman, J. Karim, and F. Pontooyo, "Predicting the selling price of cars using business intelligence with the feed-forward backpropagation algorithms," in *Proc. 5th Int. Conf. Inform. Comput. (ICIC)*, Gorontalo, Indonesia, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICIC50835.2020.9288594.
- [14] R. B. A. Supleo, R. G. De Luna, and A. C. Padilla, "Predicting used car prices in Metro Manila using artificial neural networks on web-scraped data," in *Proc. 7th Int. Conf. Inform. Comput. Sci. (ICICoS)*, Semarang, Indonesia, 2024, pp. 30–35, doi: 10.1109/ICICoS62600.2024.10636891.
- [15] F. Wang, X. Zhang, and Q. Wang, "Prediction of used car price based on supervised learning algorithm," in *Proc. Int. Conf. Netw., Commun. Inf. Technol. (NetCIT)*, Manchester, U.K., 2021, pp. 143–147, doi: 10.1109/NetCIT54147.2021.00036.



- [16] J. D. Apeko, I. O. Osunmakinde, M. M. Abdulgader, and K. C. Nwosu, "Predictive analytics on used car prices using business intelligence of Bayesian networks for sales risk reduction," in *Proc. Int. Conf. Elect., Comput. Energy Technol. (ICECET)*, Cape Town, South Africa, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICECET58911.2023.10389200.
- [17] H. Jing, X. Ye, and S. Manoharan, "Residual value of used car analysis and prediction," in *Proc. Int. Conf. Elect. Comput. Energy Technol (ICECET)*, Cape Town, South Africa, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICECET58911.2023.10389355.
- [18] G. Buturac, "Measurement of economic forecast accuracy: a systematic overview of the empirical literature," *J. Risk Financial Manage.*, vol. 15, no. 1, 2022, Art. no. 1, doi: 10.3390/jrfm15010001.
- [19] J. O'Trakoun, "Business forecasting during the pandemic," *Bus. Econ.*, vol. 57, no. 3, pp. 95–110, 2022.

แบบจำลองเครือข่ายเพื่อวิเคราะห์การแพร่ระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลังในประเทศไทย

ชญาณัฐ ศักดิ์ รัตนะวรวงศ์*

*คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, พระนครศรีอยุธยา, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บทความ: pormarch@yahoo.co.th

รับต้นฉบับ: 17 กันยายน 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 12 มกราคม 2569; ตอบรับบทความ: 14 มกราคม 2569

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโครงสร้างเครือข่ายสองโหนด เพื่อศึกษาการแพร่ระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลังในประเทศไทย โดยจำแนกประชากรพืชออกเป็น 4 กลุ่มตามสถานการณ์ติดเชื้อ และพิจารณาการเชื่อมโยงระหว่างสองพื้นที่ที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายของแมลงที่เป็นพาหะและท่อนพันธุ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกวิเคราะห์เชิงสัญลักษณ์โดยใช้เมทริกซ์รุ่นถัดไปในการคำนวณค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน R_0 และตรวจสอบเสถียรภาพของจุดสมดุลด้วยทฤษฎีบทวงกลมของเกอโรกริน ผลการศึกษาพบว่าอัตราการติดเชื้อและอัตราการฟื้นตัวมีอิทธิพลต่อค่า R_0 มากที่สุด โดยแบบจำลองสามารถอธิบายพลวัตของโรคได้ทั้งในสภาวะไร้โรคและสภาวะระบาด ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเสี่ยงในการกระจายระหว่างพื้นที่ที่มีการเคลื่อนย้ายต้นพันธุ์ ข้อเสนอเชิงนโยบายที่สอดคล้องกับผลการวิจัย ได้แก่ การควบคุมการเคลื่อนย้ายท่อนพันธุ์ การใช้พันธุ์ต้านทาน และการจัดการพื้นที่ปลูกอย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมโรคใบด่างมันสำปะหลังอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: โรคใบด่างมันสำปะหลัง การควบคุมโรค แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โครงสร้างเครือข่าย เมทริกซ์รุ่นถัดไป

Network Modeling and Analysis of Cassava Mosaic Disease Transmission in Thailand

Chayanusapat Rattanavarawong^{*}

^{}Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,
Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand*

^{*}Corresponding author e-mail: pormarch@yahoo.co.th

Received: 17 September 2025; Revised: 12 January 2026; Accepted: 14 January 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

This study aims to develop and analyze a mathematical model based on a two-node network structure to investigate the spread of cassava mosaic disease in Thailand. The plant population is divided into four compartments according to infection status, and the connections between two regions are considered through the movement of insect vectors and stem cuttings. The mathematical model is analyzed symbolically using the next generation matrix to calculate the basic reproduction number (R_0), and the stability of equilibrium points is examined via the Gershgorin circle theorem. The results show that the infection and recovery rates have the greatest influence on R_0 . The model explains the disease dynamics under both disease-free and endemic conditions, highlighting the risk of transmission between regions through the movement of planting materials. Policy recommendations consistent with the finding include controlling the migration of stem cutting, adopting resistant cultivars, and implementing appropriate field management to enhance the sustainable control of cassava mosaic disease.

Keywords: Cassava mosaic disease, Disease control, Mathematical modeling, Network structure, Next generation matrix

บทนำ

โรคใบด่างมันสำปะหลัง (Cassava Mosaic Disease: CMD) ยังคงเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อภาคการเกษตรของประเทศไทยอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังหลัก เช่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง สาเหตุของโรคนี้คือเชื้อไวรัส *Sri Lankan Cassava Mosaic virus* (SLCMV) ซึ่งอยู่ในวงศ์ *Geminiviridae* ซึ่งมีการแพร่ระบาดอย่างรุนแรงในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 เป็นต้นมา [1], [2] การแพร่กระจายของโรคเกิดขึ้นได้ทั้งจากการปลูกชำด้วยท่อนพันธุ์ที่ติดเชื้อ และจากแมลงพาหะที่สำคัญคือแมลงหวี่ขาว (*Bemisia tabaci*) ซึ่งมีการกระจายพันธุ์ทั่วโลกและมีบทบาทสำคัญในการนำเชื้อไวรัสจากต้นหนึ่งไปยังอีกต้นหนึ่ง [3]

สถานการณ์ปัจจุบันสะท้อนให้เห็นถึงความรุนแรงของโรคใบด่างมันสำปะหลัง โดยในปี พ.ศ. 2568 มีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังทั่วประเทศประมาณ 9.3 ล้านไร่ และพบว่ามากกว่า 3.2 ล้านไร่ หรือคิดเป็นกว่าร้อยละ 34 ของพื้นที่ปลูกทั้งหมดได้รับผลกระทบ ส่งผลให้ผลผลิตลดลงเหลือเพียง 28.5 ล้านตัน จากเดิมที่เคยผลิตได้มากกว่า 31 ล้านตันในปี 2563 มูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจประเมินมากกว่า 12,000 ล้านบาท และมีครัวเรือนเกษตรกรที่ได้รับผลกระทบมากกว่า 750,000 ครัวเรือน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการหาวิธีควบคุมโรคอย่างมีประสิทธิภาพ [4], [5]

แม้ว่าจะมีมาตรการควบคุม เช่น การสำรวจแปลงปลูก การทำลายต้นที่ติดเชื้อ การควบคุมแมลงพาหะ และการส่งเสริมการใช้พันธุ์ที่ทนทานต่อโรค แต่แนวทางเหล่านี้ยังไม่สามารถหยุดยั้งการแพร่ระบาดได้อย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในบริบทของพื้นที่ปลูกที่มีการเชื่อมโยงกันอย่างซับซ้อน ทั้งจากการแลกเปลี่ยนท่อนพันธุ์ การเคลื่อนย้ายของแมลงพาหะ และการติดต่อระหว่างชุมชนเกษตร [6]

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาการแพร่ระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลัง ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการจำลองสถานการณ์ เพื่อทำความเข้าใจพลวัตของโรค โดย Minhós et al. [7] ได้เสนอแบบจำลองเชิงสุ่มที่มีโครงสร้างสมการเศษส่วนและดีเลย์ (Stochastic fractional delay differential equations) เพื่อสะท้อนความไม่แน่นอนและความหน่วงของระบบจริง โดยเน้นการวิเคราะห์เสถียรภาพและการคงอยู่ของโรคภายใต้ผลกระทบของความสุ่มและเวลาหน่วง ซึ่งช่วยเพิ่มความสมจริงในการอธิบายพลวัตของโรคใบด่างมันสำปะหลัง นอกจากนี้งานวิจัยของ Reja et al. [8] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete-time model) เพื่อศึกษาพลวัตของโรคใบด่างมันสำปะหลัง โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ Neimark–Sacker bifurcation ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงพลวัตของระบบเมื่อค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนไป และทำให้เกิดพฤติกรรมการแกว่งแบบ quasi-periodic ในจำนวนพืชที่ติดเชื้อ นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหว (sensitivity analysis) เพื่อระบุพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการแพร่ระบาด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถสะท้อนความซับซ้อนของพลวัตโรคได้อย่างสมจริง และให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญต่อการกำหนดมาตรการควบคุมโรคอย่างมีประสิทธิภาพ และ Kinene et al. [9] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพลวัตของโรค Cassava Brown Streak Disease (CBSD) ในประเทศยูกันดา โดยรวมมาตรการควบคุมที่ใช้อยู่จริง เช่น การถอนและเผาต้นที่ติดเชื้อ การใช้พันธุ์ต้านทาน และการควบคุมแมลงพาหะด้วยการฉีดพ่นสารกำจัดแมลงเข้าไปในแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์ครอบคลุมทั้งการคำนวณค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน การตรวจสอบเสถียรภาพของสมดุล และการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ พร้อมทั้งประเมินต้นทุน-ประสิทธิผลของมาตรการควบคุมแต่ละแบบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้มาตรการควบคุมแบบผสมผสาน โดยเฉพาะการเพิ่มอัตราการตายของแมลงพาหะร่วมกับการกำจัดต้นที่ติดเชื้อ มีความคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการแพร่ระบาดของโรค

จากทบทวนวรรณกรรมดังกล่าว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีบทบาทสำคัญในการทำความเข้าใจพลวัตของโรคใบด่างมันสำปะหลัง ทั้งในระดับทฤษฎีและการประยุกต์ใช้เชิงนโยบาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเน้นการวิเคราะห์ในระบบโหนดเดียวเป็นหลัก จึงยังมีช่องว่างในการศึกษาการแพร่ระบาดในบริบทของเครือข่ายหลายพื้นที่ที่มีการเชื่อมโยงกัน ซึ่งเป็นประเด็นที่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโครงสร้างเครือข่ายสองโหนด เพื่ออธิบายและวิเคราะห์การแพร่ระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลัง โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญ เช่น อัตราการติดเชื้อ การเคลื่อนย้ายของแมลงพาหะ และโครงสร้าง

การเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ปลูก แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุม และเสนอแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการโรคใบด่างอย่างเป็นระบบและยั่งยืน

ระเบียบวิธีวิจัย

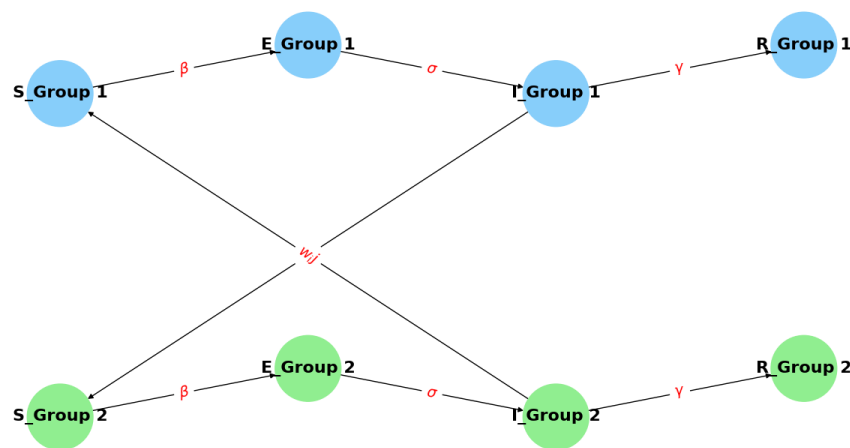
1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแบบจำลองเครือข่ายทางคณิตศาสตร์ ที่พิจารณาเครือข่ายที่มี n โหนด แต่ละโหนด i แทนต้นมันสำปะหลังในแปลงย่อยที่มีขนาด N_i ขณะที่โหนด j แทนต้นมันสำปะหลังในแปลงย่อยอื่น ๆ ที่มีการแพร่เชื้อต่อโหนด i โดยจำแนกดังตารางที่ 1 [10], [11]

ตารางที่ 1: สัญลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัญลักษณ์	ความหมาย
S_i	จำนวนต้นมันสำปะหลังในพื้นที่ i ที่ยังไม่ติดโรค (Susceptible)
E_i	ต้นที่ได้รับเชื้อแล้วแต่ยังไม่แสดงอาการหรือยังไม่แพร่เชื้อ (Exposed)
I_i	ต้นที่ติดโรคและสามารถแพร่เชื้อโรคได้ (Infectious) ผ่านแมลงห้ำหรือท่อนพันธุ์
R_i	ต้นที่หายจากโรค หรือถูกกำจัดแล้ว (Removed/Recovered)
β	อัตราการแพร่เชื้อจากต้นที่ติดโรคผ่านแมลงห้ำหรือท่อนพันธุ์
σ	อัตราที่ต้นที่ได้รับเชื้อเริ่มแสดงอาการและแพร่เชื้อได้
γ	อัตราการฟื้นตัวของต้นมันสำปะหลัง
w_{ij}	ความเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ i และ j การเคลื่อนที่ของแมลงห้ำหรือการแลกเปลี่ยนท่อนพันธุ์

โดยแสดงแผนภาพเชื่อมโยงเพื่ออธิบายแนวคิดในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1: โครงข่ายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรคใบด่างในมันสำปะหลัง

เราสามารถสร้างระบบสมการเพื่ออธิบายการแพร่กระจายของโรคใบด่างและแสดงความสัมพันธ์ของต้นมันสำปะหลังได้ดังนี้

$$\frac{dS_i}{dt} = -\beta S_i \sum_j w_{ij} I_j \quad (1)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \beta S_i \sum_j w_{ij} I_j - \sigma E_i \quad (2)$$

$$\frac{dI_i}{dt} = \sigma E_i - \gamma I_i \quad (3)$$

$$\frac{dR_i}{dt} = \gamma I_i \quad (4)$$

ในงานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองการแพร่กระจายของโรคใบด่างและแสดงความสัมพันธ์ของต้นมันสำปะหลังในกรณีเพียง 2 โหนด

$$\frac{dS_1}{dt} = -\beta S_1(w_{11}I_1 + w_{12}I_2) \quad (5)$$

$$\frac{dE_1}{dt} = \beta S_1(w_{11}I_1 + w_{12}I_2) - \sigma E_1 \quad (6)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \sigma E_1 - \gamma I_1 \quad (7)$$

$$\frac{dR_1}{dt} = \gamma I_1 \quad (8)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = -\beta S_2(w_{21}I_1 + w_{22}I_2) \quad (9)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \beta S_2(w_{21}I_1 + w_{22}I_2) - \sigma E_2 \quad (10)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \sigma E_2 - \gamma I_2 \quad (11)$$

$$\frac{dR_2}{dt} = \gamma I_2 \quad (12)$$

ตารางที่ 2: ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	อ้างอิง
β	0.05–0.2	ต้น ⁻¹ *สัปดาห์ ⁻¹	Legg et al. [12]
σ	0.5–1.0	สัปดาห์ ⁻¹	Legg and Thresh [13]
γ	0.1	สัปดาห์ ⁻¹	Fargette et al. [14]
w_{ij}	0.3–0.7	ไม่มีหน่วย	Xiao and van den Bosch [15]

2. จุดสมดุลและการวิเคราะห์เสถียรภาพของจุดสมดุล

พิจารณาจุดสมดุล $(S_i^*, E_i^*, I_i^*, R_i^*)$ ได้จากการกำหนดให้ขวามือของแต่ละสมการ ในสมการ (5)–(12) เท่ากับ 0 จะได้ว่า จุดสมดุลสภาวะไร้โรค คือ $E_{DFE}(S_1^*, E_1^*, I_1^*, R_1^*, S_2^*, E_2^*, I_2^*, R_2^*) = (N_1, 0, 0, 0, N_2, 0, 0, 0)$ โดยที่ $N_i = S_i + E_i + I_i + R_i$ จุดสมดุลสภาวะการระบาดของโรค คือ $E_{EE}(S_1^*, E_1^*, I_1^*, R_1^*, S_2^*, E_2^*, I_2^*, R_2^*)$ โดยที่

$$S_1^* = \frac{\gamma N_1 I_1^*}{\beta(I_1^* + w_{12}I_2^*)} \quad (13)$$

$$E_1^* = \frac{\gamma}{\sigma} I_1^* \quad (14)$$

$$R_1^* = N_1 - S_1^* - E_1^* - I_1^* \quad (15)$$

$$S_2^* = \frac{\gamma N_2 I_2^*}{\beta(I_2^* + w_{21}I_1^*)} \quad (16)$$

$$E_2^* = \frac{\gamma}{\sigma} I_2^* \quad (17)$$

$$R_2^* = N_2 - S_2^* - E_2^* - I_2^* \quad (18)$$

3. ทาค่า Basic Reproductive Number (R_0)

ค่าที่ใช้วัดความสามารถในการแพร่เชื้อของโรคติดต่อในต้นมันสำปะหลังที่ยังไม่มีภูมิคุ้มกันเลย โดยมีความหมายว่า จำนวนต้นมันสำปะหลังที่ติดเชื้อต้นใหม่โดยเฉลี่ยต้นที่ติดเชื้อหนึ่งต้นสามารถแพร่เชื้อไปยังต้นอื่นได้ ในสภาวะต้นมันสำปะหลังทั้งหมดมีความไวต่อการติดเชื้อ (ไม่มีภูมิคุ้มกันเลย) และไม่มีมาตรการควบคุมใด ๆ วิธีที่ใช้หาค่า R_0 คือวิธีการเมทริกซ์รุ่นถัดไป (Next Generation Matrix: NGM) [16] ดังนี้

$$K = FV^{-1} \quad (19)$$

เมื่อ

$$F = \left[\frac{\partial F_i}{\partial I_j} \right]_{DFE}$$

$$= \beta \begin{bmatrix} s_1^* w_{11} & s_1^* w_{12} \\ s_2^* w_{21} & s_2^* w_{22} \end{bmatrix}; s_i^* = N_i$$

และ

$$V = \left[\frac{\partial V_i}{\partial I_i} \right]_{DFE}$$

$$= \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{bmatrix}$$

พิจารณาวิธีการเมทริกซ์ร่นถัดไป

$$K = FV^{-1}$$

$$= \frac{\beta}{\gamma} \begin{bmatrix} N_1 w_{11} & N_1 w_{12} \\ N_2 w_{21} & N_2 w_{22} \end{bmatrix}$$

หาค่าลักษณะเฉพาะจาก $\det(K - \lambda I_2) = 0$ ทำให้ได้ค่าลักษณะเฉพาะคือ

$$\lambda = \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) \pm \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right)$$

$$\text{ดังนั้น } R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right)$$

ตรวจสอบความเสถียรภาพของจุดสมดุลสภาวะไร้โรคและจุดสมดุลสภาวะระบาด โดยใช้ทฤษฎีวงกลมของเกอร์โกริน (Gershgorin circle theorem) มีความเสถียรภาพเฉพาะเมื่อค่าลักษณะเฉพาะของจาโคเบียนเมทริกซ์ที่จุดสมดุล มีส่วนจริงน้อยกว่า 0 ทั้งหมด [17]

กรณีที่ 1 จุดสมดุลสภาวะไร้โรค $E_{DFE}(S_1^*, E_1^*, I_1^*, R_1^*, S_2^*, E_2^*, I_2^*, R_2^*) = (N_1, 0, 0, 0, N_2, 0, 0, 0)$ จะได้

$$J(E_{DFE}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_1 \beta w_{12} & 0 \\ 0 & -\sigma & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 \beta w_{12} & 0 \\ 0 & \sigma & -\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -N_2 \beta w_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_2 \beta w_{21} & 0 & 0 & -\sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma & -\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma & 0 \end{bmatrix}$$

บทแทรก 1 (จากทฤษฎีวงกลมของเกอร์โกริน) ให้ A เป็นเมทริกซ์ขนาด $n \times n$ ที่มีสมาชิกเป็นจำนวนจริง ถ้าสมาชิกของเมทริกซ์ที่อยู่บนเส้นทแยง a_{ii} ของ A เป็นไปตามเงื่อนไข $a_{ii} < -r_i$ โดยที่

$$r_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}|$$

สำหรับ $i = 1, \dots, n$ แล้วค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ A จะเป็นค่าลบหรือมีส่วนจริงเป็นลบ

พิจารณาแต่ละแถวของ $J(E_{DFE})$ เพื่อสร้างวงกลมของเกอร์โกริน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3: วงกลมของเกอริโกรนที่จุดสมดุลโรโรค

แถวที่	ศูนย์กลาง	รัศมี	วงกลม
1	0	$r_1 = -\beta N_1 w_{12} $	$Re(\lambda) \leq \beta N_1 w_{12}$
2	$-\sigma$	$r_2 = \beta N_2 w_{21} $	$Re(\lambda) \leq -\sigma + \beta N_2 w_{21} $
3	$-\gamma$	$r_3 = \sigma $	$Re(\lambda) \leq -\gamma + \sigma$
4	0	$r_4 = \gamma $	$Re(\lambda) \leq \gamma$
5	0	$r_5 = -\beta N_2 w_{21} $	$Re(\lambda) \leq \beta N_2 w_{21}$
6	$-\sigma$	$r_6 = \beta N_2 w_{21} $	$Re(\lambda) \leq \beta N_2 w_{21} - \sigma$
7	$-\gamma$	$r_7 = \sigma $	$Re(\lambda) \leq -\gamma + \sigma$
8	0	$r_8 = \gamma $	$Re(\lambda) \leq \gamma$

จุดสมดุลสภาวะโรโรคมีความเสถียรภาพ วงกลมของเกอริโกรนทั้งหมดต้องอยู่ในครึ่งระนาบลบ (left-half plane) ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้จุดสมดุลสภาวะโรโรคมีความเสถียรภาพคือ

1. $\beta N_1 w_{12} < \sigma$
2. $\beta N_2 w_{21} < \sigma$
3. $\sigma + \beta N_2 w_{21} < \gamma$

เปรียบเทียบกับค่า Basic reproductive number

$$\text{จากการวิเคราะห์ } R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right)$$

ถ้า $\beta N_1 w_{12} < \sigma, \beta N_2 w_{21} < \sigma, \sigma + \beta N_2 w_{21} < \gamma, w_{12} w_{21} \leq w_{11} w_{22}, \beta(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) \leq \frac{2}{3} \gamma$ แล้ว

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right) \\ R_0 &< \frac{\beta}{\gamma} \cdot \left(N_1 w_{11} + N_2 w_{22} + \frac{N_1 w_{11} + N_2 w_{22}}{2} \right) \\ R_0 &< \frac{\beta}{\gamma} \cdot \left(\frac{3(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})}{2} \right) \\ R_0 &< 1 \end{aligned}$$

ดังนั้นผลจากวงกลมของเกอริโกรน สอดคล้องกับเงื่อนไข $R_0 < 1$ ต้องมีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ

1. $w_{12} w_{21} \leq w_{11} w_{22}$
2. $\beta(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) \leq \frac{2}{3} \gamma$

กรณีที่ 2 จุดสมดุลสภาวะการระบาดของโรค คือ $E_{EE}(S_1^*, E_1^*, I_1^*, R_1^*, S_2^*, E_2^*, I_2^*, R_2^*)$ โดยที่

$$S_1^* = \frac{\gamma N_1 I_1^*}{\beta(I_1^* + w_{12} I_2^*)}$$

$$\begin{aligned} E_1^* &= \frac{\gamma}{\sigma} I_1^* \\ R_1^* &= N_1 - S_1^* - E_1^* - I_1^* \\ S_2^* &= \frac{\gamma N_2 I_2^*}{\beta(I_2^* + w_{21} I_1^*)} \\ E_1^* &= \frac{\gamma}{\sigma} I_2^* \\ R_1^* &= N_2 - S_2^* - E_2^* - I_2^* \end{aligned}$$

จะได้

$$J(E_{EE}) = \begin{bmatrix} -\beta(I_1^* w_{11} + I_2^* w_{12}) & 0 & -\beta S_1^* w_{11} & 0 & 0 & 0 & -\beta S_1^* w_{12} & 0 \\ \beta(I_1^* w_{11} + I_2^* w_{12}) & -\sigma & \beta S_1^* w_{11} & 0 & 0 & 0 & \beta S_1^* w_{12} & 0 \\ 0 & \sigma & -\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta S_2^* w_{21} & 0 & -\beta(I_1^* w_{21} + I_2^* w_{22}) & 0 & -\beta S_2^* w_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \beta S_2^* w_{21} & 0 & \beta(I_1^* w_{21} + I_2^* w_{22}) & -\sigma & \beta S_2^* w_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma & -\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma & 0 \end{bmatrix}$$

พิจารณาแต่ละแถวของ $J(E_{EE})$ เพื่อสร้างวงกลมของเกอโรนิน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4: วงกลมของเกอโรนินที่จุดสมดุลโรคระบาด

แถวที่	ศูนย์กลาง	รัศมี	วงกลม
1	$-\beta(I_1^* w_{11} + I_2^* w_{12})$	$r_1 = -\beta S_1^* w_{11} - \beta S_1^* w_{12} $	$Re(\lambda) \leq -\beta(I_1^* w_{11} + I_2^* w_{12}) + \beta S_1^* (w_{11} + w_{12})$
2	$-\sigma$	$r_2 = \beta(I_1^* w_{11} + I_2^* w_{12}) + \beta S_1^* (w_{11} + w_{12}) $	$Re(\lambda) \leq -\sigma + \beta(I_1^* w_{11} + I_2^* w_{12}) + \beta S_1^* (w_{11} + w_{12})$
3	$-\gamma$	$r_3 = \sigma $	$Re(\lambda) \leq -\gamma + \sigma$
4	0	$r_4 = \gamma $	$Re(\lambda) \leq \gamma$
5	$-\beta(I_1^* w_{21} + I_2^* w_{22})$	$r_5 = -\beta S_2^* (w_{21} + w_{22}) $	$Re(\lambda) \leq -\beta(I_1^* w_{21} + I_2^* w_{22}) + \beta S_2^* (w_{21} + w_{22})$
6	$-\sigma$	$r_6 = \beta(I_1^* w_{21} + I_2^* w_{22}) + \beta S_2^* (w_{21} + w_{22}) $	$Re(\lambda) \leq r_6 = \beta(I_1^* w_{21} + I_2^* w_{22}) + \beta S_2^* (w_{21} + w_{22}) - \sigma$
7	$-\gamma$	$r_7 = \sigma $	$Re(\lambda) \leq -\gamma + \sigma$
8	0	$r_8 = \gamma $	$Re(\lambda) \leq \gamma$

จุดสมดุลสภาวะโรคระบาดมีความเสถียรภาพ วงกลมของเกอโรนินทั้งหมดต้องอยู่ในครึ่งระนาบลบ (left-half plane) ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้จุดสมดุลสภาวะโรคระบาดมีความเสถียรภาพคือ

1. $\beta(I_1^* + I_2^* + S_1^* + S_2^*) < \sigma$
2. $S_1^* < I_1^*$
3. $S_2^* < I_2^*$
4. $\sigma < \gamma$

เปรียบเทียบกับค่า Basic Reproductive Number

$$\text{จากการวิเคราะห์ } R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right)$$

ถ้า $\beta(I_1^* + I_2^* + S_1^* + S_2^*) < \sigma, S_1^* < I_1^*, S_2^* < I_2^*, \sigma < \gamma$ แล้ว

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right)$$

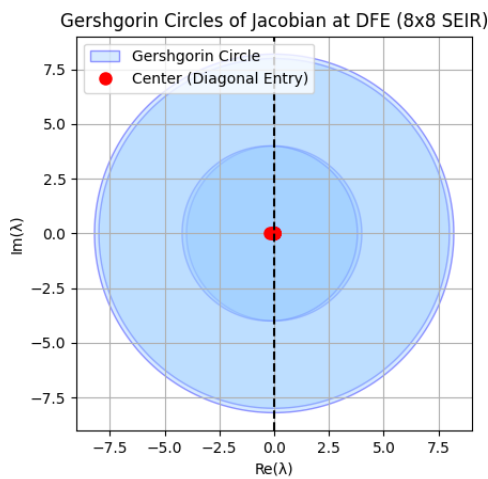
นำ $\beta(I_1^* + I_2^* + S_1^* + S_2^*) < \sigma$ แทนในสมการ

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right)$$

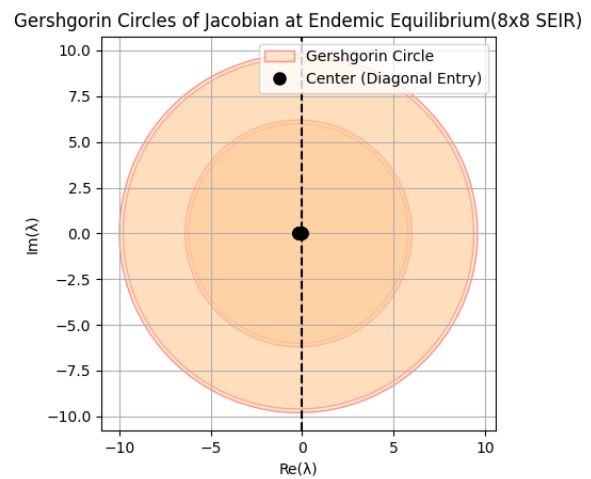
$$R_0 > 1$$

ดังนั้น ผลจากวงกลมของเกอร์โกริน สอดคล้องกับเงื่อนไข $R_0 > 1$ ต้องมีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ

$$\frac{\beta}{\gamma} > \frac{2}{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}$$



รูปที่ 2: วงกลมของเกอร์โกรินของจาโคเบียนเมทริกซ์
ที่จุดสมดุลสภาวะไร้โรค



รูปที่ 3: วงกลมของเกอร์โกรินของจาโคเบียนเมทริกซ์
ที่จุดสมดุลสภาวะโรคระบาด

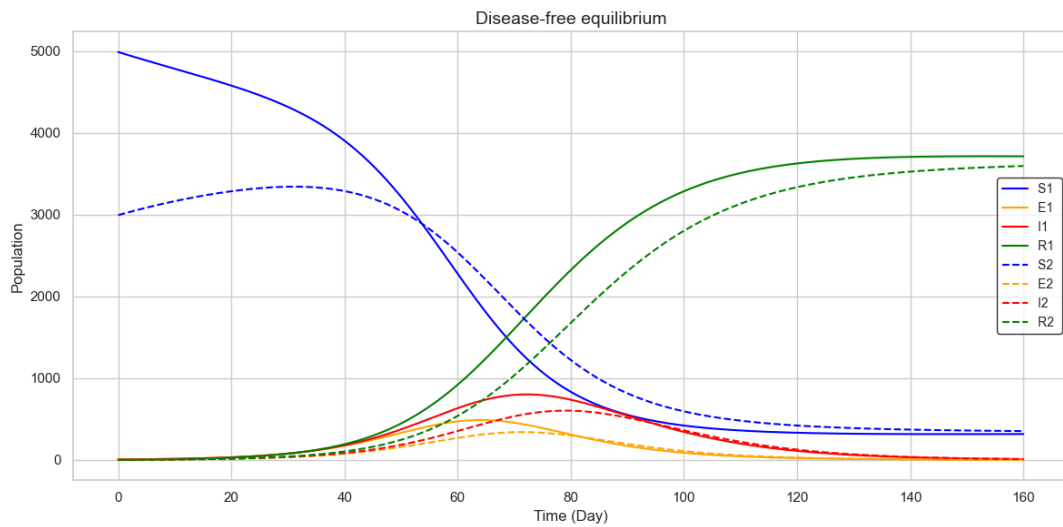
กราฟทั้งสองรูปแสดงการวิเคราะห์เชิงเสถียรภาพของระบบพลวัตในแบบจำลอง SEIR แบบสองโหนด โดยใช้ทฤษฎีวงกลมของเกอร์โกริน เพื่อประมาณขอบเขตของค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalues) ของจาโคเบียนเมทริกซ์ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญในการประเมินเสถียรภาพของจุดสมดุลในแบบจำลองคณิตศาสตร์

รูปที่ 2 แสดงวงกลมเกอร์โกรินของจาโคเบียนเมทริกซ์ ณ จุดสมดุลสภาวะไร้โรค (E_{DFE}) โดยมีจุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ที่จุดกำเนิด (0,0) บนระนาบเชิงซ้อน และมีจุดสีแดงแสดงตำแหน่งของค่าลักษณะเฉพาะจริงของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสภาวะไร้โรค การที่วงกลมทั้งหมดอยู่ในบริเวณที่ส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะเป็นลบบนระนาบเชิงซ้อน ($Re(\lambda) \leq 0$) บ่งชี้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความเสถียรภาพ

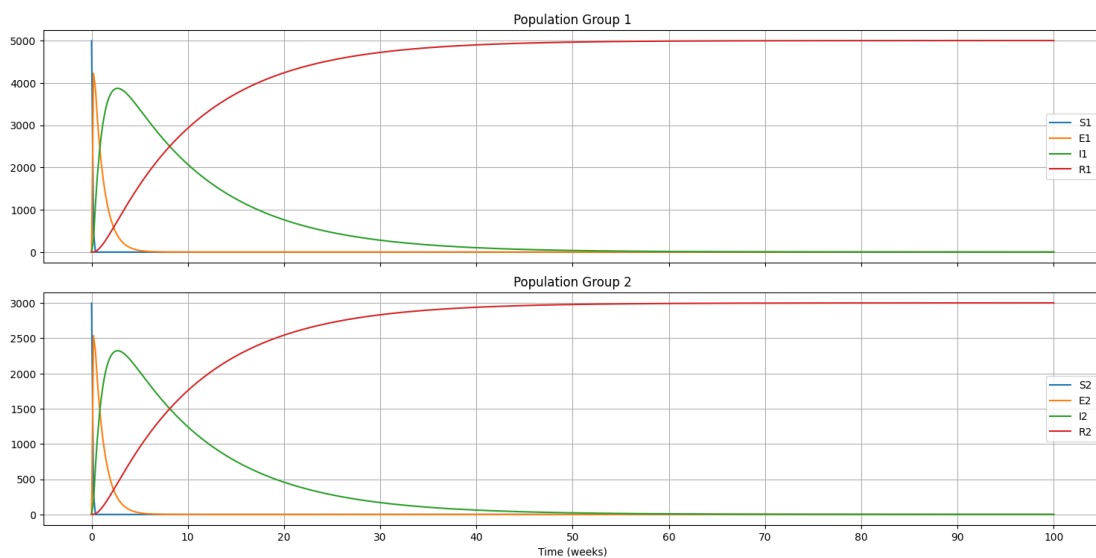
รูปที่ 3 แสดงวงกลมเกอร์โกริน ณ จุดสมดุลสภาวะระบาด (E_{EE}) โดยมีจุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ที่ใกล้จุดกำเนิด และมีจุดสีแดงแสดงค่าบนแนวทแยงของจาโคเบียนเมทริกซ์ในสภาวะระบาด หากวงกลมทั้งหมดอยู่ในบริเวณที่ส่วนจริงของค่าลักษณะเฉพาะเป็นลบเช่นกัน จะบ่งชี้ว่าระบบมีความเสถียรภาพในสภาวะระบาด

3. การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2 ได้ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4: พลวัตของระบบ SEIR สองประชากรภายใต้จุดสมดุลสภาวะไร้โรค โดยที่ $R_0 = 0.15 < 1$ ส่งผลให้ $E_{DFE}(S_1^*, E_1^*, I_1^*, R_1^*, S_2^*, E_2^*, I_2^*, R_2^*) = (N_1, 0, 0, 0, N_2, 0, 0, 0)$ จากเงื่อนไขเริ่มต้น $(S_1[0], E_1[0], I_1[0], R_1[0], S_2[0], E_2[0], I_2[0], R_2[0]) = (4990, 5, 5, 0, 2995, 3, 2, 0)$ สอดคล้องกับนิยามของจุดสมดุลสภาวะไร้โรค



รูปที่ 5: พลวัตของระบบ SEIR สองประชากรภายใต้จุดสมดุลสภาวะระบาด โดยที่ $R_0 = 2.00 > 1$ ส่งผลให้จุดสมดุล $E_{EE}(S_1^*, S_2^*, E_1^*, E_2^*, I_1^*, I_2^*, R_1^*, R_2^*) = (0.50, 0.50, 0.249, 0.249, 0.31, 0.18, 4999.69, 2999.82)$ จากเงื่อนไขเริ่มต้น $(S_1[0], E_1[0], I_1[0], R_1[0], S_2[0], E_2[0], I_2[0], R_2[0]) = (4990, 5, 5, 0, 2995, 3, 2, 0)$

จากรูปที่ 4 และ 5 จุดสมดุลสภาวะไร้โรค มีสัณฐานพื้นฐาน $R_0 = 0.15 < 1$ ซึ่งหมายความว่า การแพร่ระบาดไม่สามารถดำรงอยู่ได้ในระยะยาว ภายใต้เงื่อนไขนี้ ระบบจะเข้าสู่สถานะที่ไม่มีโรคติดเชื้อมาก่อน โดยกลุ่มประชากรที่เกี่ยวข้องกับการติดเชื้อมาได้แก่ พืชที่ได้รับเชื้อแต่ยังไม่แสดงอาการ (E), พืชที่ติดเชื้อมาแล้วสามารถแพร่เชื้อได้ (I), และพืชที่ฟื้นตัวหรือถูกกำจัด (R) จะลดลงสู่ศูนย์ ขณะที่กลุ่มที่พืชที่ยังไม่ติดเชื้อมา (S) จะคงอยู่ในระดับสูงเท่ากับจำนวนพืชทั้งหมดในระบบ $S_i^* = N_i$ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับนิยามของจุดสมดุลไร้

โรค และสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมโรค ในทางกลับกัน กรณีของจุดสมดุลสภาวะระบาด มีสปีพันธุ์พื้นฐาน $R_0 = 2.00 > 1$ ซึ่งสะท้อนถึงสถานการณ์ที่การแพร่ระบาดสามารถดำรงอยู่ได้อย่างต่อเนื่อง ระบบจะเข้าสู่จุดสมดุลที่มีจำนวนพืชติดเชื้อมากขึ้นในระยะยาว โดยกลุ่มที่ติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ I มีค่ามากกว่าศูนย์อย่างชัดเจน ขณะที่ S , E และ R มีค่าคงที่ในระดับต่ำกว่าจำนวนพืชทั้งหมด ผลลัพธ์นี้แสดงถึงการคงอยู่ของโรคในระบบ และเน้นถึงความจำเป็นในการดำเนินมาตรการควบคุมอย่างต่อเนื่อง

4. การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหว เป็นกระบวนการที่ใช้ในการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อค่าพื้นฐานการสปีพันธุ์ (R_0) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการวิเคราะห์ศักยภาพการแพร่ระบาดของโรคในแบบจำลอง SEIR แบบเครือข่าย ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ดัชนีความอ่อนไหวแบบ Forward Normalized Sensitivity Index เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของ R_0 เมื่อพารามิเตอร์หนึ่งเปลี่ยนแปลง โดยนิยามดังนี้ [5]

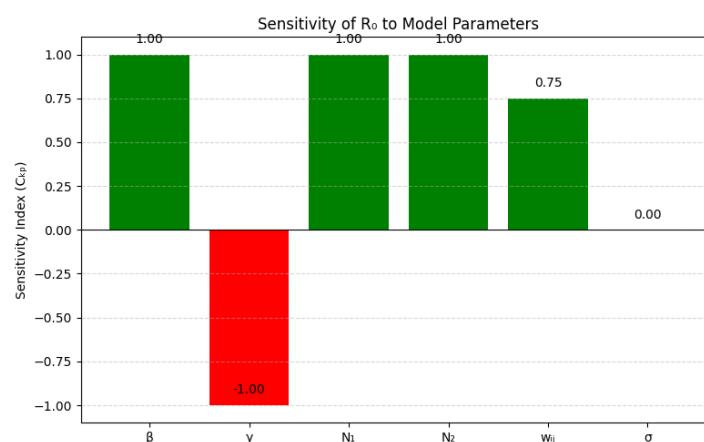
$$C_p^{R_0} = \frac{\partial R_0}{\partial p} \cdot \frac{p}{R_0}$$

โดยที่ p แทนพารามิเตอร์ของการแพร่ระบาดของโรค และ $C_p^{R_0}$ แทนดัชนีความอ่อนไหวของ R_0 ต่อ p

จาก $R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \left(\frac{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22}) + \sqrt{(N_1 w_{11} + N_2 w_{22})^2 - 4(N_1 w_{11} N_2 w_{22} - N_1 w_{12} N_2 w_{21})}}{2} \right)$ คำนวณดัชนีความอ่อนไหวของ R_0 ต่อ p

ตารางที่ 5: ดัชนีความอ่อนไหวของ R_0 ต่อ p ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พารามิเตอร์(p)	ดัชนีความอ่อนไหว($C_p^{R_0}$)
β	+1
γ	-1
N_1	+1
N_2	+1
w_{ij}	+0.5 ถึง +1
σ	0



รูปที่ 6: แผนภูมิแท่งแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของ R_0 ต่อพารามิเตอร์หลักในแบบจำลอง SEIR เครือข่าย ได้แก่ β , γ , N_1 , N_2 , w_{12} , และ w_{21} โดยพบว่า β , N_1 , N_2 มีค่าความอ่อนไหวสูงสุด (+1.0) ขณะที่ γ มีผลในทางลบเท่ากัน (-1.0) ส่วนพารามิเตอร์เชิง w_{ij} มีค่าความอ่อนไหวอยู่ที่ประมาณ +0.75 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลเชิงสัมพัทธ์ของแต่ละพารามิเตอร์ต่อการแพร่ระบาดของโรคในระบบเครือข่ายเกษตรกรรม

จากการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของค่าดัชนีการแพร่ระบาดพื้นฐาน (R_0) ต่อพารามิเตอร์ในแบบจำลอง SEIR เครือข่าย พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุดคืออัตราการติดเชื้อและจำนวนพืชในแต่ละพื้นที่ (β, N_1, N_2) และอัตราการฟื้นตัว (γ) โดยค่าความอ่อนไหวของ R_0 ต่อ β, N_1, N_2 เท่ากับ +1.0000 หมายความว่า หาก β, N_1, N_2 เพิ่มขึ้น 1% ค่า R_0 จะเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ในทางกลับกัน ค่าความอ่อนไหวต่อ γ เท่ากับ -1.0000 ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการฟื้นตัวจะช่วยลดค่า R_0 ในอัตราเดียวกัน ดังนั้น การควบคุมการแพร่เชื้อและการเร่งการฟื้นตัวของพืชจึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดการระบาดของโรค

โดยสรุป การควบคุมโรคพืชอย่างมีประสิทธิภาพควรเน้นไปที่การลดอัตราการติดเชื้อและการเพิ่มอัตราการฟื้นตัวของพืชเป็นหลัก ขณะที่การจัดการเชิงพื้นที่ เช่น การควบคุมจำนวนพืชและการจำกัดการเคลื่อนย้ายระหว่างพื้นที่ ควรดำเนินควบคู่กันเพื่อเสริมสร้างความยั่งยืนในการควบคุมการแพร่ระบาดของโรคในระบบเกษตรกรรมเครือข่าย

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในการศึกษานี้ ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภท SEIR บนโครงสร้างเครือข่าย เพื่อใช้วิเคราะห์การแพร่ระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลังในระบบเกษตรกรรมที่มีการเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ปลูกหลายแห่ง แบบจำลองแบ่งประชากรพืชออกเป็นสี่กลุ่ม ได้แก่ พืชที่ยังไม่ติดเชื้อ (S), พืชที่ได้รับเชื้อแต่ยังไม่แสดงอาการ (E), พืชที่ติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ (I), และพืชที่ฟื้นตัวหรือถูกกำจัด (R) โดยแต่ละพื้นที่มีพลวัตของโรคเป็นของตนเอง และมีการเชื่อมโยงกันผ่านพารามิเตอร์ที่สะท้อนการเคลื่อนย้ายพืชหรือแมลงพาหะระหว่างพื้นที่ เช่น อัตราการเคลื่อนย้ายระหว่างพื้นที่ปลูก

แนวทางการสร้างแบบจำลองนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากงานของ Keeling and Rohani [18] ซึ่งเสนอการใช้โครงสร้างเครือข่ายในการศึกษาการแพร่ระบาดในระบบที่มีความซับซ้อน โดยเฉพาะในบริบทที่มีการเชื่อมโยงระหว่างหน่วยย่อยหลายแห่ง การคำนวณค่าดัชนีการแพร่ระบาดพื้นฐาน (R_0) ใช้แนวคิดของเมทริกซ์รุ่นถัดไป ตามแนวทางของ van den Driessche และ Watmough [16] ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความสามารถในการแพร่ระบาดของโรคในระบบเครือข่ายได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำ

จากการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของ R_0 ต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยอิงจากวิธีการของ Chitnis et al. [19] พบว่าอัตราการติดเชื้อ (β) และอัตราการฟื้นตัว (γ) เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ R_0 มากที่สุด โดยมีค่าความอ่อนไหวเท่ากับ +1.0 และ -1.0 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า หากอัตราการติดเชื้อเพิ่มขึ้น 1% ค่า R_0 จะเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราการฟื้นตัวจะช่วยลดค่า R_0 ในอัตราเดียวกัน

นอกจากนี้ พารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น จำนวนพืชในแต่ละพื้นที่ (N_1, N_2) และการเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ (w_{12}, w_{21}) มีค่าความอ่อนไหวอยู่ที่ประมาณ +0.5 ซึ่งแสดงว่ามีผลต่อการแพร่ระบาดในระดับปานกลาง โดยเฉพาะในบริบทที่มีการเคลื่อนย้ายพืชระหว่างพื้นที่อย่างต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับข้อเสนอของ Sélley et al. [20] ที่ชี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนย้ายในเครือข่ายสามารถเร่งการแพร่ระบาดได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถเสนอแนวทางการควบคุมโรคได้อย่างเป็นระบบ โดยเน้นการลดอัตราการติดเชื้อผ่านการควบคุมแมลงพาหะ การใช้พันธุ์พืชที่ต้านทานโรค และการจัดการแปลงปลูกให้เหมาะสม รวมถึงการเพิ่มอัตราการฟื้นตัวของพืช เช่น การกำจัดพืชที่ติดเชื้ออย่างรวดเร็ว หรือการใช้สารกระตุ้นภูมิคุ้มกัน นอกจากนี้ การวางแผนการปลูกและการเคลื่อนย้ายพืชอย่างรอบคอบจะช่วยลดความเสี่ยงในการแพร่ระบาดข้ามพื้นที่ และการนำแบบจำลองไปใช้ร่วมกับข้อมูลภาคสนามจะช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผล

การศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโครงสร้างเครือข่าย เพื่อใช้วิเคราะห์การแพร่ระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลังในระบบเกษตรกรรมที่มีการเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ปลูกหลายแห่ง โดยแบบจำลองสามารถจำแนกประชากรพืชออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ตามสถานะของโรค และสะท้อนพลวัตของการแพร่ระบาดในแต่ละพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ

การคำนวณค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน (R_0) ด้วยแนวคิดของเมทริกซ์รุ่นถัดไป ทำให้สามารถประเมินความสามารถในการแพร่ระบาดของโรคในระบบเครือข่ายได้อย่างเป็นระบบ ขณะเดียวกันการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของ R_0 ต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ช่วยให้สามารถระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการแพร่ระบาดได้อย่างชัดเจน โดยพบว่าอัตราการติดเชื้อและอัตราการฟื้นตัวของพืชเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบสูงสุด

นอกจากนี้ ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนย้ายพืชหรือแมลงพาหะระหว่างพื้นที่ที่มีบทบาทสำคัญในการเร่งการแพร่ระบาด โดยเฉพาะในระบบที่มีการเชื่อมโยงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการแพร่ระบาดบนเครือข่ายที่ปรากฏในงานวิจัยก่อนหน้านี้

จากผลการศึกษา สามารถเสนอแนวทางเชิงนโยบายเพื่อการควบคุมโรคที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน ได้แก่

1. การจัดการแปลงปลูกอย่างเหมาะสม เช่น การเว้นระยะปลูก การกำจัดเศษซากพืช และการควบคุมการเคลื่อนย้ายต้นพันธุ์
2. การส่งเสริมการใช้พันธุ์ต้านทานและการบำรุงรักษาที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มอัตราการฟื้นตัวของพืช
3. การกำหนดมาตรการควบคุมการเคลื่อนย้ายพืชและแมลงพาหะในระดับพื้นที่และระดับนโยบาย

4. การบูรณาการข้อมูลภาคสนามเข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายอย่างมีหลักฐานรองรับ

ผลลัพธ์จากแบบจำลองนี้จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือเชิงวิชาการในการออกแบบมาตรการควบคุมโรคใบด่างมันสำปะหลัง ทั้งในระดับพื้นที่และระดับประเทศ เพื่อสร้างความมั่นคงทางการเกษตรอย่างยั่งยืน

REFERENCES

- [1] S. Chaowongdee, S. Malichan, P. Pongpamorn, A. Peamane, and W. Siriwan, "Metabolic profiles of Sri Lankan cassava mosaic virus-infected and healthy cassava (*Manihot esculenta* Crantz) cultivars with tolerance and susceptibility phenotypes," *BMC Plant Biol.*, vol. 23, 2023, Art. no. 178, doi: 10.1186/s12870-023-04181-3.
- [2] P. J. De Barro, S. S. Liu, L. M. Boykin, and A. B. Dinsdale, "Bemisia tabaci: A statement of species status," *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 56, pp. 1–19, 2011, doi: 10.1146/annurev-ento-112408-085504.
- [3] C. Rakkrai, T. Chomdate, W. Khampanich, P. Paechaisri, D. Chaironkaew, and P. Maneechote, "Evaluation of disease resistance of cassava lines introduced from Nigeria to Sri Lankan Cassava Mosaic virus, the causal agent of cassava mosaic disease, under greenhouse conditions," (in Thai), *Thai Agric. Res. J.*, vol. 40, no. 3, pp. 226–237, 2022.
- [4] N. H. Shah and J. Gupta, "SEIR model and simulation for vector borne diseases," *Appl. Math.*, vol. 4, no. 8A, pp. 13–17, 2013, doi: 10.4236/am.2013.48A003.
- [5] G. R. Phajjoo and D. B. Gurung, "Sensitivity analysis of SEIR-SEI model of dengue disease," 2025, *arXiv:2501.17196*.
- [6] Y. Takeguchi and K. Yagasaki, "Optimal control of the SEIR epidemic model using a dynamical systems approach," *Jpn. J. Ind. Appl. Math.*, vol. 41, pp. 297–316, 2024, doi: 10.1007/s13160-023-00605-7.
- [7] F. Minhós, A. Raza, U. Shafique, and M. Mohsin, "Modeling, analysis, and transmission dynamics of cassava mosaic disease through stochastic fractional delay differential equations," *Mathematics*, vol. 13, no. 3, 2025, Art. no. 383, doi: 10.3390/math13030383.
- [8] S. Reja, F. Al Basir, and K. Aldawsari, "A discrete-time mathematical model for mosaic disease dynamics in cassava: Neimark–Sacker bifurcation and sensitivity analysis," *AIMS Math.*, vol. 10, no. 8, pp. 18295–18320, 2025, doi: 10.3934/math.2025817.
- [9] T. Kinene, L. S. Luboobi, B. Nannyonga, and G. G. A. Mwanga, "A mathematical model for the dynamics and cost effectiveness of the current controls of cassava brown streak disease in Uganda," *J. Math. Comput. Sci.*, vol. 5, pp. 567–600, 2015.
- [10] J. P. Legg et al., "Comparing the regional epidemiology of the cassava mosaic and cassava brown streak virus pandemics in Africa," *Virus Res.*, vol. 159, no. 2, pp. 161–170, 2011, doi: 10.1016/j.virusres.2011.04.018.
- [11] P. Sseruwagi, W. S. Sserubombwe, J. P. Legg, J. Ndunguru, and J. M. Thresh, "Methods of surveying the incidence and severity of cassava mosaic disease and whitefly vector populations on cassava in Africa: A review," *Virus Res.*, vol. 100, no. 1, pp. 129–142, 2004, doi: 10.1016/j.virusres.2003.12.021.



- [12] J. P. Legg, B. Owor, P. Sseruwagi, and J. Ndunguru, "Cassava mosaic virus disease in East and Central Africa: Epidemiology and management of a regional pandemic," *Adv. Virus Res.*, vol. 67, pp. 355–418, 2006, doi: 10.1016/S0065-3527(06)67010-3.
- [13] J. P. Legg and J. M. Thresh, "Cassava virus diseases in Africa," *African Crop Sci. J.*, vol. 9, no. 3, pp. 471–500, 2001, doi: 10.4314/acsj.v9i3.27762
- [14] D. Fargette, M. J. Jeger, C. Fauquet, and L. D. C. Fishpool, "Analysis of temporal disease progress of African cassava mosaic virus," *Phytopathology*, vol. 84, no. 1, pp. 89–91, 1994, doi: 10.1094/Phyto-84-89.
- [15] Y. N. Xiao and F. van den Bosch, "The dynamics of an eco-epidemic model with biological control," *Ecol. Model.*, vol. 168, no. 2–3, pp. 203–214, 2003, doi: 10.1016/S0304-3800(03)00156-2.
- [16] P. van den Driessche and J. Watmough, "Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission," *Math. Biosci.*, vol. 180, no. 1–2, pp. 29–48, 2002, doi: 10.1016/S0025-5564(02)00108-6.
- [17] S. Brakken-Thal, "Gershgorin's theorem for estimating eigenvalues," 2007. [Online]. Available: <https://linear.ups.edu/buzzard.ups.edu/courses/2007spring/projects/brakkenthal-paper.pdf>
- [18] M. J. Keeling and P. Rohani, *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2008.
- [19] N. Chitnis, J. M. Hyman, and J. M. Cushing, "Determining important parameters in the spread of malaria through the sensitivity analysis of a mathematical model," *Bull. Math. Biol.*, vol. 70, no. 5, pp. 1272–1296, 2008, doi: 10.1007/s11538-008-9299-0.
- [20] F. Sélley, Á. Besenyei, I. Z. Kiss, and P. L. Simon, "Dynamic control of modern epidemics: A network-based approach," *Sci. Rep.*, vol. 5, 2015, Art. no. 11745, doi: 10.1038/srep11745.

อิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์¹ ไพฑูรย์ นาแซง² ชัยชาญ ยวนะศิริ^{3*}

^{1,2,3*}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ขอนแก่น, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: chaichan.yu@neu.ac.th

รับต้นฉบับ: 30 พฤศจิกายน 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 28 มีนาคม 2569; ตอบรับบทความ: 1 เมษายน 2569

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานสูง อย่างไรก็ตาม การบ่มด้วยความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเร่งกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยในอุณหภูมิแวดล้อมทั่วไป โดยใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงและเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุตั้งต้นหลักในอัตราส่วน 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เท่ากับ 1.0 โดยน้ำหนัก ทดสอบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการไหลและระยะเวลาการก่อตัวลดลงเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน 75:25 โดยน้ำหนัก แสดงค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 44.3 เมกะปาสคาล การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเผยให้เห็นว่าแคลเซียมที่ละลายออกมาจากเปลือกหอยทำปฏิกิริยากับซิลิเกตและอะลูมิเนตเกิดเป็นแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตร่วมกับเจลจีโอพอลิเมอร์หลักส่งผลโครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้นและความแข็งแรงต่อแรงอัดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียดมีศักยภาพสูงในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ: กำลังอัด เถ้าลอย จีโอพอลิเมอร์เพสต์ เปลือกหอยนางรมบดละเอียด โครงสร้างจุลภาค

Influence of Ground Oyster Shell on Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Paste

Worawit Projan¹ Phaithun Nasaeng² Chaichan Yuwanasiri^{3*}

^{1,2,3*}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University, Khon Kaen, Thailand

*Corresponding author e-mail: chaichan.yu@neu.ac.th

Received: 30 November 2025; Revised: 28 March 2026; Accepted: 1 April 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

Geopolymer paste is one type of environmentally friendly binder material with outstanding mechanical properties and high durability. However, heat curing is necessary to accelerate the geopolymerization. This research aimed to study the influence of ground oyster shells on the properties of fly ash geopolymer paste at a normal ambient temperature. High-calcium fly ash and ground oyster shells were used as the main raw materials in the ratios of 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100 by weight. The liquid-to-powder material ratio at 0.6 and the sodium silicate to 10 M sodium hydroxide ratio at 1.0 by weight were used. Geopolymer paste properties were tested, including flow value, setting time, compressive strength, and microstructure analysis. The experimental results found that the flow rate and setting time of the geopolymer paste decreased when the quantity of ground oyster shells increased. The 75:25 mixture of fly ash and ground oyster shells achieved the maximum compressive strength of 44.3 MPa at 28 days. Microstructural analysis revealed that calcium leached from the shell reacted with silicates and aluminates to form C-A-S-H alongside the main geopolymer gel, resulting in a denser microstructure and enhanced compressive strength. It was shown that geopolymer paste from fly ash mixed with ground oyster shells has high potential for producing environmentally friendly construction materials, with good compressive strength development under room temperature curing.

Keywords: Compressive strength, Fly ash, Geopolymer paste, Ground oyster shells, Microstructure

บทนำ

ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ถือเป็นวัสดุประสานหลักที่จำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างหลักส่วนใหญ่ล้วนเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานความร้อนสูงในกระบวนการเผาเม็ดปูนซึ่งไม่เพียงแต่ใช้เชื้อเพลิงจำนวนมาก แต่ปฏิกิริยาเคมีของการสลายตัวของหินปูนยังปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาโดยตรง ส่งผลให้อุตสาหกรรมซีเมนต์ถูกจัดเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญ โดยคาดว่าคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 7 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาทั้งหมดของโลก [1] ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่เร่งให้เกิดภาวะโลกร้อน

เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติคล้ายกับซีเมนต์เพสต์แต่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสังเคราะห์เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์จะได้มาจากการใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกตผสมกับสารละลายต่าง โดยเถ้าลอยถูกชะล้างด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตต่างสังเคราะห์ หลังจากนั้นจะเกิดส่วนผสมที่ซับซ้อนของซิลิเกตอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมซิลิเกต ในกระบวนการแข็งตัวเจลที่อุณหภูมิสูงจะจัดเรียงโครงสร้างใหม่และเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่เสถียร ซึ่งเชื่อมต่อกันเป็นสายอะลูมิเนียมซิลิเกตสามมิติที่ซับซ้อน [2] ในกรณีที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง แคลเซียมที่ละลายออกมาจะมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาร่วม โดยนอกจากจะเกิดเจลโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกต (N-A-S-H gel) แล้ว ยังเกิดการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) หรือแคลเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H gel) แทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นร่วมกันนี้จะช่วยส่งเสริมให้วัสดุมีการก่อตัวที่รวดเร็วและมีกำลังอัดสูงขึ้น [3] อย่างไรก็ตามการผลิตจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังอัดสูงในช่วงต้นจำเป็นต้องกระตุ้นปฏิกิริยาเพื่อเร่งการควบแน่นของจีโอพอลิเมอร์เจลที่อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส (°C) และใช้เวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง [4] การเติมวัสดุที่มีแคลเซียมสูงในระบบจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถส่งผลต่อพฤติกรรมของการก่อตัวและสมบัติเชิงกลได้ โดยไอออน Ca^{2+} ที่ละลายออกมาอาจเร่งกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและส่งเสริมการเกิดเจลชนิด C-S-H และ C-A-S-H ร่วมกับ N-A-S-H ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้นและกำลังอัดเพิ่มขึ้น [5] ในการศึกษาของ Nath and Sarker [6] ได้ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 40 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักสามารถผลิตจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังอัดสูงกว่า 40 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Pangdaeng et al. [7] ที่พบว่าการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยสามารถเร่งการก่อตัวและปรับปรุงกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้เป็นอย่างดี

ขยะประเภทเปลือกหอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งอีกชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากเปลือกหอยที่ผ่านการเผาเพื่อกำจัดอินทรีย์สารและบดจนเป็นผงละเอียดพบว่ามีความเข้มข้นแคลเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อใช้ร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในสัดส่วนร้อยละ 5 ต่อ 95 สามารถผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังอัดได้มากกว่า 35 เมกะปาสคาล [8] จากผลการศึกษาของ Djobo et al. [9] พบว่าการใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในการผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าภูเขาไฟช่วยเร่งการก่อตัวของเพสต์ภายใต้อุณหภูมิห้องได้เป็นอย่างดี การแทนที่เถ้าภูเขาไฟด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในสัดส่วนร้อยละ 10 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าตัวอย่างควบคุมที่อายุทดสอบ 28 วัน อย่างไรก็ตาม หากเปลือกหอยนางรมบดละเอียดทำหน้าที่เพียงวัสดุเติมเต็มอาจทำให้ส่วนที่ทำหน้าที่สารเชื่อมประสานลดลง ด้วยเหตุนี้ การทำความเข้าใจบทบาทของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบวิธีวิจัยในงานนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอย่างเป็นระบบถึงอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนเถ้าลอยต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ โดยได้ออกแบบอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อเปลือกหอยนางรมบดละเอียดไว้ 5 ระดับ ได้แก่ อัตราส่วน 100:0 (ส่วนผสมควบคุม) 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 การศึกษาจะครอบคลุมการประเมินสมบัติทั้งในสภาวะที่ยังไม่แข็งตัว ได้แก่ ความสามารถในการไหลและเวลาการก่อตัว กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ตลอดจนการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเฟสเพื่อทำความเข้าใจกลไกและบทบาทของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย

ระเบียบวิธีวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

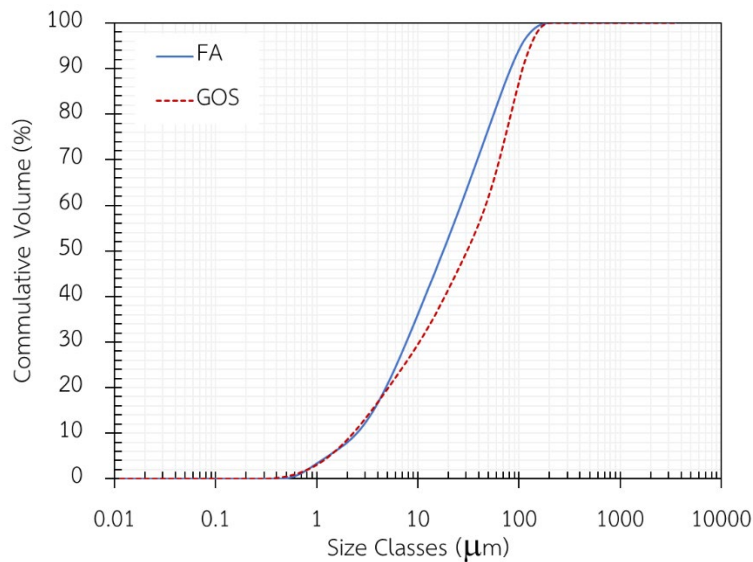
ในงานวิจัยนี้ ใช้เถ้าลอย (FA) และเปลือกหอยนางรมบดละเอียด (GOS) เป็นวัสดุผงอะลูมิโนซิลิเกต เถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง เปลือกหอยนางรมเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมประมงในพื้นที่จังหวัดชลบุรี นำมาล้างทำความสะอาดและเผาในเตาไฟฟ้าเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 30 นาที เศษวัสดุที่เหลือจากการเผาถูกนำมาบดให้เป็นผงโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอลเหล็กจนมีขนาดผ่านตะแกรงเหล็กขนาดช่องเปิด 0.11 มิลลิเมตร ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและเปลือกหอยนางรมบดละเอียด พบว่าเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะจัดเป็นเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [10] เนื่องจากมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 55.40 และมีปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1: องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผงอะลูมิโนซิลิเกต

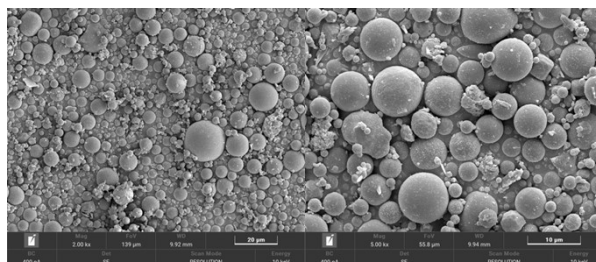
คุณสมบัติ	FA	GOS
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	27.50	9.00
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	25.50	85.50
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	14.30	0.90
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	13.60	0.80
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	6.33	0.80
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.47	1.40
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	2.04	0.60
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.85	0.30
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.33	0.10
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5)	0.32	0.10
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.72
ร้อยละค่าตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	25.00	24.70
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	2,719	5,293
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	20.17	30.40

สำหรับเปลือกหอยนางรมบดละเอียด พบว่ามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งตรวจพบในปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 โดยการกระจายตัวของอนุภาค ภาพถ่ายขยายกำลังสูง และรูปแบบวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแสดงดังรูปที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ จากภาพถ่ายขยายกำลังสูงพบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบดังรูปที่ 2(a) ในขณะที่เปลือกหอยนางรมบดละเอียดมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเป็นเหลี่ยมเป็นมุมเนื่องจากถูกบดให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าลอย เมื่อพิจารณารูปแบบโครงสร้างผลึกของเถ้าลอยพบว่า ลักษณะที่เด่นชัดที่สุดปรากฏแถบโค้งนูนกว้างในช่วงมุม 2θ ประมาณ 20 ถึง 35 องศา ($^\circ$) บ่งชี้ว่าเถ้าลอยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก้วอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน สำหรับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดปรากฏฟีกที่แหลมคมของแคลไซต์ (calcite) จำนวนมากซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างที่เป็นผลึกสูง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นฟีกของควอตซ์ (quartz) ซึ่งอาจมาจากการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติของหอยนางรม การควบคุมความละเอียดของวัสดุผงตั้งต้นในงานวิจัยนี้ได้บดเปลือกหอยนางรมให้มีความละเอียดคล้ายคลึงกับเถ้าลอยโดยใช้ร้อยละค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เป็นค่าอ้างอิงเพื่อลดผลของการอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาผลทดสอบความละเอียดของวัสดุโดยวิธีซีเอ็มผ่านของอากาศพบว่า เปลือกหอยนางรมบดละเอียดมีพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยสูงกว่าเถ้าลอยแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเปลือกหอยนางรมบดละเอียดอาจมีรูพรุนสูง ซึ่งอาจเกิด

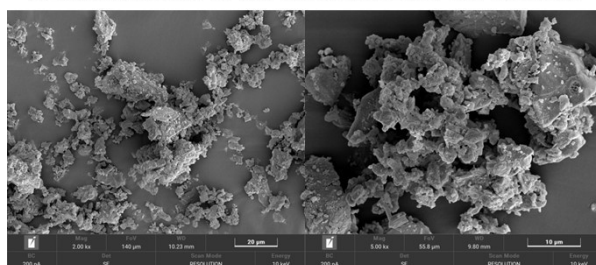
จากการจับตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2(b) สารละลายแอลคาไลใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เตรียมจากเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผสมกับน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 10 โมลาร์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เกรดเชิงพาณิชย์ประกอบด้วยซิลิคอนออกไซด์ร้อยละ 30.24 โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 21.53 และน้ำร้อยละ 57.23 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 1: ภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผงอะลูมิเนียมซิลิเกต

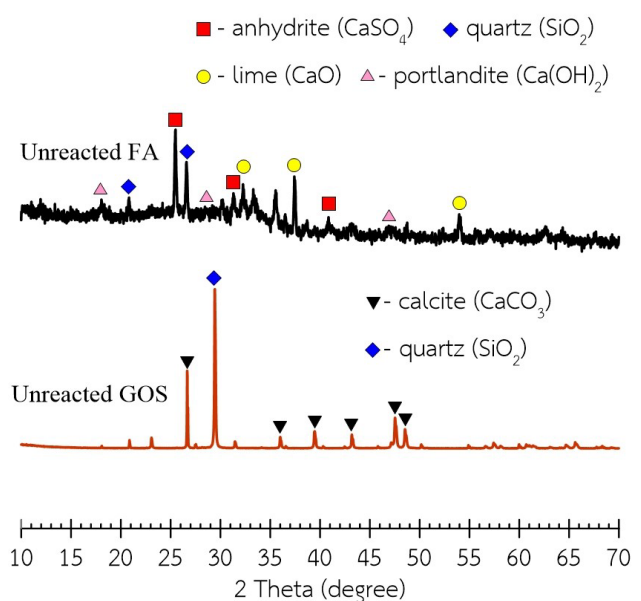


(a) ภาพถ่าย FESEM ของ FA ที่กำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่า



(b) ภาพถ่าย FESEM ของ GOS ที่กำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่า

รูปที่ 2: ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกต



รูปที่ 3: รูปแบบ XRD ของวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกต

2. การออกแบบส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อความสามารถในการไหล ระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เฟสส โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นหลัก จากนั้นผสมเถ้าลอยร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก รวมทั้งหมด 5 สัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.00 อัตราส่วนของสารละลายแอลคาไลต่อวัสดุสารตั้งต้นเท่ากับ 0.60 ในทุกอัตราส่วน และทำการบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

ตารางที่ 2: ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์เฟสที่ใช้ละลายผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

อัตราส่วน FA:GOS	วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง (กรัม)				อัตราส่วนโมล	
	FA	GOS	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Si:Al	Ca:Si
100:0	100	-	30	30	4.34	0.75
75:25	75	25	30	30	4.95	1.36
50:50	50	50	30	30	6.10	2.18
25:75	25	75	30	30	9.06	3.33
0:100	-	100	30	30	34.07	5.07

3. การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เฟส

การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เฟสจะนำเกล็ดและเปลือกหอยนางรมเผาบดละเอียดตามสัดส่วนที่กำหนดลงในภาชนะแบบปิดแล้วทำการเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที นำวัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมไว้เทลงในเครื่องผสมขนาด 5 ลิตรแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสมทำการผสมต่ออีก 5 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำจีโอพอลิเมอร์เฟสที่ได้เทลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ 5×5×5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20b [11] ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วห่อด้วยพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้น เมื่อครบระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบแล้วห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกและบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

4. วิธีการทดสอบ

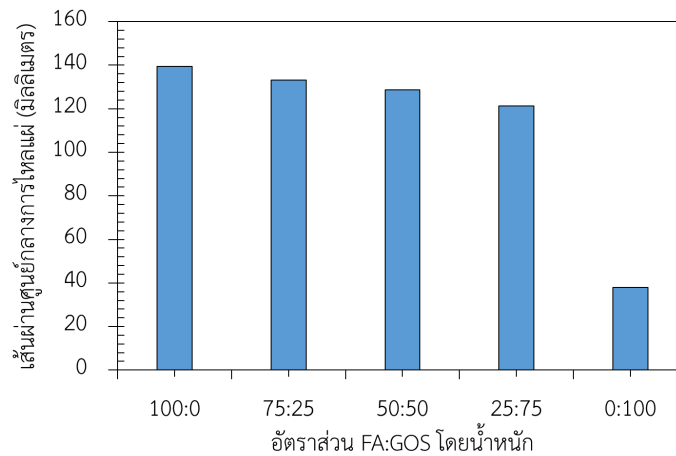
ทดสอบความสามารถในการไหลโดยใช้อุปกรณ์การไหลแผ่นขนาดเล็กและทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟส [12] ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเฟสโดยเพิ่มไคเคตตามมาตรฐาน ASTM C191-19 [13] ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ด้วยเครื่องทดสอบเบรกประสมงค์ การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เฟส ได้แก่ การวิเคราะห์หาเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) รุ่น D8 ADVANCE บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสถานะของธาตุด้วยเครื่อง Fourier-Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy รุ่น Nicolet iS50 บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานและวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM/EDS) รุ่น Tescan Mira 4 ในการทดสอบใช้เศษชิ้นส่วนตัวอย่างเฟสที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ความสามารถในการไหล

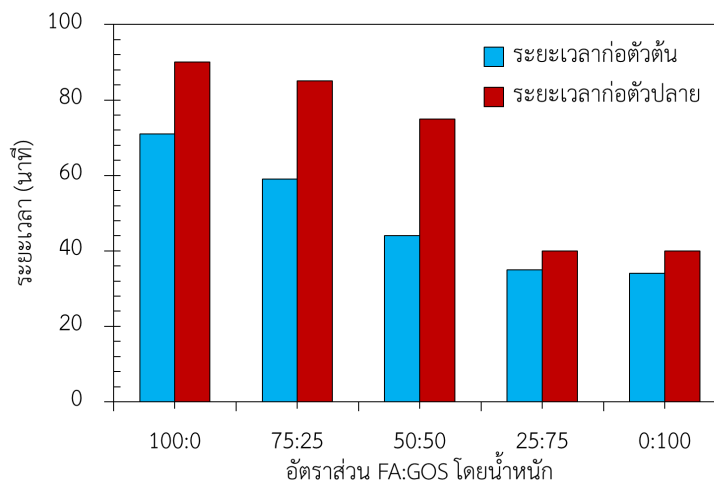
จากผลการทดสอบในรูปที่ 4 พบว่า ค่าการไหลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 139.4 มิลลิเมตร การแทนที่เกล็ดด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดร้อยละ 25 50 และ 75 โดยน้ำหนัก ค่าการไหลเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์เฟสลดลงร้อยละ 4.4, 7.7 และ 13.0 ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นเหลี่ยมเป็นมุมดังรูปที่ 2(b) ทำให้ความถี่ไหลลดลงตรงข้ามกับเกล็ดที่มีรูปร่างเป็นอนุภาคทรงกลมและพื้นผิวเรียบดังรูปที่ 2(a) ทำหน้าที่เปรียบเสมือนตลับลูกปืนช่วยเพิ่มค่าการไหลแก่สุดท้ายของจีโอพอลิเมอร์ [14] นอกจากนี้อนุภาคของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเกล็ดบ่งบอกถึงลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุนสอดคล้องกับภาพถ่ายขยายกำลังสูงทำให้มีความต้องการของเหลวไปเคลือบผิวมากกว่า จีโอพอลิเมอร์เฟส

จึงมีความสามารถทำงานได้ลดลง ในขณะที่การใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100) พบว่ามีการก่อตัวอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ



รูปที่ 4: ค่าการไหลผ่านขนาดเล็กของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

2. ระยะเวลาการก่อตัว

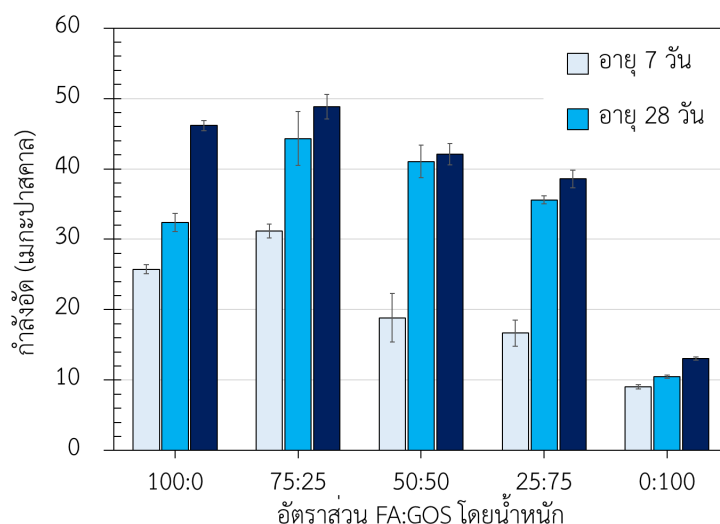


รูปที่ 5: ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

จากการศึกษาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า การแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ทั้งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวปลาย (final setting time) สั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) มีระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายเท่ากับ 71 และ 90 นาที ตามลำดับ ในระบบจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมมากกว่าร้อยละ 18 หรือเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [10] ไอออนของแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อเริ่มแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่ร้อยละ 25 50 และ 75 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งสองลดลงอย่างต่อเนื่อง และในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100 มีระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นที่สุด โดยมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเพียงประมาณ 34 นาที และระยะเวลาการก่อตัวปลายที่ 40 นาที สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งค่อนข้างเสถียร แต่

ในของเหลวที่มีความเป็นด่างสูงแคลเซียมบางส่วนสามารถละลายออกมา (Ca^{2+}) และทำปฏิกิริยากับซิลิเกตได้อย่างรวดเร็ว เกิดเป็นเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของจีโอพอลิเมอร์เจลช่วยเร่งการก่อตัวได้ [9] ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของเถ้าลอยอย่างมาก ดังนั้น ในส่วนผสมแบบผสมผสาน (hybrid systems) ที่มีทั้งเถ้าลอยและเปลือกหอยนางรมบดละเอียดจึงเกิดปฏิกิริยาสองชนิดพร้อมกัน การตกตะกอนอย่างรวดเร็วของ C-S-H นี้เองที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการแข็งตัวทำให้เพสต์สูญเสียความสามารถในการไหลและเริ่มก่อตัวเร็วขึ้น สำหรับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100 ซึ่งไม่มีเถ้าลอยเกิดการก่อตัวที่รวดเร็วผิดปกติจึงสันนิษฐานได้ว่าไม่ใช่ผลลัพธ์จากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ แต่เป็นปฏิกิริยาหลักระหว่างแคลเซียมจากเปลือกหอยนางรมบดละเอียดกับซิลิเกตจากสารกระตุ้นโดยตรง ซึ่งยืนยันว่ากลไกของแคลเซียมนั้นส่งผลต่อการก่อตัวที่รวดเร็วอย่างยิ่ง สอดคล้องกับผลวิจัยของ Chindaprasit et al. [5] ที่ศึกษาพบว่าการเติมวัสดุที่อุดมไปด้วยแคลเซียมช่วยเร่งการก่อตัวของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม

3. กำลังอัด



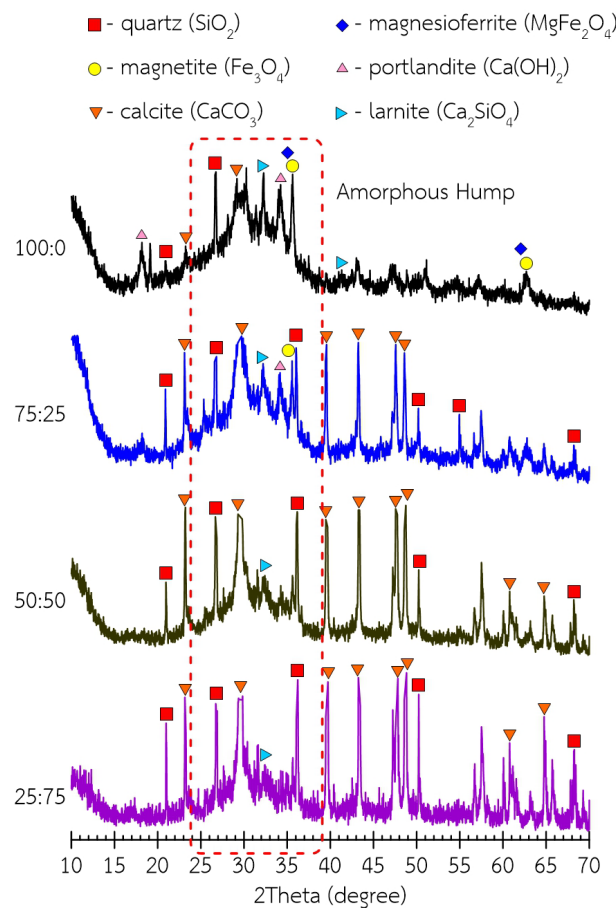
รูปที่ 6: กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6 ชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลที่ซับซ้อนของการแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียด เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดตามอายุการบ่มพบว่า ในส่วนผสมที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75 ค่ากำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการสร้างโครงข่ายโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) ที่ให้กำลังยังคงดำเนินต่อไป แม้จะผ่านช่วงการบ่มเร่งในระยะแรกไปแล้ว เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดพบว่า อัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 ให้กำลังอัดสูงที่สุดในทุกช่วงอายุ โดยเฉพาะที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดสูงถึงประมาณ 44.3 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่มีกำลังอัดเท่ากับ 32.4 เมกะปาสคาล คิดเป็นเพิ่มขึ้นร้อยละ 37 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 อาจจะเกี่ยวข้องกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์เจลและสารประกอบไฮเดรชันซึ่งเป็นเจลลักษณะเดียวกับในปูนซีเมนต์ เจล C-S-H นี้จะแทรกสลับอยู่ร่วมกับเจล N-A-S-H กลายเป็นโครงข่ายแบบผสมผสานที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าการมีเจล N-A-S-H เพียงอย่างเดียวดังที่ Djobo et al. [9] ได้เคยศึกษาไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา เมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นร้อยละ 50 และ 75 พบว่ากำลังอัดเริ่มลดลงเมื่อเทียบกับจุดสูงสุดที่อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 แม้ว่าที่อายุ 28 และ 60 วัน กำลังอัดของทั้งสองอัตราส่วนผสมนี้จะยังคงสูงกว่าหรือเทียบเคียงได้กับตัวอย่างควบคุมก็ตาม การลดลงนี้อาจเกิดจากการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไป

ทำให้ปริมาณ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่มีอยู่ในเถ้าลอยซึ่งจำเป็นต่อการสร้างโครงข่าย N-A-S-H ลดลง แม้ผลกระทบเชิงบวกจาก C-S-H หรือ C-A-S-H จะยังคงอยู่ แต่ก็ไม่สามารถชดเชยการขาดหายไปของเจล N-A-S-H ที่เป็นตัวประสานหลักได้ สำหรับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 0:100 กำลังอัดลดลงอย่างมาก และไม่มีการพัฒนากำลังอัดที่ชัดเจนระหว่าง 7 ถึง 60 วัน ผลลัพธ์นี้ยืนยันอย่างชัดเจนว่าการใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดเป็นวัสดุผงตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ไม่สามารถทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ เนื่องจากปริมาณอะลูมิเนียมซิลิเกตที่จำเป็นไม่เพียงพอ โดยกำลังอัดเล็กน้อยที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับโซเดียมซิลิเกตซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงต่ำมาก หรืออาจเกิดจากการอัดแน่นตัวทางกายภาพเท่านั้น

4. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เฟส

4.1 รูปแบบ XRD: การทำปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและสารละลายแอลคาไลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแถบโค้งนูนกว้าง เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบ XRD ของเถ้าลอยในรูปที่ 3 ในช่วงมุม 2Theta ระหว่าง 20–35° กับรูปแบบ XRD ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เฟสควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) ดังแสดงในรูปที่ 7

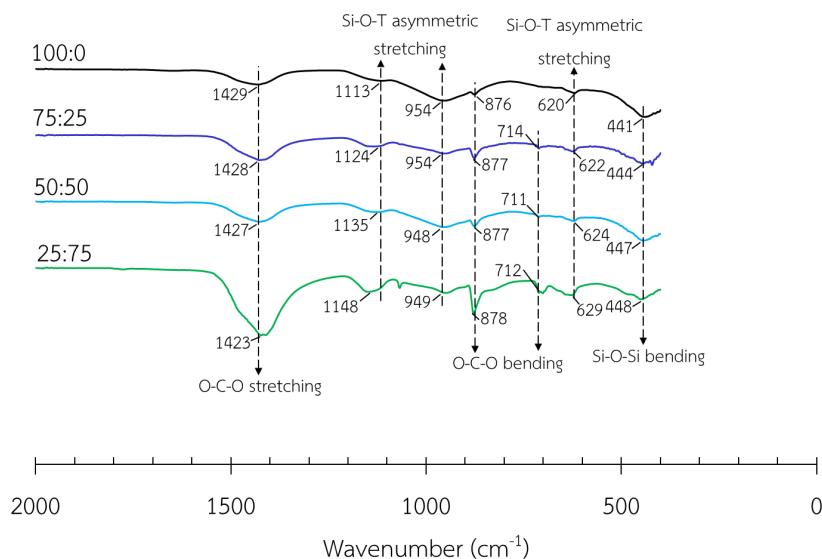


รูปที่ 7: ผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75

โดยเมื่อแก้วอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาได้ถูกละลายและทำปฏิกิริยาทำให้แถบโค้งนูนนั้นได้เลื่อนไปทางมุม 2Theta ที่สูงขึ้นเล็กน้อย [15] ประมาณ 25–38° ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดเจลจีโอพอลิเมอร์ (geopolymer gel) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ทำให้กำลังอัด เมื่อพิจารณาเฟสผลึกที่หายไปจากการทำปฏิกิริยาพบว่า เฟสของแอนไฮไดรต์ (anhydrite; CaSO_4) และไลม์ (lime; CaO) ไม่ปรากฏในรูปแบบ XRD ของจีโอพอลิเมอร์เฟส สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าแหล่งแคลเซียมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาในเถ้าลอยได้ถูกละลายโดยสารละลายแอลคาไลและเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาดังกล่าว และคาดว่าจะทำให้เกิดเจลไฮบริด C-A-S-H และ N-A-S-H [3] ซึ่งมีคุณสมบัติร่วมของ

ผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนและจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม ยังคงมีเฟสผลึกที่เนื้อเยื่อของควอตซ์ และแร่เหล็กแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) หรือ magnesioferrite (MgFe_2O_4) ที่ปรากฏอยู่ สิ่งนี้ยืนยันว่า ควอตซ์และแร่เหล็กเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็มในโครงสร้างจุลภาคและไม่ได้มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังปรากฏพิคของแคลไซต์ในตัวอย่างควบคุมแต่ไม่ปรากฏในรูปแบบ XRD ของเถ้าลอย มีงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า คาร์บอนที่เพิ่มขึ้นใหม่เป็นผลของปฏิกิริยาคาร์บอนชัน (carbonation) โดยปอร์ตแลนด์ไดต์ (portlandite; $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทั้งที่มีอยู่เดิมหรือที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างกระบวนการ จะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ [16] ผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคแบบคอมโพสิต (composite microstructure) โดยมีส่วนของเฟสผลึกที่เนื้อเยื่อและเจลไฮบริดอสัณฐานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในรูปแบบ XRD ของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 ปรากฏพิคของแคลไซต์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาน้อยมากโดยมีพิคสูงสุดที่มุม 29.4° และมีพิคย่อยที่ตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งมาจากเปลือกหอยที่เติมเข้าไป พิคที่สูงเป็นอันดับสองคือที่มุม 26.7° ซึ่งเป็นควอตซ์ที่มาจากทั้งเถ้าลอยและส่วนที่ปนเปื้อนในเปลือกหอย เมื่อพิจารณาเฟสอสัณฐานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพบว่า จะแสดงลักษณะเนินกว้าง (broad amorphous hump) ในช่วงมุม 2θ ประมาณมุม $25\text{--}38^\circ$ (บริเวณขอบเขตเส้นประ) เราจะยังคงเห็นแถบคิงนูนของเจลไฮบริด C-A-S-H และ N-A-S-H ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานหลัก อย่างไรก็ตาม การใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากในรูปแบบ XRD ของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 50:50 และ 25:75 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 จะสังเกตเห็นพิคของผลึกแคลไซต์สูงเด่นจนไม่สามารถสังเกตเห็นส่วนที่เป็นเจลไฮบริดอสัณฐานที่มีอยู่ได้แสดงให้เห็นว่าส่วนที่เป็นวัสดุเติมเต็มมีปริมาณเพิ่มขึ้นและส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมีปริมาณลดลง โดยผลการวิเคราะห์นี้สนับสนุนผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 50:50 และ 25:75 ที่มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25

4.2 สเปกตรัม FTIR: ลักษณะสเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของจีโอพอลิเมอร์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75 ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 8

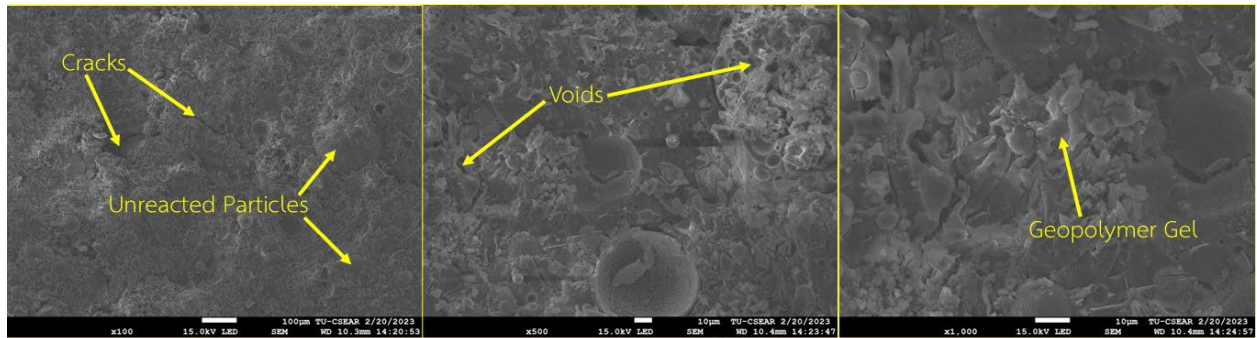


รูปที่ 8: สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 และ 25:75

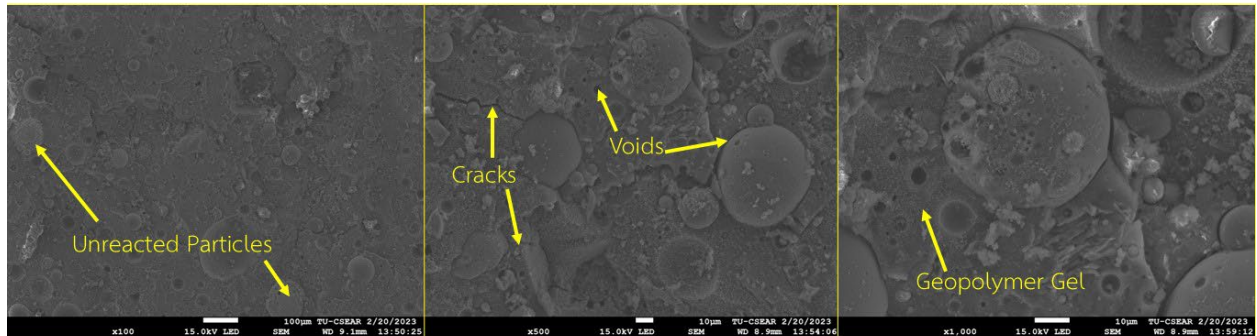
พบว่า ทุกตัวอย่างปรากฏแถบการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น $1410\text{--}1480\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ O-C-O stretching และที่ตำแหน่งใกล้เคียงคลื่น 875 cm^{-1} และเลขคลื่นในช่วง $711\text{--}714\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ O-C-O bending แสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) [17] ในตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) แถบนี้ปรากฏด้วยความเข้มต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอนชันตามธรรมชาติระหว่างสารละลายแอลคาไลส่วนเกินกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ สำหรับตัวอย่างที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยความเข้มของพิคในช่วงนี้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณเปลือกหอยที่เพิ่มขึ้น โดยในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ

25:75 แลบบคาร์บอนเนตได้กลายเป็นแถบหลักที่สังเกตได้ชัดเจนที่สุดในสเปกตรัม FTIR ซึ่งยืนยันว่าโครงสร้างหลักของวัสดุได้เปลี่ยนสภาพจากการเป็นเมทริกซ์อีพอกซีโพลีเมอร์ไปเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณแคลไซต์สูง ในช่วงเลขคลื่น $950\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของการสั่นแบบยืดตัวไม่สมมาตรของพันธะ Si-O-T (โดยที่ T คือ Si หรือ Al) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้หลักของการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซีโพลีเมอไรเซชัน [18] ในตัวอย่างควบคุมปรากฏพีกที่มีความเข้มสูงและกว้างโดยมีจุดยอดที่ตำแหน่งคลื่น 954 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการละลายของเฟสแก้วอะลูมิเนียมซิลิเกตในแอลลอยและการก่อตัวใหม่เป็นโครงข่ายเจล N-A-S-H ที่สมบูรณ์ การแทนที่แอลลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 แถบพันธะ Si-O-T ยังคงปรากฏชัดเจน แต่มีการเลื่อนตำแหน่งเล็กน้อยไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง จากผลวิจัยของ García-Lodeiro et al. [19] พบว่า มีแคลเซียมเข้าไปอยู่ในระบบจะทำให้โครงสร้างพันธะเปลี่ยนไป โดยแถบ Si-O-T จะเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง อาจจะบ่งชี้ถึงการรวมตัวของไอออนแคลเซียมเข้าสู่โครงข่ายเจลเกิดเป็นเจลไฮบริด ซึ่งการเกิดขึ้นร่วมกันของเจลอีพอกซีโพลีเมอร์และเจลแคลเซียม ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพีก FTIR และช่วยเสริมกำลังอัดให้สูงขึ้น [20] อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้นความเข้มของแถบ Si-O-T ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 25:75 แถบนี้ได้ลดลงอย่างชัดเจน อาจเกิดจากการลดลงของสารเชื่อมประสาน เนื่องจากปริมาณแอลลอยไม่เพียงพอที่จะสร้างเจลเพื่อยึดเกาะอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาจำนวนมากได้ ในช่วงเลขคลื่นประมาณ $440\text{--}470\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะ Si-O-Si Bending [21] เกิดจากแร่ควอตซ์ที่ไม่ละลายและยังคงค้างอยู่ในเนื้อวัสดุของทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบ XRD

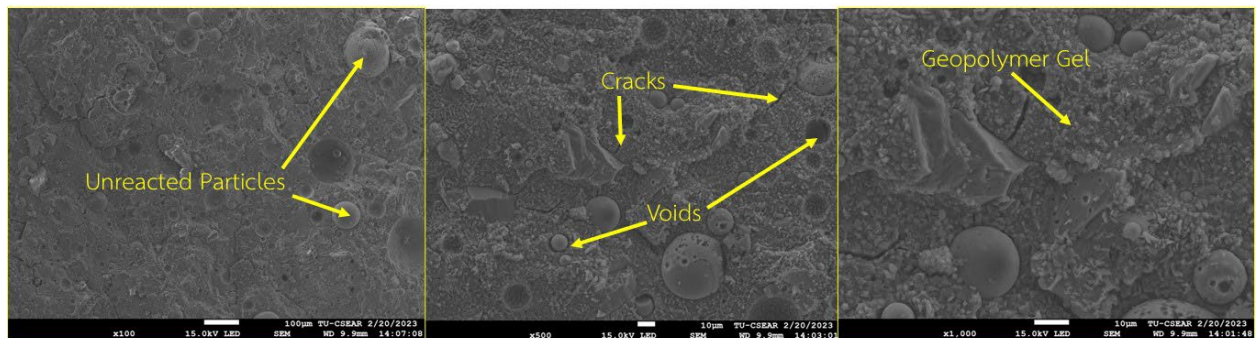
4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด FE-SEM: ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอีพอกซีโพลีเมอร์เฟสแสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ตัวอย่างควบคุม (อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 100:0) มีลักษณะโครงสร้างที่มีความหลากหลาย โดยพบอนุภาคแอลลอยทรงกลมกระจายตัวอย่างหนาแน่น ซึ่งมีทั้งส่วนที่ผิวเรียบเนียนเนื่องจากยังไม่เกิดปฏิกิริยา และส่วนที่มีร่องรอยการชะละลายจากการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างดังแสดงในรูปที่ 9(a) อนุภาคทรงกลมเหล่านี้ถูกเชื่อมประสานด้วยเจลอีพอกซีโพลีเมอร์ที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การบ่มที่อุณหภูมิห้องส่งผลให้กระบวนการละลายเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทำให้ยังคงเหลืออนุภาคแอลลอยเดิมทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็กและรูพรุนบางส่วนแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาค ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 แสดงในรูปที่ 9(b) พบว่า โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นสูงซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างชัดเจน อาจจะเกิดจากแคลเซียมที่ละลายออกมาจากเปลือกหอยนางรมบดละเอียดช่วยเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัว และสร้างเจลไฮบริดที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นทำหน้าที่ห่อหุ้มและยึดเกาะอนุภาคไม่ทำให้ปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงบางส่วนไว้ด้วยกัน ผลจากการทำงานของสองส่วนนี้ออนุภาคแคลไซต์ขนาดเล็กจากเปลือกหอยอาจจะเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างระหว่างอนุภาคแอลลอยที่ใหญ่กว่าทำให้โครงสร้างจุลภาคโดยรวมมีความหนาแน่นสูงขึ้น ทำให้ภาพรวมของเนื้อวัสดุมีความต่อเนื่องกันดีส่งผลให้มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงที่สุด รูปที่ 9(c) แสดงโครงสร้างจุลภาคของอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 50:50 พบการกระจายตัวของอนุภาคเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคแอลลอยทรงกลม โดยโครงสร้างเจลอีพอกซีโพลีเมอร์มีลักษณะหลวมกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 มีช่องว่างระหว่างอนุภาคให้เห็นชัด สำหรับอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 25:75 โครงสร้างเจลอีพอกซีโพลีเมอร์มีลักษณะหลวมมากขึ้นและมีพื้นผิวขรุขระเกิดจากอนุภาคเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 9(d) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ที่ตรวจพบเฟสผลึกเด่นชัดกว่าเฟสอสัณฐาน และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ FTIR ที่ตรวจพบการแทรกตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต



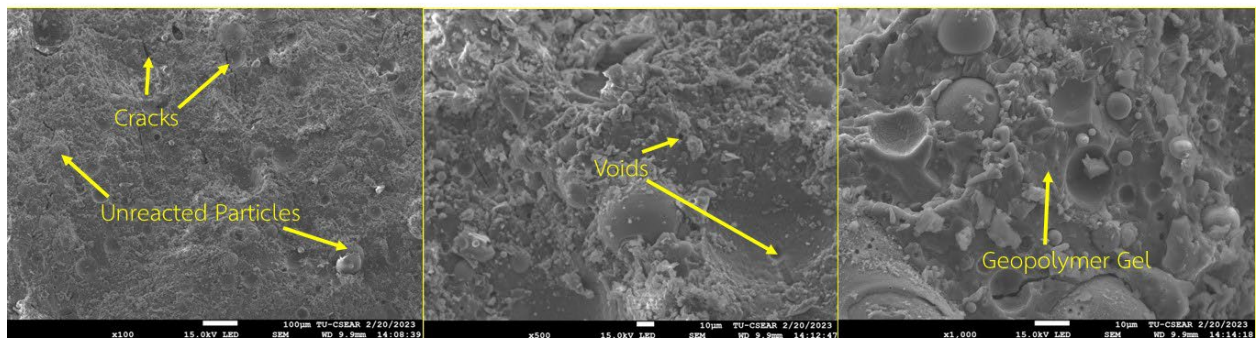
(a) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 100:0 ที่กำลังขยา 100 500 และ 1,000 เา



(b) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 75:25 ที่กำลังขยา 100 500 และ 1,000 เา



(c) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 50:50 ที่กำลังขยา 100 500 และ 1,000 เา



(d) ภาพถ่าย FESEM ของ FA:GOS ในอัตราส่วน 25:75 ที่กำลังขยา 100 500 และ 1,000 เา

รูปที่ 9: ภาพถ่ายกำลังขยาสูงของเ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่อายุ 28 วัน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ธาตุประกอบหลักในเมทริกซ์ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเ้าลอยผสมเปลือกหอยนางรมบดละเอียด ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) อะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และแคลเซียม (Ca) โดยที่ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของออกไซด์ทุกชนิดและคาร์บอนบ่งชี้ถึงความเป็นสารประกอบคาร์บอนเนตสำหรับ Na Al Si และ Ca ซึ่งอธิบายถึงการตกตะกอนร่วมกันของสารผลิตภัณฑ์ N-A-S-H และ C-A-S-H เจลที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ [22] เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการแทนที่เ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดแสดงให้เห็นถึงการ

เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณธาตุ Si และ Al ที่ตรวจพบมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเปลือกหอยนางรมบดละเอียดเพิ่มขึ้น สิ่งนี้ทำให้ค่าอัตราส่วน Ca:Si และ Si:Al เพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Chindaprasirt et al. [23] และ Detphan & Chindaprasirt [24] พบว่า เมื่ออัตราส่วน Si:Al เพิ่มขึ้นจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและมีความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน Ca:Si ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าอัตราส่วน Si:Al เท่ากับ 2.70 คืออัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงสุด อาจเป็นไปได้ว่าอัตราส่วน Ca:Si และ Si:Al ที่สูงช่วยกระตุ้นการก่อตัวของสารประกอบที่มีแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนประกอบหลักในเมทริกซ์เพสต์แบบไฮบริด ซึ่งเติมรูพรุนและช่องว่างเล็ก ๆ และมีส่วนสำคัญต่อความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น [25]

ตารางที่ 3: อัตราส่วนอะตอมของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

อัตราส่วน FA:GOS	ร้อยละโดยอะตอม										อัตราส่วนอะตอม	
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ca:Si	Si:Al
100:0	12.17	58.85	9.51	0.70	2.87	7.40	1.69	0.38	4.81	1.62	0.65	2.58
75:25	13.90	57.29	13.38	0.37	1.69	4.56	2.08	0.34	4.97	1.41	1.09	2.70
50:50	16.09	57.24	13.64	0.30	0.97	3.99	2.74	0.18	4.31	0.56	1.08	4.11
25:75	10.16	60.17	11.13	0.61	2.78	6.72	2.55	0.42	4.04	1.42	0.60	2.42

สรุปผล

จากการศึกษาอิทธิพลของเปลือกหอยนางรมบดละเอียดที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมบดละเอียดส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมที่ไวต่อปฏิกิริยาช่วยเร่งกระบวนการไฮเดรชันและการแข็งตัว นอกจากนี้ ความสามารถในการไหลของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคเปลือกหอยที่มีความเป็นเหลี่ยมมุม รวมถึงความต้องการน้ำที่สูงขึ้น

2. อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้เถ้าลอยร้อยละ 75 ผสมร่วมกับเปลือกหอยนางรมบดละเอียดร้อยละ 25 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 44.3 เมกะปาสคาล โดยมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 37 การปรับปรุงกำลังอัดนี้เกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่างเถ้าลอยและเปลือกหอยนางรมบดละเอียด

3. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคยืนยันกลไกการเสริมแรงในอัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 โดยแคลเซียมที่ละลายออกจากเปลือกหอยเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิเกตและอะลูมิเนต เกิดเป็นเจล C-A-S-H ร่วมกับ N-A-S-H โดยการเลื่อนตำแหน่งของแถบพันธะ Si-O-T ใน FTIR และผลวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS ที่พบองค์ประกอบของ Ca Si และ Al อยู่ร่วมกันในปริมาณสูงช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของเนื้อเจลเชื่อมประสาน

4. การแทนที่เถ้าลอยด้วยเปลือกหอยนางรมในปริมาณที่สูงเกินไป ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นแหล่งของซิลิกาและอะลูมินาไม่เพียงพอที่จะสร้างเจลเพื่อยึดเกาะอนุภาคฟิลเลอร์จำนวนมากได้ ทำให้โครงสร้างเจลขาดความต่อเนื่องและมีลักษณะหลวมเพิ่มขึ้น

5. การใช้อัตราส่วน FA:GOS เท่ากับ 75:25 มีศักยภาพสูงในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถพัฒนา กำลังอัดได้ดีภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ต้องพึ่งพาการบ่มด้วยความร้อน ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบ

REFERENCES

- [1] M. Hanifa, R. Agarwal, U. Sharma, P. C. Thapliyal, and L. P. Singh, "A review on CO₂ capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies," *J. CO₂ Utilization*, vol. 67, 2023, Art. no. 102292, doi: 10.1016/j.jcou.2022.102292.
- [2] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [3] P. Chindaprasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *J. Mater. Sci.*, vol. 47, pp. 4876–4883, 2012, doi: 10.1007/s10853-012-6353-y.
- [4] P. Zhang, Y. Zheng, K. Wang, and J. Zhang, "A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar," *Composites Part B: Eng.*, vol. 152, pp. 79–95, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.031.
- [5] P. Chindaprasirt, T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, S. Horpibulsuk, A. Poowancum, and B. Injorhor, "Effect of calcium-rich compounds on setting time and strength development of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 9, 2018, Art. no. e00198, doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00198.
- [6] P. Nath and P. K. Sarker, "Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 1, 2017, Art. no. 32, doi: 10.1617/s11527-016-0893-6.
- [7] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive," *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 269–274, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.018.
- [8] B. Yang and J. G. Jang, "Environmentally benign production of one-part alkali-activated slag with calcined oyster shell as an activator," *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, 2020, Art. no. 119552, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119552.
- [9] Y. J. N. Djobo, A. Elimbi, J. Dika Manga, and I. B. Djon Li Ndjock, "Partial replacement of volcanic ash by bauxite and calcined oyster shell in the synthesis of volcanic ash-based geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 673–681, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.104.
- [10] *Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618-23e1, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://store.astm.org/c0618-23e01.html>
- [11] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M-20b, Mar. 2020. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0109_c0109m-20.html
- [12] C. Namchiengtai, P. Nasaeng, and V. Sata, "Effect of ground pumice on the properties of fly ash geopolymer paste," (in Thai), *Thai Sci. Technol. J.*, vol. 33, no. 1, pp. 87–105, 2025.
- [13] *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM C191-19, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://store.astm.org/c0191-19.html>
- [14] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, S. Hatanaka, and T. Cao, "High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 264–270, 2011, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000161.
- [15] U. Rattanasak, K. Pankhet, and P. Chindaprasirt, "Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 18, pp. 364–369, 2011, doi: 10.1007/s12613-011-0448-3.
- [16] E. Ruiz-Agudo, K. Kudłacz, C. V. Putnis, A. Putnis, and C. Rodriguez-Navarro, "Dissolution and carbonation of portlandite [Ca(OH)₂] single crystals," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 19, pp. 11342–11349, 2013, doi: 10.1021/es402061c.
- [17] Z. H. Cheng, A. Yasukawa, K. Kandori, and T. Ishikawa, "FTIR study on incorporation of CO₂ into calcium hydroxyapatite," *J. Chem. Soc. - Faraday Trans.*, vol. 94, pp. 1501–1505, 1998, doi: 10.1039/a708581h.

- [18] W. K. W. Lee and J. S. J. van Deventer, "Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions," *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 211, no. 1, pp. 49–66, 2002, doi: 10.1016/S0927-7757(02)00237-6.
- [19] I. García-Lodeiro, A. Fernández-Jiménez, M. T. Blanco, and A. Palomo, "FTIR study of the sol–gel synthesis of cementitious gels: C–S–H and N–A–S–H," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 45, pp. 63–72, 2008, doi: 10.1007/s10971-007-1643-6.
- [20] C. K. Yip, G. C. Lukey, and J. S. J. Van Deventer, "The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 9, pp. 1688–1697, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.042.
- [21] W. K. W. Lee and J. S. J. Van Deventer, "The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers," *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 211, no. 2–3, pp. 115–126, 2002, doi: 10.1016/S0927-7757(02)00239-X.
- [22] O. Mahmoodi, H. Siad, M. Lachemi, and M. Sahmaran, "Synthesis and optimization of binary systems of brick and concrete wastes geopolymers at ambient environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 276, 2021, Art. no. 122217, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122217.
- [23] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 539–543, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.023.
- [24] S. Detphan and P. Chindapasirt, "Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 720–726, 2009, doi: 10.1016/S1674-4799(10)60019-2.
- [25] W. Punurai, W. Kroehong, A. Saptamongkol, and P. Chindapasirt, "Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 62–70, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115.

Sensitivity Analysis of Partial Joint Ordering Policy in Multi-Location Distribution Systems

Anchalee Supithak¹ Wisut Supithak^{2*}

¹*Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

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

*Corresponding author e-mail: fengwsst@ku.ac.th

Received: 1 December 2025; Revised: 24 February 2026; Accepted: 9 March 2026

Published online: 27 April 2026

Abstract

This research performs a sensitivity analysis on inventory replenishment for multiple demand locations using a partial joint ordering policy. Specifically, the study examines inventory replenishment for dispersed systems comprising five and ten locations. A performance index compares the partial joint ordering policy against a full joint ordering policy by calculating the ratio of their total inventory costs. The problem is formulated as a binary linear programming optimization model and solved using the Excel Solver to minimize total inventory cost. Sensitivity analysis is conducted to evaluate the impact of variable setup costs and demand levels on the total inventory cost of partial joint ordering. Variable setup costs are analyzed across a range from 2,000 to 40,000. The study considers dispersed location systems with both equal and unequal variable setup costs. Furthermore, demand is classified into two cases: equal value of 10,000 and unequal values between 8,000 to 22,000. The results show that for the distribution system having different demands, when variable setup cost increases, the performance index decreases. For five locations problem and ten locations with the unequal demands and high variable setup cost, the partial joint ordering gives the total inventory cost in average lower than the full joint ordering by 1.69% and 2.75%, respectively. The distribution system with high different dispersed demands, the partial joint ordering has an advantage in term of total inventory cost. On the other hand, the partial joint ordering is not advantageous when the dispersed demands are equal or not much difference.

Keywords: Inventory cost, Multiple locations, Partial joint ordering, Performance index, Variable setup cost

INTRODUCTION

The inventory decisions of multiple items or multiple locations in the distribution system involve solving for replenishment quantities and replenishment periods from the same supplier to reduce the ordering cost. Joint ordering policy is known as the replenishment method for multiple items or multiple locations' demands by applying the same replenishment period for delivery. The distribution system with multiple demands' locations involves replenishing decisions of when and how much to order items or how many locations' demands including to the same delivery schedule that minimizes the total costs of the inventory holding cost and the procurement cost. The joint ordering is developed based on the economic order quantity principle which considers the total replenish cost to serve all demands of multiple items or locations. The Economic Order Quantity or EOQ firstly presented by Harris F. in 1913 is the principle of economic replenishment quantity of an item. The EOQ model considers replenishment quantity that minimizes the total cost of the inventory setup cost or procurement cost and the inventory holding cost according to the item's demand. Therefore, each item has its own reorder point and replenishment period. On the other hand, the other replenishment policy by applying the economic order interval is based on replenishment period which has an advantageous in practicality. Each item with different demand will occupy different replenishment period, thus the joint ordering policy can be applied to get the same replenishment period. Several research have studied the variance problems of multiple items in logistics and supply chain. The systematic literature review of the full joint replenishment inventory control are studied by [1]. The research of [2] firstly proposed a "Power-of-Two" policy and demonstrated that by rounding the ordering intervals to powers of two guarantees a cost within 2% of the optimal solution. In the supply chain management, the replenishment problem of the multiple items and multiple locations has been studied widely. The research of [3] extended the power of two policy to solve inventory and routing problem of one warehouse and multiple retailers' distribution system. The replenishment decisions have been studied extensively in the variance problems of the logistics and supply chain management. The research of [4] proposes the power of two policy applied to determine the inventory replenishment policy for the problem of vehicle routing of multiple warehouses and multiple retailers' distribution system. From the full joint replenishment presented by [5], all items or locations are replenished at the same time. When all locations' demands are replaced at the same period which means that the replenishment quantities are adjusted to respond to the demand rate and replenishment period. The full joint replenishment is simplest to manage but it is inefficient if the demand rates vary and the inventory will be a mix of items with shortages and excess inventory. The full joint replenishment considered inventory costs which compose of inventory holding cost, the procurement cost consisting of fixed setup cost, and the variable setup cost varying on the individual item. [6] applied genetic algorithm to solve the can-order policies in the joint replenishment problem. This research aims to determine the can-order level of each item that minimize the number of items in storage, the number of stockout items, and the number of placed orders. The cost structure of joint ordering is studied by [7] introducing the jointly incurred fixed procurement costs based on the interrelationship of items. This research introduces the nonlinear (mixed integer) programming formulation for the problem of determining an optimal power-of-two policy. The joint ordering policy for multi-item inventory control under stochastic demand and step-wise structure of purchasing cost is presented by [8]. This research has introduced a new policy called the (s, Q) policy, which places an order of a fixed quantity Q every time the



inventory position of any given item drops to the reorder point s . Each replenishment order is distributed among multiple items to equalize the inventory levels of all items as much as possible.

The inventory management using spreadsheet based or Excel Solver is extensively studied by researchers. Simulation optimization is more interesting than the heuristics method in solving the real problem, since demand and lead time are not constant and deterministic values. Thus, the traditional model like EOQ which solve constant and deterministic demand and lead time is not practical. The research of [9], [10], [11] apply spreadsheet or Excel to simulate and apply the optimization model in inventory management problems. [9] proposes a practical application by developing the spreadsheet to manage inventory problem in National Pharmacy Chain. The research of [10] applies simulation approach with spreadsheet to solve stochastic inventory model of perishable product. [11] focuses on developing model by applying function and formulars in spreadsheet and performing the factor analysis. The research of [12] focuses on simulating the join ordering policy on Excel and comparing the difference inventory policies by varying the values inventory parameters which are replenishment quantity, replenishment period, and safety stock.

From the literature survey, the research of partial joint ordering simulated on spreadsheet is rarely studied. The partial joint replenishment policy in the multi-item or muti-location distribution system is the inventory management strategy between individual ordering and full joint ordering. Since, the solution from the full joint ordering does not always give the minimum total cost and are not practical for the capacitated vehicle, the partial joint replenishment will be more advantage when the multi-item inventory model has unequal demands. The partial joint replenishment tends to have benefit on lower inventory cost when demands are varied as well. The improvement of the full joint ordering policy by implementing the partial joint ordering is presented by [13]. The research of [13] proposed heuristic clusters multiple items by considering the replenishment intervals those are close values. The annual cost of the partial ordering and individual ordering are compared. The extension study to improve full joint ordering of multiple items inventory problem with partial joint ordering is interesting. In addition, the inventory simulation on spreadsheet This research also focuses on improving the solution by varying the inventory holding cost fractions.

Therefore, this research focuses on setting the simulation model of the partial joint ordering on spreadsheet to solve for the optimal solution, performing sensitivity analysis on the related parameters and comparing the scenarios of equal and unequal demands. The solutions to the partial joint ordering are the set of clusters of demands' locations those minimize the total inventory cost. Each cluster represents the same delivery route. The solutions from applying the partial joint ordering are the clusters of demands which each cluster contains the locations those have the same replenishment period. Thus, the decision variable value (x_{ij}) is either 1 or 0. x_{ij} value is 1, if location i is assigned to cluster j , otherwise the value is 0. The variable setup cost represents the cost of adding each item to the delivery cluster. The examples of the variable setup cost are the cost of delivery, the cost of setting up order when adding more items or locations, administrative costs, or other costs relating to adding more items or locations to the order. This research considers the constant values of inventory holding cost, inventory setup cost, and demand. This research aims to develop the partial joint ordering model using spreadsheet focusing on optimizing delivery schedules and minimizing total costs. Then the sensitivity analysis is performed to evaluate how changes in inventory setup cost and demand impact the total cost, facilitating

improved inventory control. The locations' demands are varied from equal demand for all locations to unequal demands which divided into two groups: the locations with low level demand and the locations with high-level demand. For the setup cost, the variable setup cost is added to the total inventory cost, if the items are included to the same cluster. The variable inventory setup cost represents extra delivery cost, or extra procurement cost when adding that locations to the considering delivery cluster. The research question addresses whether a joint ordering policy yields greater cost advantages than a full joint ordering approach when inventory setup costs vary across locations. Therefore, the research objective is to study the sensitivity analysis of demand and variable inventory setup cost on the partial joint ordering. The total inventory cost from the solution of partial joint ordering is compared to the full joint ordering. Thus, this research aims to develop the model on Excel spreadsheet and perform the sensitivity analysis by varying the demands and variable setup cost of each location to study the performance of partial joint ordering. The total cost of partial joint and full joint is compared.

METHODS

1. Research Methodology

This research aims to study sensitivity of variable setup cost to the partial joint replenishment policy with the capacitated vehicle in the distribution system of multiple locations' demands. The solution by applying the partial joint ordering is the clusters of locations which demands belonging to each cluster has the same replenishment interval. To compare the performance of partial joint to the full joint ordering, the total cost of both models is compared. The demands and setup cost are varied to study the behavior of partial joint ordering.

The related assumptions are as follows:

- 1) The annual demand of each location is deterministic and constant.
- 2) The total inventory cost consists of holding cost and procurement cost or setup cost.
- 3) The holding inventory cost is known and constant.
- 4) The inventory setup cost consists of fixed cost and variable cost which is deterministic and constant.
- 5) There are multiple identical capacitated vehicles

The related notations are as follow:

D_i is the item demand of location i

x_{ij} is the decision variable of which the value is either 1 or 0, if $x_{ij} = 1$ location i is assigned to cluster j , otherwise $x_{ij} = 0$

C_i is the item cost of location i

Q_i is the replenishment quantity of location i

T_i is the replenishment interval of location i

H_i is the inventory holding cost of items of location i

SF_i is the fixed setup cost of the inventory replenishment of location i

SV_i is the variable cost of the inventory replenishment of location i

T_{joint} is the replenish period of the joint ordering policy

T_{ij} is the replenishment period of location i belonging to cluster j for partial joint ordering policy

VC is the vehicle capacity

TC_{joint} is the total inventory costs of all locations with joint ordering

$TC_{partial_joint}$ is the total inventory costs of partial joint ordering cost of cluster 1 to cluster m

The economic order quantity considers the replenishment policy with the minimization of total inventory cost composing of the inventory setup cost and the carrying cost according to the equation (1) and (2). On the other hand, the replenishment period is calculated as equation (3). The replenishment quantity (Q_i) is solved by the differentiation of the total cost function according to equation (4). The replenishment period is solved for the optimal point of equation (5). The joint ordering policy considers all items' replenishing cost and the replenishment interval with minimum total cost with equation (6). The formula for the joint ordering replenishment period is shown in equation (6).

$$TC(Q_i) = \frac{(SF_i)Q_i}{D_i} + \frac{H_i Q_i}{2} \quad (1)$$

$$Q_i = \sqrt{\frac{2SF_i D_i}{H_i}} \quad (2)$$

$$T_i = \sqrt{\frac{2SF_i}{D_i H_i}} \quad (3)$$

$$TC(Q_i)_{joint} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(SF_i + SV_i)Q_i}{D_i} + \frac{H_i Q_i}{2} \right\} \quad (4)$$

$$TC(T_i)_{joint} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(SF_i + SV_i)}{T_i} + \frac{H_i D_i T_i}{2} \right\} \quad (5)$$

$$T_i = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n (SF_i + SV_i)}{\sum_{i=1}^n H_i D_i}} \quad (6)$$

For partial joint ordering replenishment policy, the solutions are the set of clusters which each cluster contains locations having the same replenishment period. The objective function is to minimize the total cost of all clusters for all demands' location. Each cluster contains locations are grouped to deliver at the same replenishment period. The total cost of the partial joint ordering as shown in equation (7) is the function of T_{ij} . The total inventory cost consists of the inventory holding cost, $\frac{H_i D_i T_{ij}}{2}$, and the ordering setup cost, $\frac{(SF_i + SV_i)}{T_{ij}}$, which composes of the fixed setup cost and the variable setup cost.

$$TC(T_{ij})_{partial_joint} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(SF_i + SV_i)}{T_{ij}} + \frac{H_i D_i T_{ij}}{2} \right\} \quad (7)$$

The replenishment quantities of all locations are calculated as the following equation.

$$Q_i = D_i \times T_{ij_partial_joint} \quad (8)$$

The vehicle capacity of the partial joint ordering is the additional considered constraint. The replenishment quantities are calculated according to equation (8). The replenishment quantities of all locations in the same cluster must not exceed the vehicle capacity as shown in equation (9).

$$\sum_{i=1}^n Q_i \leq VC \quad (9)$$

2. The Mathematic Model

The problem is formulated as binary linear optimization. The problem model is set and solved by using Excel Solver. The research model is solved under the following objective function and constraint functions.

The objective is to minimize,

$$TC_{partial_joint} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \frac{(SF_i + SV_i)}{T_{ij}} + \frac{H_i D_i T_{ij}}{2} \right\} \times X_{ij} \right] \quad (10)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = n \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = n \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^a Q_i \leq VC, a \leq n \quad (13)$$

$$X_{ij} = \{0,1\} \quad (14)$$

The objective function, equation (10), considers the inventory holding cost and the ordering setup cost. The first constraint is all n locations must be assigned to the deliver cluster. The second constraint is the total locations in all clusters are equal to m . Equation (13) represents the replenishment quantities of all assigned locations in each cluster must not exceed the vehicle capacity. The last equation (14) is the problem solution is binary value. The solution to the problem is to assign location i to the cluster j . All locations are clustered by considering the total inventory cost according to equation (10).

3. The Setting Up Model Using Excel Solver

The problem is formulated as binary linear optimization. The problem model is set and solved by using Excel Solver. The inventory problem of 5 locations (R1 to R5) and 10 locations (R1 to R10) are set up. The sensitivity analysis of the variable setup cost and demands are studied to observe the behavior of the model. From figure 1, R1 to R5 represent location 1 to location 5, respectively. Cluster 1 to Cluster 5 represent the solution alternatives. The problem solutions are shown in yellow area which the solution (X_{ij}) is either 1 or 0. If $X_{ij} = 1$, the location i is assigned to cluster j , otherwise, $X_{ij} = 0$. Row 9 is the variable setup cost which represent the cost of ordering

individual item. The examples of variable setup cost are costs of delivery, material handling, extra services, or other extra costs beside common fixed setup cost when order for multiple locations. Row 10 is the value of Fixed ordering cost which will cost only once when the order of any number of locations is placed. Row 11 is the inventory holding cost. Row 12 is the demand values of each location. Row 13 and row 14 is the time between order (TBO) in year and day of each location when the location places order independently. Row 15 is the fixed ordering cost same as row 10 and row 18 is the vehicle capacity.

1	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2		R1	R2	R3	R4	R5	sum	T*joint(Partial)	Tday	TotalCost	Q
3	Cluster1	1	0	0	0	0	1	0.469	169	46904.1576	4691
4	Cluster2	0	1	0	0	0	1	0.469	169	46904.1576	4691
5	Cluster3	0	0	1	0	0	1	0.787	283	78740.0787	7875
6	Cluster4	0	0	0	1	0	1	0.787	283	78,740.08	7875
7	Cluster5	0	0	0	0	1	1	0.787	283	78,740.08	7875
8	sum	1	1	1	1	1	5			330,028.55	33007
9	VariableOC(SVi)	10000	10000	30000	30000	30000					
10	FixedOC (SFi)	1000	1000	1000	1000	1000					
11	Holdingcost (Hi)	10	10	10	10	10					
12	Demand (Di)	10000	10000	10000	10000	10000					
13	TBO (year) (Ti)	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141					
14	TBO (Day)	51	51	51	51	51					
15	FixedOC	1000									
16	VehicleCap	100,000									

Figure 1: The five locations problem setting on Excel

For 10 locations problem, the cells setup is the same except there are five more rows and 5 more columns for the 5 more locations as details shown in figure 2.

1	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	sum	T*joint (Partial)	Tday	TotalCost	Q
3	Cluster1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0	0	0
4	Cluster2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0	0	0
5	Cluster3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0	0	0
6	Cluster4	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	4	0.897	323	358887.1689	35889
7	Cluster5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0	0	0
8	Cluster6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0	0	0
9	Cluster7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0	0	0
10	Cluster8	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	4	0.897	323	358887.1689	35889
11	Cluster9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0.906	326	90553.85138	9056
12	Cluster10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.906	326	90553.85138	9056
13	SUM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10			898,882.04	89890
14	VariableOC(SVi)	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000					
15	FixedOC (SFi)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000					
16	Holdingcost (Hi)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10					
17	Demand (Di)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000					
18	TBO (year) (Ti)	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141					
19	TBO Day	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51					
20	FixedOC	1000														
21	VehicleCap	100,000														

Figure 2: The ten locations problem setting on Excel

The Solver analysis is set as shown in figure 3 and figure 4 for five locations' problem and ten locations' problem. The Evolutionary method is applied. The objective function is to minimize total inventory cost which is cell K8 and cell P8 for five locations and ten locations, respectively.

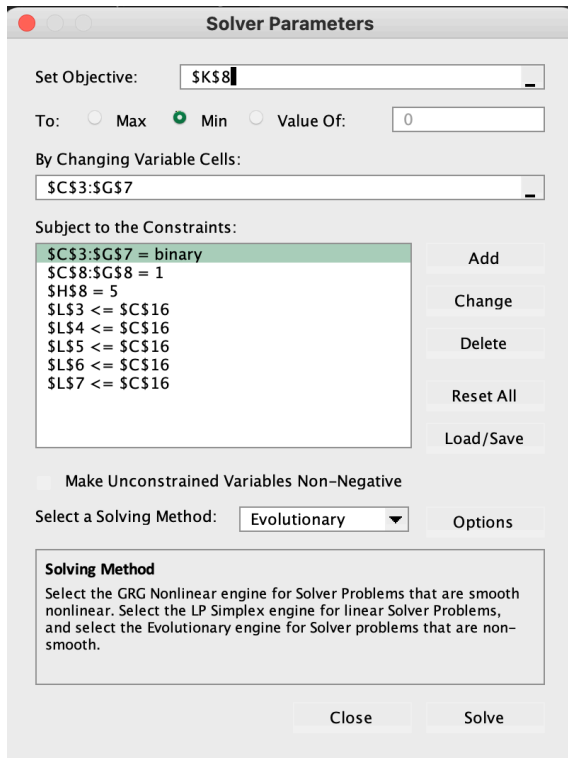


Figure 3: Setting five locations problem on Excel Solver

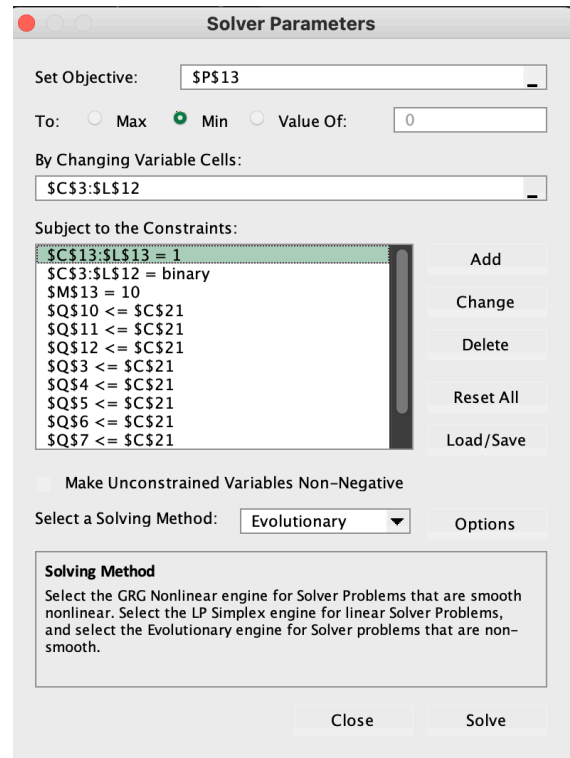


Figure 4: Setting ten locations problem on Excel Solver

4. Experimental Design

The research objective is to study the sensitivity of related parameters of the partial joint ordering model. The replenishment of 5 locations and 10 locations are solved by using Excel solver. The demand and ordering setup cost are the interested factors. The demand is classified as equally and constant demands' problem and the different demands at each location problem. The different demands are grouped as low and high demands. In addition, the variable setup cost of ordering is varied from low to high values.

The sensitivity analysis of parameters is studied on small problem of five locations and large problem of ten locations. The values of demands, inventory holding cost per unit, the inventory setup cost, are as follow:

For 5 locations problem

$$D_i = 10,000 \text{ units/year of all locations for the case of constant demands, and}$$

$$= 20,000, 25,000, 10,000, 12,000, \text{ and } 8,000 \text{ for different demand of location 1 to 5, respectively.}$$

$$H_i = 10 \text{ Baht per unit}$$

$$SF_i = 1,000 \text{ Baht per order}$$

$$SV_i = 2,000, 5,000, 10,000, 20,000, 30,000, 40,000 \text{ Baht per order}$$

RESULTS AND DISCUSSION

The sensitivity analysis of the partial joint ordering model is studied by varying demand of equal demand and different demands. The variable setup cost is varied from low to high. The demand values are classified to low and high demand for each location to study the behaviors of partial joint ordering. The performance index represents how the solution is better than all joint ordering. If the value of performance index is lower than 1, the partial joint

gives lower cost or better solution. The performance index of partial joint ordering is shown as equation (15). For the individual ordering, each location will place order independently. Each location has its own replenishment period and will order independently. The performance of individual ordering is measured as shown in equation (16).

$$\text{Performance Index}_{\text{partial}} = \frac{\text{Cost of Partial Joint Order}}{\text{Cost of All Joint Order}} \quad (15)$$

$$\text{Performance Index}_{\text{individual}} = \frac{\text{Cost of Individual Order}}{\text{Cost of All Joint Order}} \quad (16)$$

Table 1: The scenarios of small problem of 5 locations with the difference values of demands and variable setup cost

Location	Equal Demand	Unequal Demand	Scenarios of Different Ordering Setup Cost (Variable Cost)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10,000	20,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
2	10,000	25,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
3	10,000	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
4	10,000	12,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
5	10,000	8,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000

Table 2: The scenarios of large problem of 10 locations with the difference values of demands and variable setup cost

Location	Equal Demand	Unequal Demand	Scenarios of Different Ordering Setup Cost (Variable Cost)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10,000	20,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
2	10,000	25,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
3	10,000	22,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
4	10,000	20,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
5	10,000	25,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
6	10,000	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
7	10,000	8,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
8	10,000	12,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
9	10,000	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
10	10,000	8,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000

By varying the demand values and the setup cost values according to table 1 and table 2, the performance index values are shown in table 3 and table 4 for 5 locations problem. When the demand is constant and equal with the higher value of setup cost, the better the performance index of partial joint ordering comparing to all joint ordering. However, for equal demand, all joint ordering gives better solution than the partial joint ordering. On the other hand, for the unequal demand (table 4), two locations with high demand and three locations with low demand, the partial joint ordering gives lower cost than the solution of all joint ordering, since performance index values are lower than 1. In conclusion, when the distribution system with constant and unequal demands, the replenishment solution from partial joint ordering is better than all joint solution since the performance index of partial joint ($PI_{\text{partial joint}}$) is less than 1.0, especially when the variable setup cost increase. When the system has

different variable setup cost values, the locations with high demands and low setup cost will be grouped into the same clusters and the locations with low demands will be grouped into another cluster.

Table 3: The results of performance index values of partial joint ordering and independent ordering
(5 locations with constant and equal demand of 10,000)

Location	Equal Demand	Scenarios of Different Ordering Setup Cost (Variable Cost)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
2	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
3	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
4	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
5	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
Performance Index _{partial_joint}		1.000	1.000	1.010	1.000	1.003	1.002	1.017	1.028	0.976	0.970
Performance Index _{individual}		1.168	1.074	1.038	1.020	1.013	1.010	1.081	1.095	0.991	0.988

Table 4: The results of performance index values of partial joint ordering and independent ordering
(5 locations with difference demand of 20,000, 25,000, 10,000, 12,000, 8,000)

Location	Unequal Demand	Scenarios of Different Ordering Setup Cost (Variable Cost)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
2	25,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
3	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
4	12,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
5	8,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
Performance Index _{partial_joint}		1.025	0.9997	0.997	0.985	0.988	0.983	0.953	1.000	0.976	1.000
Performance Index _{individual}		1.141	1.050	1.015	0.9965	0.990	0.987	1.022	1.108	0.991	1.018

Table 5: The results of performance index values of partial joint ordering and independent ordering
(10 locations with constant and equal demand of 10,000)

Location	Equal Demand	Scenarios of Different Ordering Setup Cost (Variable Cost)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
2	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
3	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
4	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
5	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
6	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
7	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
8	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
9	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
10	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
Performance Index _{partial_joint}		1.067	1.057	1.015	1.01	1.005	1.004	1.046	1.056	0.987	0.994
Performance Index _{independent}		1.168	1.077	1.044	1.022	1.015	1.011	1.091	1.091	0.991	0.99

For the bigger problem, the 10 locations scenarios are studied. There are two scenarios which are constant and equal demands as shown in table 5 and constant unequal demands as shown in table 6. The average demand is 22,400 for the group of high demand and the average of 9,600 for the group of low demand. The variable setup cost of ordering is varied from low to high between 2,000 to 40,000.

From table 3 and table 5, the distribution system with the equal or not much difference demand of all locations, the full joint ordering gives lower total cost than the partial joint ordering, since the performance index is greater than one. However, if the distribution system has difference inventory ordering cost, the partial joint ordering gives the lower total cost than the full joint ordering. The individual ordering gives the same results as the partial joint ordering.

By considering the solutions of unequal demands distribution system (table 4 and table 6), the scenarios of the partial joint ordering with high variable setup cost gives lower total inventory cost than the full joint ordering, since the performance index values are less than 1. The average values of performance index from the scenarios are shown in table 7. The solution from the partial joint ordering with high variable setup cost gives lower cost than the solution from full joint ordering about 1.69% and 2.75% in average for 5 locations and 10 locations, respectively.

Table 6: The results of performance index values of partial joint ordering and independent ordering
(10 locations with difference demand of 20,000, 25,000, 22,000, 20,000, 25,000, 10,000, 8,000, 12,000, 10,000, 8,000)

Location	Unequal Demand	Scenarios of Different Ordering Setup Cost (Variable Cost)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
2	25,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
3	22,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
4	20,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
5	25,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	2,000	5,000	10,000	30,000
6	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
7	8,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
8	12,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
9	10,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
10	8,000	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	40,000	5,000	2,000	30,000	10,000
Performance Index _{partial_joint}		1.065	1.030	1.012	0.998	0.988	0.987	1.019	1.026	0.917	1.010
Performance Index _{independent}		1.168	1.060	1.020	0.999	0.992	0.988	1.040	1.115	0.917	1.020

Table 7: The average values of performance Index_{partial_joint} which less than one from unequal demands cases

Problems of unequal demands	Average Performance Index _{partial_joint}	Average Performance Index _{partial_joint} (%)	Percentage of Total Cost from Solutions of Partial Less than Full (%)
5 locations (table 4)	0.9831	98.31	1.69
10 locations (table 6)	0.9725	97.25	2.75

CONCLUSION

This research develops a spreadsheet-based inventory model for partial joint ordering across multiple demand locations, focusing on optimizing delivery schedules and lowering total costs. By applying sensitivity analysis, the model evaluates how changes in inventory ordering cost and demand impact the total cost, facilitating improved inventory control. The study applied a binary linear programming optimization model solved by using Excel Solver to minimize total inventory costs under varying the value of demand and variable setup costs. The performance of the partial joint ordering policy was evaluated against the full joint ordering policy using the performance index. The results indicate that the effectiveness of the partial joint ordering policy is highly dependent on the demand structure and variable inventory setup costs. The results indicate that, firstly, for distribution systems with equal or consistent demands across locations, the partial joint ordering policy offers no significant advantage over the full joint ordering policy. However, in scenarios characterized by unequal dispersed demands, the partial joint ordering policy demonstrates a clear cost advantage. Secondly, as the variable setup cost increases, the performance index decreases and less than one, indicating greater savings than the full joint ordering. Thirdly, for system with five and ten locations featuring unequal demands and high variable setup costs, the partial joint ordering policy reduced the total inventory cost by an average of 1.69% and 2.75%, respectively, comparing to the full joint ordering. Lastly, partial joint ordering trends to gives lower total cost, when the number of demand locations of the distribution system increases, especially the complex distribution system with variation values of demand and ordering cost. In conclusion, the partial joint ordering policy is the superior strategy for distribution system with high demand variance and significant varying of inventory setup costs, while full joint ordering remains sufficient for systems with uniform demand patterns.

REFERENCES

- [1] L. S. L. Bastos et al., "A systematic literature review on the joint replenishment problem solution: 2006-2015," *Prod.*, vol. 27, 2017, Art. no. e20162229, doi: 10.1590/0103-6513.222916.
- [2] R. Roundy, "98%-Effective integer-ratio lot-sizing for one-warehouse multi-retailer systems," *Manage. Sci.*, vol. 31, no. 11, pp. 1416–1430, 1985, doi: 10.1287/mnsc.31.11.1416.
- [3] S. Viswanathan and K. Mathur, "Integrating routing and inventory decisions in one-warehouse multi-retailer multi-product distribution systems," *Manage. Sci.*, vol. 43, no. 3, pp. 294–312, 1997, doi: 10.1287/mnsc.43.3.294.
- [4] A. Supithak and W. Supithak, "Determination of inventory replenishment policy with the open vehicle routing concept in a multi-depot and multi-retailer distribution system," *Eng. Appl. Sci. Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 23–31, 2018.
- [5] J. L. Balintfy, "On a basic class of multi-item inventory problems," *Manage. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 287–297, 1964, doi: 10.1287/mnsc.10.2.28.
- [6] K. Nagasawa, T. Irohara, Y. Matoba, and S. Liu "Applying genetic algorithm for can-order policies in the joint replenishment problem," *Ind. Eng. Manage. Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–10, 2015, doi: 10.7232/iems.2015.14.1.001.
- [7] A. Federgruen and Y.-S. Zheng, "The joint replenishment problem with general joint cost structures," *Oper. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 384–404, 1992, doi: 10.1287/opre.40.2.384.
- [8] M. M. Tanrikulu, A. Şen, and O. Alp, "A joint replenishment policy with individual control and constant size orders," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 48, no. 14, pp. 4253–4271, 2010, doi: 10.1080/00207540802662904.
- [9] Q. Liu, X. Zhang, Y. Liu, and L. Lin, "Spreadsheet inventory simulation and optimization models and their application in a national pharmacy chain," *Inform. Trans. Educ.*, vol. 14, no. 1, pp. 13–25, 2013, doi: 10.1287/ited.2013.0114.



- [10] Y. Mulya, V. M. Nia, and S. Maryana, "Inventory simulation-optimization model for small business," *Int. J. Bus., Econ. Social Develop.*, vol. 1, no. 2, pp. 55–60, 2020, doi: 10.46336/ijbesd.v1i2.36.
- [11] N. T. N. Nhung and D. T. Tuan, "A spreadsheet model for determining level of factors in inventory management," in *Proc. Int. Scientific Conf. (ISC)*, Ho Chi Minh, Vietnam, 2023, pp. 207–217.
- [12] J. Hirunyasiri, "Comparison of joint-order inventory policies: A simulation study of pharma sale data," Independent Study, Sirindhorn Int. Inst. Technol., Thammasat Univ., Pathum Thani, Thailand, 2023. [Online]. Available: https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2023/TU_2023_6622040464_19154_28558.pdf
- [13] I. Nakunthod, "An improvement of joint ordering policy of multiproduct inventory problem with partial joint ordering," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 13, no. 10, pp. 7592–7597, 2018. doi: 10.37622/IJAER/13.10.2018.7592-7597.

Thai-Nichi Institute of Technology

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

Tel: 0-2763-2600, E-mail: JEDT@tni.ac.th

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

