

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

Thai-Nichi Institute of Technology

Vol.12 No.2

July - December 2024



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

ISSN 2774-0617 (Online)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567 Vol. 12 No. 2 July - December 2024

ISSN (Online) 2774-0617

ความเป็นมา

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

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์รังสรรค์ เลิศในสัตย์

ขอบเขตเนื้อหา

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

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 6 เดือน (ปีละ 2 ฉบับ)

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

เจ้าของ

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

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

- | | |
|--|--|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ธนารักษ์ อีระมั่นคง | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 4. ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย งามหุ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 5. ศาสตราจารย์ ดร.วรวงศ์ ตั้งศรีรัตน์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 6. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 7. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรinx เสี่ยงศักดิ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์ วรรัตน์ปัญญา | สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.พญ มีสัจ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 12. รองศาสตราจารย์ อัญชลี สุพิทักษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |
| 14. อาจารย์อดิศักดิ์ เสือสมิง | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |

คณะกรรมการดำเนินงาน

- | | |
|---|------------------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ | 7. นางสาวสุพิศ บายคายคม |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชตะ รุ่งตระกูลชัย | 8. นายอศิรา พรหมสุทธิ์ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพชร สระทองอุ่น | 9. นางสาวพิมพ์รต พิพัฒน์กุล |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันยมัย เจียรกุล | 10. นางสาวอารีสา จิระเวชถาวร |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมราวดี ทัพพุน | 11. นางสาวอนันดา ปันเด |
| 6. ดร.ประมุข บุญเลี้ยง | |

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

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

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

E-mail : JEDT@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน

กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

บทบรรณาธิการ

ขอแสดงความยินดีกับนักวิจัยทุกท่านที่บทความได้ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT) เล่มปีที่ 12 ฉบับที่ 2 นี้ ทุกบทความได้รับการประเมินและการชี้แนะให้ปรับปรุงจากผู้ทรงคุณวุฒิ จึงมีเนื้อหาที่มีคุณภาพและมีประโยชน์อย่างยิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านวิจัย สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาต่อยอดไปสู่นวัตกรรม

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

JEDT ได้รับการรับรองให้อยู่กลุ่ม TCI 1 ต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งทางกองบรรณาธิการจะรักษามาตรฐานนี้ให้คงอยู่ตลอดไป

ทางกองบรรณาธิการหวังว่า บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่านในการอ้างอิงเพื่อการวิจัยและพัฒนาต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์
บรรณาธิการ

Editorial Message

Congratulations to all researchers whose articles have passed the peer review and were published in the Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT), Volume 12, Issue 2. All articles published in this issue have been reviewed and advised for modification by academic experts so that to have best quality contents and are extremely useful. They can be used for development of innovation.

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

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

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

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

สารบัญ

- 1 A Model to Predict the Failure of Centralized Air Conditioners with Variable Refrigerant Flow Using Machine Learning
Warit Siricharoensuk, Prasong Praneetpolgrang, Surasuk Mungsing
- 12 A Study of Setting Time of Cement Paste, Workability and Compressive Strength of Mortar Mixed with Concentrated Latex
Jakrapan Wongpa, Chaiyapat Thaweessapphithak, Sinat Koslanant, Gorapin Arahung
- 22 An Investigation of CFRP Laminates Cured in a Commercial Toaster Oven: Quality and Economic Assessment
Pimpet Sratong-on, Titirat Vivithkeyoonvong, Sutep Joy-A-Ka, Sawanya Suwannawong
- 37 Building Information Modeling for Construction Site Layout Planning
Narongrit Wongwai, Nujat Butsan, Suphawut Malaikrisanachalee
- 48 Determining the Optimal Parameters of Oil Checking Processing Using Engineering Experimental Design Techniques
Supat Silaloy, Chirawat Na-Badalung
- 55 Development of a Community Data Platform for Analytics and Management Planning
Sunisa Junrat, Jirasak Nopparat, Mongkon Manopiroonporn, Wannarat Suntiamorntut, Sakuna Charoenpanyasak
- 68 Development of Data Warehouse Using Data Integration Techniques to Reduced Data Redundancy for Workload Evaluation System Based on Academic Staff
Jirapan Rongnaimuang, Jongkol Janruang, Sanun Karnka
- 85 Providing QoS for Multi-Class Traffic in IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window
Warakorn Srichavengsup, Kanticha Kittipeerachon

- 95 Real-time Intrusion Detection System Using Machine Learning for Enhanced and Efficient Cybersecurity in Organizations

Natdanai Kongkhunthod, Prasong Praneetpolgrang, Payap Sirinam

- 111 The Comparison Between Structural Equation Modeling and Multiple Linear Regression Analysis to Predict the Parents' Intention of Using Child Car Restraint in Bangkok

Bussakorn Hammachukiattikul, Anchalee Supithak

- 125 The Use of Prestressed Rubber Pads for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Bridge Pier

Chichaya Boonmee, Pruchaya Yoddumrong, Natawut Chaiwino

ตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบปรับน้ำยา แปรผันโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง

วริษฐ์ ศิริเจริญสุข^{1*} ประสงค์ ปราณีตพลกรัง² สุรศักดิ์ มั่งสิงห์³

^{1*,2,3}หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : warit.sir@spumail.net

รับต้นฉบับ : 1 มีนาคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 2 เมษายน 2567; ตอบรับบทความ : 13 เมษายน 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง ในส่วนเหตุการณ์การเสียของเครื่องปรับอากาศมาจากปริมาณสารทำความเย็น ผู้วิจัยได้ใช้ชุดโปรแกรม RapidMiner Studio ในการสร้างตัวแบบจากอัลกอริทึมทั้ง 4 ประเภท ได้แก่ Decision Tree, Naïve Bayes, Support Vector Machine และ Neural Networks ทั้งนี้ ได้ใช้ชุดข้อมูลเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผันมาจาก บริษัท เบตเตอร์ คูล จำกัด จำนวน 402 รายการ ซึ่งภายในชุดข้อมูลประกอบไปด้วย แรงดันสารทำความเย็น ค่าความเย็นยิ่งยวด (subcooled value) ค่าความร้อนยิ่งยวด (superheated value) จำนวนเครื่องที่เปิด-ปิด และสถานะการทำงานของเครื่องที่ทำงานปกติและผิดปกติ เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพค่าความแม่นยำ (accuracy) ค่าความเที่ยง (precision) ค่าความระลึก (recall) และค่าความถ่วงดุล (F-Measure) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมต่าง ๆ ซึ่งอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้แก่ Neural Networks โดยมีค่าความแม่นยำร้อยละ 95.04 ค่าความเที่ยงร้อยละ 94.17 ค่าความระลึกร้อยละ 100 และค่าความถ่วงดุลร้อยละ 97.00 ทำให้ได้ผลของการทำนายสถานะทำงานปกติหรือผิดปกติ

อย่างไรก็ดี ผู้วิจัยได้พัฒนาขยายผลตัวแบบโดยใช้เทคนิค Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking มีการใช้อัลกอริทึมที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดและรองลงมาสองอันดับ ได้แก่ Neural Networks, Decision Tree และ Naïve Bayes ในการจำแนก ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้นจากเดิมด้วยค่าความแม่นยำมากถึงร้อยละ 95.52 ค่าความเที่ยงร้อยละ 97.21 ค่าความระลึกร้อยละ 97.21 และค่าความถ่วงดุลร้อยละ 97.21

คำสำคัญ : การเรียนรู้ของเครื่อง ตัวแบบทำนาย ระบบปรับน้ำยาแปรผัน

A Model to Predict the Failure of Centralized Air Conditioners with Variable Refrigerant Flow Using Machine Learning

Warit Siricharoensuk^{1*} Prasong Praneetpolgrang² Surasuk Mungsing³

^{1*,2,3} *Master of Science Program in Information Technology, Faculty of Information Technology,
Sripatum University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: warit.sir@spumail.net

Received: 1 March 2024; Revised: 2 April 2024; Accepted: 13 April 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

The objective of this research was to develop a predictive model for failure events of variable refrigerant flow air conditioning systems using machine learning techniques. The air conditioning failure events were attributed to the amount of refrigerant. The researcher utilized the RapidMiner Studio software to construct models from four algorithm types: Decision Tree, Naïve Bayes, Support Vector Machine, and Neural Networks. The dataset used consisted of 402 records of variable refrigerant flow air conditioning systems Better Cool Co., Ltd., containing features such as refrigerant pressure, subcooled value, superheated value, number of units turned on/off, and operational status (normal or faulty). To evaluate model performance, the accuracy, precision, recall, and F-measure metrics were calculated and compared across the algorithms. The Neural Networks algorithm demonstrated the highest performance, achieving 95.04% accuracy, 94.17% precision, 100% recall, and 97.00% F-measure, enabling accurate prediction of normal or faulty operational status.

Moreover, the researcher enhanced the model using the Stacking Hybrid Ensemble Method technique. This involved combining the top three performing algorithms: Neural Networks, Decision Tree, and Naïve Bayes, for classification. Consequently, the performance metrics improved, with an accuracy of 95.52%, precision of 97.21%, recall of 97.21%, and an F-measure of 97.21%.

Keywords: Deep learning, Predictive model, Variable refrigerant flow

1) บทนำ

ปัจจุบันการใช้เครื่องปรับอากาศมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในอาคารที่พัก ออฟฟิศ โรงงาน หรือพื้นที่ที่ต้องการปรับอากาศ เพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิภายในพื้นที่ ซึ่งแม้แต่ทางภาครัฐให้ความสำคัญในการใช้งานระบบเครื่องปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน จากทางกรมโยธาธิการและผังเมือง สังกัดกระทรวงมหาดไทย [1] ได้มีแนวคิดในการพัฒนาคู่มือการออกแบบสำหรับอาคารภาครัฐใหม่เพื่อให้เป็นรูปแบบอาคารเขียว (Green Government Office Design Guidelines for New Construction) [2] นั้นเน้นไปที่การใช้ระบบเครื่องปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง จึงทำให้มีการเลือกใช้งานเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์ระบบปรับน้ำยาแปรผัน (Variable Refrigerant Flow: VRF) มากขึ้นสำหรับอาคารประหยัดพลังงานในระดับที่สูงขึ้น เช่นการกำหนดให้ใช้งานเครื่องปรับอากาศตามมาตรฐานเบอร์ 5 ขึ้นไป

ปกติในงานบำรุงรักษาเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน มีสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการดูแลรักษา คือจำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ และทักษะทางวิศวกรในการดูแลรักษาระบบ เนื่องจากระบบมีความซับซ้อน รวมถึงชุดอุปกรณ์วัดค่าเซนเซอร์ที่อุปกรณ์ทั้งระบบ หากผู้ปฏิบัติงานไม่มีความเชี่ยวชาญจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวินิจฉัยจึงทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) [3], [4] ในส่วนเหตุการณ์การเสียของเครื่องปรับอากาศมาจากปริมาณสารทำความเย็นซึ่งเป็นสาเหตุและความสำคัญหลักของการวิจัยในครั้งนี้

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

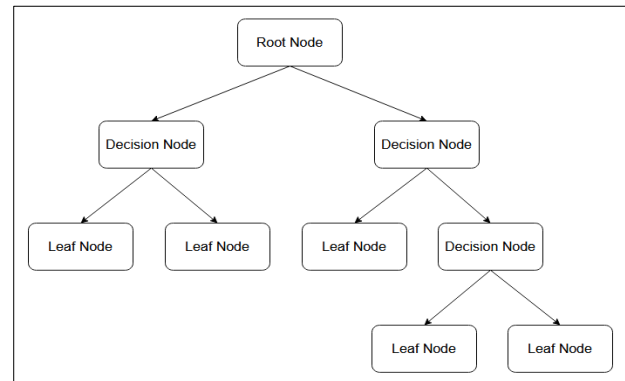
เพื่อพัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง ในส่วนเหตุการณ์การเสียของเครื่องปรับอากาศมาจากปริมาณสารทำความเย็น

3) ทบทวนวรรณกรรม

3.1) ประเภทของอัลกอริทึม

3.1.1) *Decision Tree* [5]: เป็นการตัดสินใจแบบต้นไม้ เป็นลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน มีลักษณะการแบ่งชุดข้อมูลเป็นกลุ่มต่าง ๆ มีการใช้ คุณลักษณะในการจำแนกประเภทในแต่ละ

โหนด (node) เพื่อใช้ในการทำนายผล การตัดสินใจประเภทนี้ มีการตัดสินใจที่เลียนแบบมนุษย์และเข้าใจง่าย มีลักษณะในการเรียกได้แก่ 1) Root Node 2) Decision Node 3) Leaf Node มีลักษณะการจำแนกดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : การตัดสินใจแบบต้นไม้ [6]

3.1.2) *Naïve Bayes* [7]: เป็นลักษณะของอัลกอริทึมที่ใช้วิธีการคิดแบบลักษณะของความน่าจะเป็นการอาศัยค่าต่อเนื่องจากเหตุการณ์ก่อนหน้า ส่วนใหญ่ในการจัดกลุ่มและแยกประเภทด้วยการใช้สมการ (1) ในการคำนวณ ดังนี้

$$P(c|x) = \frac{P(x|c)P(c)}{P(x)} \quad (1)$$

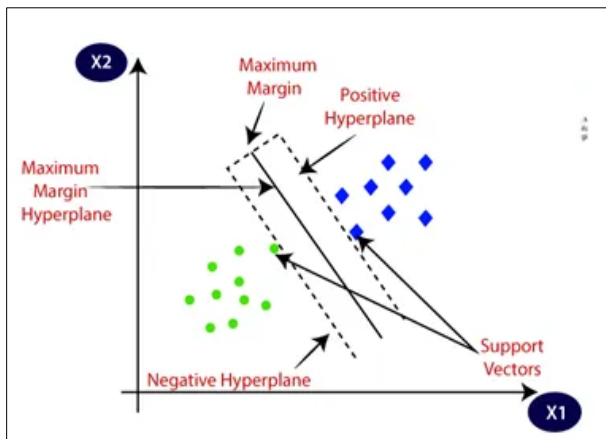
โดยที่ P หมายถึง ความน่าจะเป็น (probability)

c หมายถึง ลำดับชั้น (class)

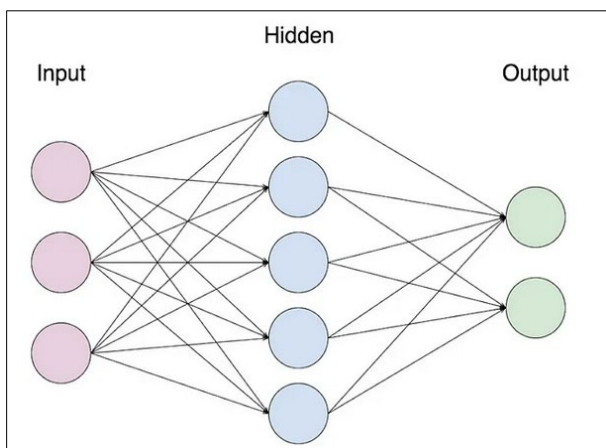
x หมายถึง คุณลักษณะ (attribute)

3.1.3) *Support Vector Machine* [8]: ลักษณะในการจำแนกชุดข้อมูลด้วยวิธีการหา Hyperplane ใช้สำหรับแบ่งข้อมูลที่ต่างกันเพื่อหาจุดต่างกันระหว่างแต่ละจุดเป็น Margin ที่มีความกว้างมากที่สุด และข้อดีของการจำแนกลักษณะนี้คือ มีความสามารถในการจำแนกข้อมูลที่มีมิติสูง มีลักษณะในการจำแนกดังรูปที่ 2

3.1.4) *Neural Networks* [9]: เป็นอัลกอริทึมที่เลียนแบบการคิดวิเคราะห์แบบมนุษย์ จากลักษณะในการคิดนี้โมเดลของอัลกอริทึมนี้จะมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) Input Layer ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูลและส่งต่อ 2) Hidden Layer มีหน้าที่ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่รับมาจากชั้น Input Layer เช่นการจัดการ การเรียงข้อมูล เป็นต้น ทำให้ช่วยในการตัดสินใจได้ดีขึ้น 3) Output Layer เป็นส่วนแสดงผลในการจำแนกประเภทในการตัดสินใจของข้อมูลที่ได้รับต่อมาจากชั้น Hidden Layer มีรูปแบบในการคิดดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 : การตัดสินใจ Support Vector Machine [10]



รูปที่ 3 : การตัดสินใจ Neural Networks [11]

3.2) การรวมกลุ่มแบบไฮบริด (Hybrid Ensemble Method) [12], [13]: เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมโมเดล (Ensemble Learning) ซึ่งใช้อัลกอริทึม หลายประเภทมาผสมผสานกันเพื่อสร้างโมเดลที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำมากขึ้น ในลักษณะการทำงานของ Hybrid Ensemble Method มีขั้นตอนดังนี้ 1) การสอนตัวแบบจากอัลกอริทึมมากกว่า 1 อัลกอริทึมจากชุดข้อมูลเดียวกัน จะได้ผลลัพธ์ที่หลากหลาย 2) นำอัลกอริทึมอีก 1 แบบนำมาตัดสินใจ

ข้อดีของ Hybrid Ensemble Method คือ มีความแม่นยำที่สูงกว่าการใช้อัลกอริทึมชนิดเดียวในการตัดสินใจ

3.3) การประเมินตัวแบบ (Model Evaluation) [14]

ในขั้นตอนสำหรับการประเมินค่าประสิทธิภาพตัวแบบนี้ หลังจากการใช้อัลกอริทึมในการทำนาย จะได้ค่าที่ทำนายจากตัวแบบ จากชุดคำสั่งในโปรแกรม RapidMiner Studio

ทำการประเมินค่าประสิทธิภาพของตัวแบบโดยใช้ค่าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความแม่นยำ (accuracy) ค่าความเที่ยง (precision) ค่าความระลึก (recall) และ ค่าความถ่วงดุล (F-measure) นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)–(5)

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

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

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

$$\text{F-Measure} = 2 \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (5)$$

โดยที่ TP	เป็นค่าที่การเรียนรู้ของเครื่องสามารถตัดสินใจได้ถูกต้องตามที่คาดหวัง
TN	เป็นค่าที่การเรียนรู้ของเครื่องสามารถตัดสินใจตรงกับค่าที่ไม่ได้คาดหวัง
FP	เป็นค่าที่การเรียนรู้ของเครื่องตัดสินใจเป็นผลลบ แต่ไม่ตรงกับค่าที่คาดหวัง
FN	เป็นค่าที่การเรียนรู้ของเครื่องตัดสินใจเป็นผลลบ และตรงกับค่าที่ไม่ได้คาดหวัง
Accuracy	เป็นค่าความแม่นยำ ที่เกิดหลังการเรียนรู้ของเครื่อง เทียบกับ ผลบวกจริงรวมกับผลลบจริงหารด้วยจำนวนที่ทำนายทั้งหมด
Precision	เป็นค่าความเที่ยง คือค่าที่เกิดขึ้นเมื่อทำซ้ำได้เหมือนเดิม
Recall	เป็นค่าความระลึก คือค่าที่สนใจในค่าการทำนายที่เป็นจริงตรงตามข้อมูล

3.4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Elmouatamid *et al.* [15] ได้วิจัยเรื่องการตรวจจับและวินิจฉัยข้อบกพร่องของระบบปรับอากาศแนวทางการตรวจจับและขับเคลื่อนด้วยข้อมูล ได้ใช้วิธีการในการตรวจจับความผิดปกติของระบบปรับอากาศด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น Rule Base ของระบบเครื่องปรับอากาศ และทฤษฎีของการทำความเข้าใจ เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับข้อบกพร่องในระบบปรับอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงมีการใช้อัลกอริทึมหลายประเภท ได้แก่ Support Vector Machine, Decision Tree, Extra Tree Classifies และ Ada Boost Classifiers สรุปในงานวิจัยชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องของวิธีการตรวจจับข้อบกพร่องในระบบปรับอากาศปัจจุบัน เฉพาะการตรวจจับข้อบกพร่องเล็กน้อยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและการใช้พลังงาน รวมถึงความจำเป็นในการพัฒนา

วิธีการใหม่ที่ทำให้ตรวจจับข้อบกพร่องพร้อมกันได้ โดยใช้ประโยชน์จากข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศใหม่ ๆ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง และการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ รวมถึงการทำให้ระบบปรับอากาศเป็น “Smart Service” ที่มีปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมและผู้ใช้ระบบ

4) วิธีดำเนินการวิจัย

ในขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัยนั้นทางผู้วิจัย ได้นำชุดข้อมูลที่เกี่ยวข้องของระบบปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบปรับน้ำยาแปรผัน และใช้ชุดโปรแกรม RapidMiner Studio เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพตัวแบบ

4.1) ชุดข้อมูลระบบของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน

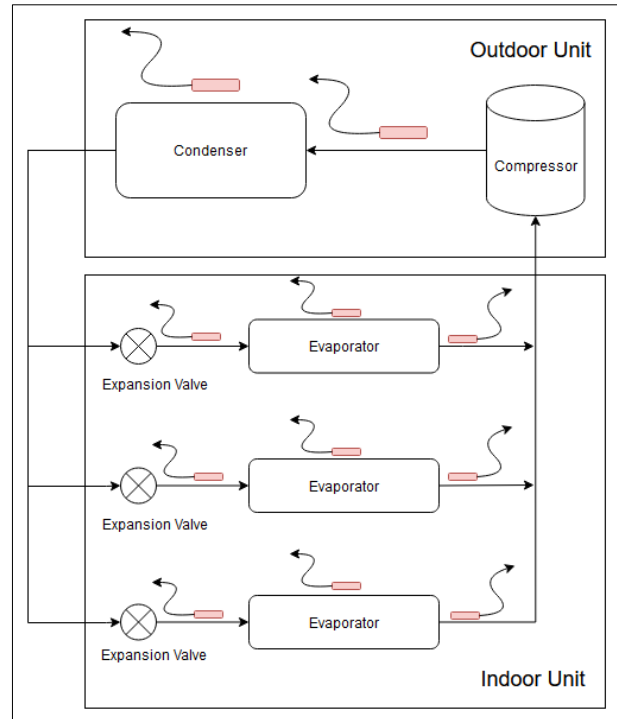
ชุดข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับจากทาง บริษัท เบตเตอร์ คูล จำกัด ซึ่งภายในชุดข้อมูลมีจำนวนเครื่องและอุปกรณ์ประกอบไปด้วย ชุดคอยล์ร้อน (outdoor unit) จำนวน 3 ชุด และชุดคอยล์เย็น (indoor unit) จำนวน 14 ชุด ภายในชุดข้อมูลจะประกอบไปด้วย

4.1.1) ชุดคอยล์ร้อน ประกอบด้วย ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลแรงดันสารทำความเย็นภายในระบบ

4.1.2) ชุดคอยล์เย็น ประกอบด้วย ข้อมูลอุณหภูมิ

4.1.3) ข้อมูลสถานะผิดปกติของตัวระบบเครื่องปรับอากาศ มีการแสดงถึงสถานะการทำงานที่ปกติและผิดปกติของตัวระบบจากปริมาณสารทำความเย็น R-410a

ชุดข้อมูลนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลภายในระบบเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน ไว้ในชุดข้อมูล VRF_DATA_CSV_FCU_14.CSV ประกอบด้วยข้อมูลที่รวบรวมจากการวัดค่าภายในระบบ เป็นข้อมูลที่รวบรวมระหว่าง เดือน มีนาคม – พฤษภาคม พ.ศ. 2566 จึงได้นำมาใช้สำหรับพัฒนาตัวแบบ ข้อมูลที่ได้รวบรวมเป็นข้อมูลจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (thermistor) และอุปกรณ์วัดแรงดัน (pressure sensor) ที่อยู่ในระบบเครื่องปรับอากาศ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 : ตำแหน่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และวัดแรงดันสารทำความเย็นในระบบปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน

4.2) การจัดการข้อมูล (Data Preparation)

ขั้นตอนที่สองในการวิจัย เมื่อได้ชุดข้อมูลเบื้องต้นจำนวน 402 รายการ นำมาวิเคราะห์ คัดเลือกคุณลักษณะ (attribute) สถานะเครื่องตามทฤษฎีระบบปรับอากาศที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารทำความเย็น จึงทำให้ได้ชุดข้อมูลที่มีผลต่อการทำงานของตัวระบบเครื่องปรับอากาศเพื่อทำการวิเคราะห์ตัวชุดข้อมูล ดังตารางที่ 1

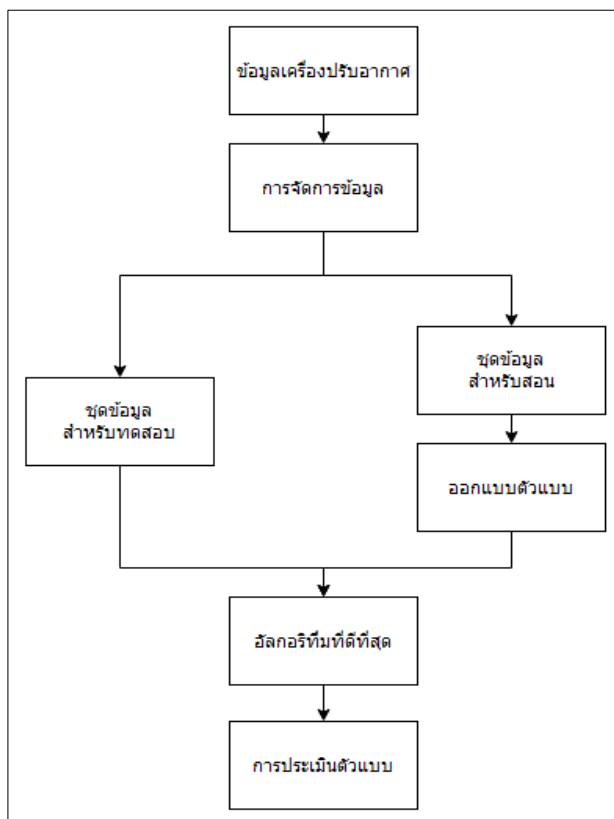
ตารางที่ 1 : รายละเอียดคุณลักษณะ (Attribute)

คุณลักษณะ	คำอธิบายคุณลักษณะ	รายละเอียดข้อมูล
Pres_HL	ค่าเฉลี่ยของแรงดันสารทำความเย็น	Min: 0 Psi/g Max: 316 Psi/g
SC_Temp.	ค่าเฉลี่ยของค่าความเย็นยิ่งยวด (subcooled value)	Min: -90 °C Max: 30.93 °C
SH_Temp.	ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนยิ่งยวด (superheated value)	Min: -1.85 °C Max: 15.71 °C
Start	จำนวนเครื่องที่กำลังทำงาน	Min: 0 Max: 14
Stop	จำนวนเครื่องที่กำลังหยุดทำงาน	Min: 0 Max: 14
LABEL	สถานะการทำงานปกติ และ ผิดปกติ	Status Fail / Normal

คุณลักษณะตามตารางที่ 1 มีการวัดค่าดังนี้ Press_HL ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Pound per Square Inch), SC_Temp และ SH_Temp เป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$), Start และ Stop คือจำนวนที่เครื่องคอยล์เย็น กำลังทำงานหรือหยุดทำงาน ในสถานะ LABEL ของการทำงานนี้เป็นตัวกำหนดให้ตัวระบบเครื่องปรับอากาศรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน สามารถทำงานได้ปกติ (normal) หรือไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ (fail) มีจำนวนและอัตราส่วน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : สถานะการทำงานในระบบปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน

สถานะการทำงาน	จำนวน	อัตราส่วน (%)
ปกติ (normal)	323	80.30
ไม่ปกติ (fail)	79	19.70
รวมทั้งสิ้น	402	100.00

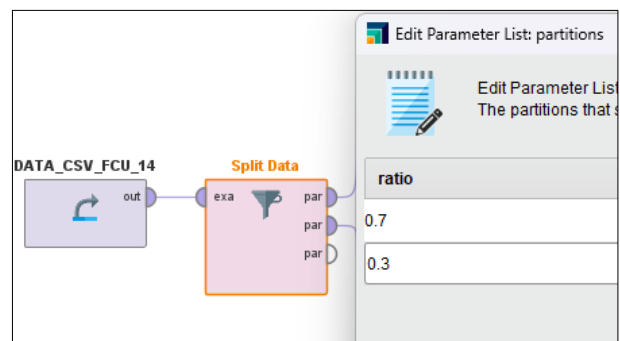


รูปที่ 5 : ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.3) พัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องทางผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเพื่อทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้การเรียนรู้ของเครื่อง และงานวิจัยในด้านระบบเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน รวมถึงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำแนก เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแบบ ตามที่แสดงในรูปที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และออกแบบการวิจัย

4.4) การสอนและการทดสอบ (Training & Testing)

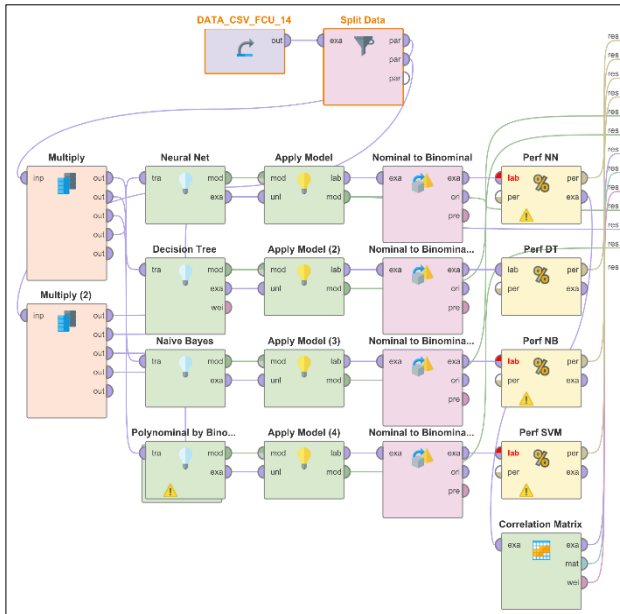
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสอนและการทดสอบการเรียนรู้ของเครื่อง เป็นลักษณะของการสอนแบบมีผู้สอน ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการแบ่งชุดข้อมูลเป็น ใช้สำหรับการสอนร้อยละ 70 และสำหรับการทดสอบร้อยละ 30 ใช้ซอฟต์แวร์ RapidMiner Studio เป็นเครื่องมือในงานวิจัย โดยเลือกในลักษณะของการแบ่งเป็นชนิด Sampling type Automatic ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 : แบ่งชุดข้อมูลสำหรับสอน และทดสอบการเรียนรู้ของเครื่อง ในชุดโปรแกรม RapidMiner Studio

4.5) ออกแบบตัวแบบ (Model Building)

ในขั้นตอนการออกแบบตัวแบบนี้ นำชุดข้อมูลมาเข้ากระบวนการในการสร้างตัวแบบ ซึ่งทางผู้วิจัยได้ใช้อัลกอริทึมในการออกแบบทั้งสิ้น 4 แบบ ได้แก่ Decision Tree, Naïve Bayes, Support Vector Machine, และ Neural Networks ทำการใช้ชุดคำสั่งภายในโปรแกรม RapidMiner Studio ทำตัวแบบ โดยมีลักษณะดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 : การออกแบบสำหรับทดสอบ อัลกอริทึม Decision Tree, Naive Bayes, Support Vector Machine และ Neural Networks

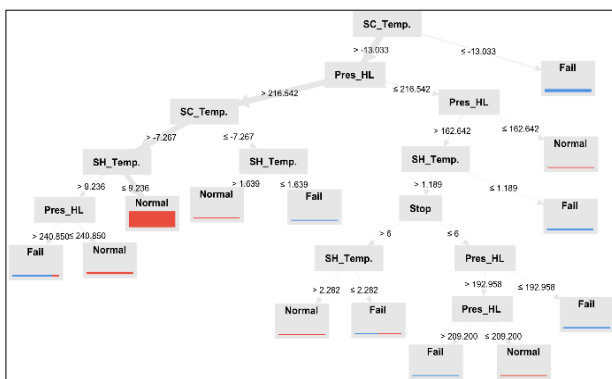
เมื่อทางผู้วิจัยทำการสร้างตัวแบบตามรูปที่ 4 แล้ว จะได้ลักษณะตัวแบบดังต่อไปนี้

4.5.1) *Decision Tree* จะมีลักษณะตัวแบบอัลกอริทึมดังรูปที่ 8

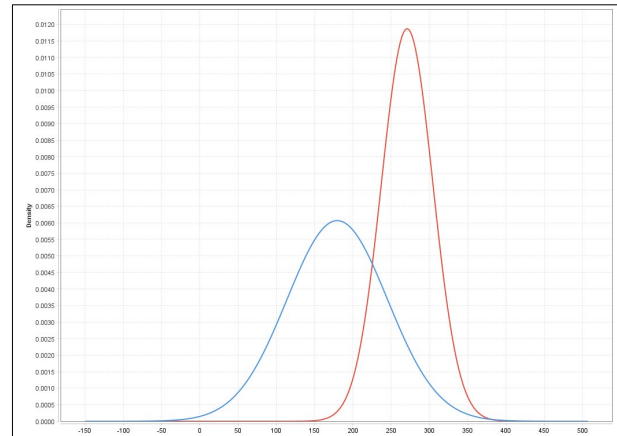
4.5.2) *Naive Bayes* จะมีลักษณะตัวแบบอัลกอริทึมดังรูปที่ 9

4.5.3) *Support Vector Machine* จะมีลักษณะตัวแบบอัลกอริทึมดังรูปที่ 10

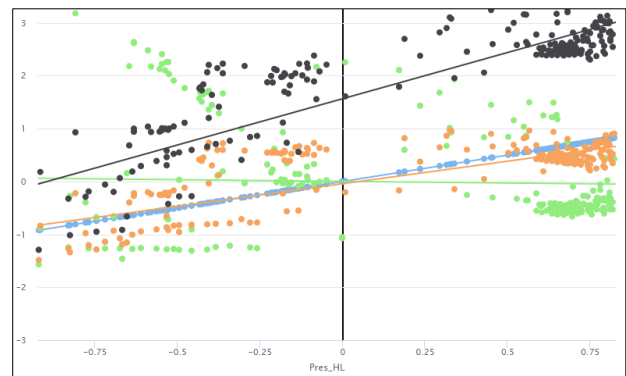
4.5.4) *Neural Networks* จะมีลักษณะตัวแบบอัลกอริทึมดังรูปที่ 11



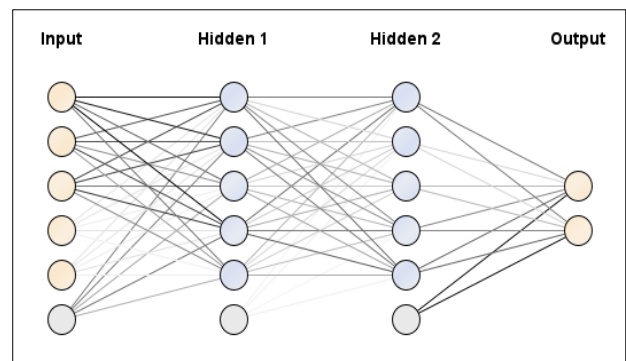
รูปที่ 8 : ลักษณะตัวแบบอัลกอริทึม Decision Tree



รูปที่ 9 : ลักษณะตัวแบบอัลกอริทึม Naive Bayes



รูปที่ 10 : ลักษณะตัวแบบอัลกอริทึม Support Vector Machine



รูปที่ 11 : ลักษณะตัวแบบอัลกอริทึม Neural Networks

จากนั้นผู้วิจัยตัดสินใจเลือกใช้งานด้วยอัลกอริทึมทั้ง 4 รูปแบบนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการประเมินตัวแบบขั้นต่อไป

4.6) การประเมินตัวแบบ (Model Evaluation) [14]

ในขั้นตอนสำหรับการประเมินตัวแบบนี้ เมื่อผู้วิจัยได้ใช้อัลกอริทึมในการทำนาย จะได้ค่าที่ทำนายจากตัวแบบจากชุด

คำสั่งในชุดโปรแกรม RapidMiner Studio จากนั้นทำการประเมินค่าประสิทธิภาพของตัวแบบด้วยการใช้ค่าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความแม่นยำ (accuracy) ค่าความเที่ยง (precision) ค่าความระลึก (recall) และ ค่าความถ่วงดุล (F-Measure) นั้นคำนวณได้จากสมการ (2) - (5)

5) ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผันโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องจากชุดข้อมูลจำนวน 402 รายการเพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ โดยใช้อัลกอริทึม 4 แบบ ได้แก่ Decision Tree, Naïve Bayes, Support Vector Machine และ Neural Networks เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพตัวแบบได้ค่าประสิทธิภาพดัง

ตารางที่ 3 : ค่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes, Support Vector Machine และ Neural Networks

Algorithm	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F-Measure (%)
Decision Tree	93.39	93.20	98.97	96.00
Naïve Bayes	92.56	94.00	96.91	95.43
Support Vector Machine	83.47	85.32	95.88	90.29
Neural Networks	95.04	94.17	100.00	97.00

จากตารางที่ 3 ทำให้ทราบค่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้ง 4 แบบดังนี้

1) Decision Tree ได้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.39% ค่าความเที่ยงเท่ากับ 93.20% ค่าความระลึกเท่ากับ 98.97% และค่าความถ่วงดุลเท่ากับ 96.00%

2) Naïve Bayes ได้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 92.56% ค่าความเที่ยงเท่ากับ 94.00% ค่าความระลึกเท่ากับ 96.91% และค่าความถ่วงดุลเท่ากับ 95.43%

3) Support Vector Machine ได้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 83.47% ค่าความเที่ยงเท่ากับ 85.32% ค่าความระลึกเท่ากับ 95.88% และค่าความถ่วงดุลเท่ากับ 90.29%

4) Neural Network ได้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 95.04% ค่าความเที่ยงเท่ากับ 94.17% ค่าความระลึกเท่ากับ 100.00% ค่าความถ่วงดุลเท่ากับ 97.00%

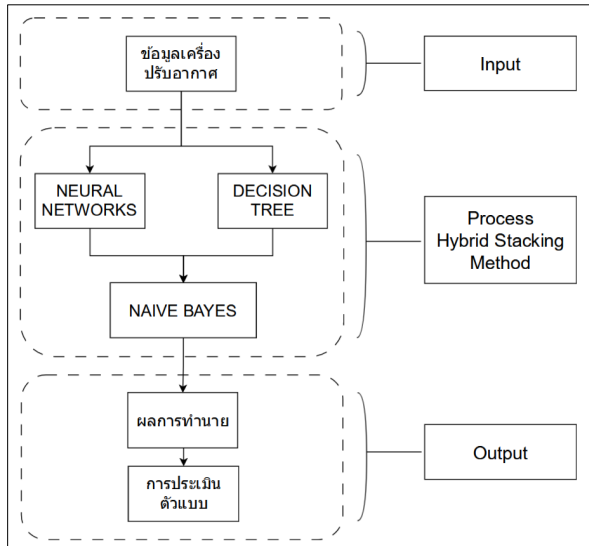
ทั้งนี้ มีการใช้เวลาในการคำนวณของอัลกอริทึมแต่ละประเภท โดยแสดงเวลาดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 : เวลาในการคำนวณของอัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes, Support Vector Machine และ Neural Networks

ครั้งที่	Decision Tree	Naïve Bayes	Support Vector Machine	Neural Networks
1	0.03	0.02	0.04	1.11
2	0.02	0.01	0.05	0.82
3	0.01	0.01	0.02	0.70
4	0.02	0.01	0.04	0.63
5	0.01	0.01	0.05	0.76
6	0.02	0.01	0.06	0.71
7	0.02	0.02	0.03	0.67
8	0.01	0.01	0.03	0.63
9	0.02	0.01	0.04	0.72
10	0.02	0.01	0.03	0.71
Average (S)	0.02	0.01	0.04	0.75

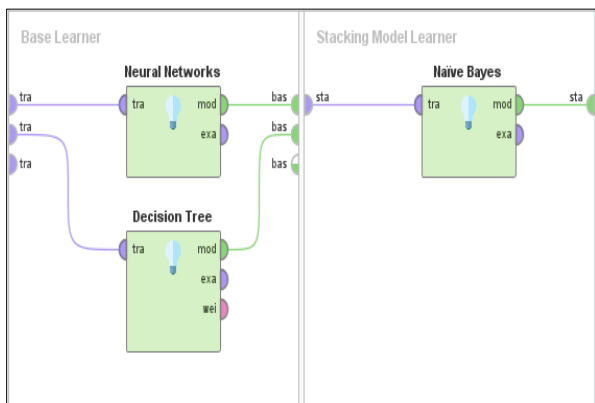
จากค่าเฉลี่ยของการคำนวณของอัลกอริทึมจำนวน 10 ครั้งที่ใช้เวลาในการทำน้อยที่สุดคือ Naïve Bayes ซึ่งได้ค่าเป็น 0.01 วินาที

จากวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน VRF โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง ในส่วนเหตุการณ์การเสียของเครื่องปรับอากาศมาจากปริมาณสารทำความเย็นเพื่อการพัฒนาตัวแบบทางผู้วิจัยได้ทำการได้ใช้แนวคิดในการพัฒนาตัวแบบทำนายด้วยการใช้วิธีการเรียนรู้แบบ Hybrid Ensemble Method [13], [12] ในแบบการตัดสินใจด้วยวิธี Stacking [16] ด้วยวิธีการเรียนรู้เป็นการใช้อัลกอริทึมในหลาย ๆ แบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้ทำการออกแบบจากอัลกอริทึมที่ได้ประเมินค่าประสิทธิภาพดังตารางที่ 3 ผู้วิจัยได้ใช้อัลกอริทึมที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดและรองลงมาสองอันดับ ได้แก่ Neural Networks, Decision Tree และ Naïve Bayes ในการจำแนกดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 : ขั้นตอนการพัฒนาตัวแบบ Stacking Model

ภายในขั้นตอนที่ 1 Input นำข้อมูลเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบน้ำยาแปรผัน โดยใช้ชุดโปรแกรม RapidMiner Studio ในการนำเข้าชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอน ขั้นตอนที่ 2 Process ทำการเลือกอัลกอริทึมในการสอนการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อมาใช้เทคนิค Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking ใช้อัลกอริทึม 3 ชนิด ในการตัดสินใจได้แก่ Neural Networks, Decision Tree และ Naive Bayes ในการตัดสินใจ เพื่อพัฒนาตัวแบบให้ค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 : Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking

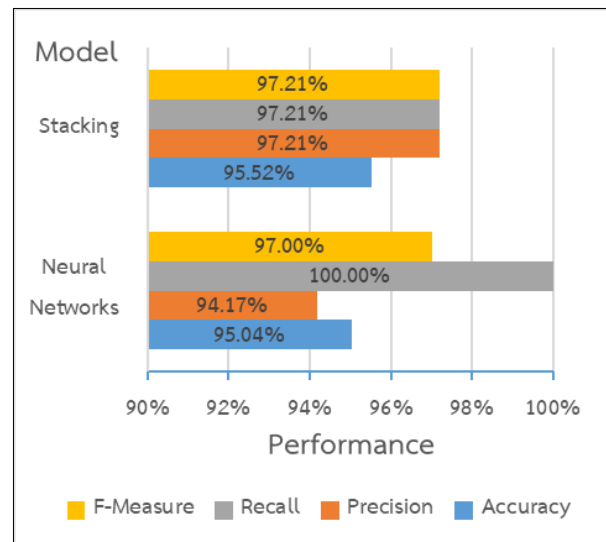
ขั้นตอนที่ 3 Output จะได้รับผลทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบปรับน้ำยาแปรผัน และนำมาประเมินประสิทธิภาพตัวแบบ ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 : ค่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Hybrid Ensemble Method

แบบ Stacking

Algorithm	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F-Measure (%)
Stacking	95.52	97.21	97.21	97.21
Neural Networks	95.04	94.17	100.00	97.00

จากตารางที่ 5 ตัวแบบมีค่าประสิทธิภาพ ค่าความแม่นยำ (accuracy) เท่ากับ 95.52% ค่าความเที่ยง (precision) เท่ากับ 97.21% ค่าความระลึก (recall) 97.21% และค่าความถ่วงดุล F-Measure 97.21%



รูปที่ 14 : กราฟแสดงประสิทธิภาพ Hybrid Ensemble

จากรูปที่ 14 กราฟค่าประสิทธิภาพที่ได้รับเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมในการใช้อัลกอริทึม Neural Networks เทียบกับการใช้การเรียนรู้ของเครื่องจากการใช้เทคนิค Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้นจากเดิมด้วยค่าความแม่นยำมากถึง 95.52% ค่าความเที่ยง 97.21% ค่าความระลึก 97.21% และค่าความถ่วงดุล 97.21% และเพื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาในการทำงานระหว่างอัลกอริทึม Neural Networks และวิธีการ Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 : เวลาเปรียบเทียบการคำนวณของอัลกอริทึม Neural Networks และ Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking

ครั้งที่	Neural Networks	Stacking
1	1.11	3.86
2	0.82	4.21
3	0.70	3.72
4	0.63	4.26
5	0.76	3.82
6	0.71	3.62
7	0.67	4.03
8	0.63	4.03
9	0.72	3.85
10	0.71	3.72
Average (S)	0.75	3.91

ทำให้ทราบเวลาในการคำนวณของอัลกอริทึม Neural Networks มีระยะเวลาในการคำนวณที่สั้นกว่าแบบ Stacking Model

6) อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาการพัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศที่มีผลต่ออาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องในส่วนเหตุการณ์การเสียของเครื่องปรับอากาศมาจากปริมาณสารทำความเย็นนี้ สามารถสรุปได้ว่าการเลือกใช้งานอัลกอริทึมสำหรับสร้างตัวแบบในการทำนายอาการเสียจากส่วนสารทำความเย็นนั้น การใช้เทคนิค Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking ใช้อัลกอริทึมที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดและรองลงมาสองอันดับ ได้แก่ Neural Networks และ Decision Tree และ Naive Bayes มีค่าประสิทธิภาพที่มีค่าความแม่นยำ ค่าความเที่ยง ค่าระลึก และค่าความถ่วงดุลที่สูงที่สุดในการเปรียบเทียบค่าจากอัลกอริทึมทั้ง 4 แบบ และแบบ Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking

จึงทำให้สามารถสรุปผลการพัฒนาตัวแบบในการทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องในส่วนสารทำความเย็นเพื่อช่วยในการทำนายอาการเสีย จากการใช้อัลกอริทึมแบบ Hybrid Ensemble Model ช่วยในการเรียนรู้ของเครื่อง

7) สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยในวัตถุประสงค์นี้ เพื่อพัฒนาตัวแบบทำนายอาการเสียของเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผัน โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง จากชุดข้อมูลระบบเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบปรับน้ำยาแปรผันที่มีข้อมูลในส่วนเหตุการณ์การเสียของเครื่องปรับอากาศมาจากปริมาณสารทำความเย็น และส่วนของ รายละเอียดข้อมูล อุณหภูมิ ข้อมูลแรงดัน และส่วนฉลากที่ระบุถึงสถานะอาการที่มีสาเหตุจากสารทำความเย็น นั้นมีระบุเป็นคุณลักษณะชื่อ Label โดยทางผู้วิจัยนำชุดข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ โดยชุดโปรแกรม RapidMiner Studio ในการสร้างตัวแบบจากอัลกอริทึมทั้ง 4 ประเภท ได้แก่ Decision Tree, Naive Bayes, Support Vector Machine และ Neural Networks มาเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม ในการขยายผลตัวแบบทำนาย ทางผู้วิจัยได้ทำการเลือกอัลกอริทึมในการสอนการเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้เทคนิค Hybrid Ensemble Method แบบ Stacking ใช้อัลกอริทึม 2 ชนิด คือ Neural Networks และ Decision Tree และใช้อัลกอริทึมในการตัดสินใจเป็น Naive Bayes ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้นจากเดิม ทำให้ตัวแบบสามารถทำนายอาการเสียของเครื่องได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยมีค่าความแม่นยำ (accuracy) 95.52%, ค่าความเที่ยง (precision) 97.21%, ค่าความระลึก (recall) 97.21% ค่าความถ่วงดุล (F-Measure) 97.00%

8) ข้อจำกัดของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาระบบสารทำความเย็นในระบบปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบน้ำยาแปรผัน โดยที่ตัวแบบนี้สร้างขึ้นเฉพาะทำนายอาการเสียในส่วนเหตุการณ์การเสียของเครื่องปรับอากาศมาจากปริมาณสารทำความเย็นนั้นข้อจำกัดในเรื่องจำนวนชุดคอยล์ร้อน และชุดคอยล์เย็น

9) ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ เนื่องจากระบบปรับอากาศชนิดรวมศูนย์มีข้อมูลและพีเจอร์ที่หลากหลายที่ใช้ในการทำนายอาการในลักษณะหรือสาเหตุอื่น และด้วยลักษณะของตัวระบบมีความซับซ้อนในการทำงานของระบบทำให้ ผู้ตรวจสอบอาจเกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์อาการเสีย รวมถึงความหลากหลายของ

ชนิดคอยล์เย็น และคอยล์ร้อน อาจทำให้มีความหลากหลายใน
อาการเสียมากขึ้น

ด้วยข้อจำกัดของชุดข้อมูลที่มีสถานะการทำงานปกติ และ
อาการเสียจากสารทำความเย็นภายในระบบไม่เท่ากัน โดยมีการ
ทำงานปกติที่มากกว่า อาจทำให้เกิดผลกระทบในการสอนการ
เรียนรู้ของเครื่องโดยตรง ในจุดที่กล่าวนี้สามารถใช้วิธีการ SMOTE
(Synthetic Minority Over-sampling Technique) เป็นวิธีการ
จัดการเกี่ยวกับข้อมูลที่ไม่สมดุล (Class imbalance) ได้อีกวิธี
เช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เบตเตอร์ คู
จำกัด ในชุดข้อมูลเครื่องปรับอากาศชนิดรวมศูนย์แบบระบบ
ปรับน้ำยาแปรผัน (VRF_DATA_CSV_FCU_14.CSV) และขอ
ขอบคุณ ท่าน ศ. ดร.ประสงค์ ปราณีตพลกรัง อาจารย์ที่ปรึกษา
และคณะทำงานที่ให้คำปรึกษา สนับสนุนและแนะนำในงานวิจัย
นี้ จนเสร็จสมบูรณ์

REFERENCES

- [1] Department of Public Works and Town & Country Planning. "Roles and Responsibilities." DPT.go.th. <https://www.dpt.go.th/th/powers-and-duties-of-departments-and-government-agencies> (accessed Oct. 19, 2023).
- [2] Green Government Office Design Guidelines for New Construction. G-Goods : NC Version 1.0 (in Thai), Department of Public Works and Town & Country Planning, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://www.dpt.go.th/th/documents-dpt/961>
- [3] R. E. Neapolitan and X. Jiang, *Artificial Intelligence: With an Introduction to Machine Learning*, 2nd ed. New York, NY, USA: Chapman and Hall/CRC Press, 2018.
- [4] T. Jo, "Introduction," in *Machine Learning Foundations: Supervised, Unsupervised, and Advanced Learning*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2021, ch. 1, pp. 1–15.
- [5] B. Charbuty and A. M. Abdulazeez, "Classification based on decision tree algorithm for machine learning," *J. Appl. Sci. Technol. Trends*, vol. 2, no. 1, pp. 20–28, Jan. 2021.
- [6] N. S. Chauhan. "Decision Tree Algorithm, Explained." KDNUGGETS.com. <https://www.kdnuggets.com/2020/01/decision-tree-algorithm-explained.html> (accessed Feb. 19, 2024).
- [7] T. N. Viet, H. L. Minh, L. C. Hieu, and T. H. Anh, "The Naïve Bayes algorithm for learning data analytics," *Indian J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 1038–1043, 2021.
- [8] R. Akbani, S. Kwek, and N. Japkowicz, "Applying support vector machines to imbalanced datasets," in *Proc. 15th Eur. Conf. Mach. Learn.*, Pisa, Italy, Sep. 2004, pp. 39–50.
- [9] A. C. Müller and S. Guido, "Supervised Learning," in *Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2016, ch. 2, pp. 106–120.
- [10] S. Bandgar. "Support Vector Machine." MEDIUM.com. <https://medium.com/nerd-for-tech/support-vector-machine92fa3c57d33b> (accessed Feb. 19, 2024).
- [11] S. Krishna. "Building an Artificial Neural Network(ANN)." MEDIUM.com. <https://medium.com/@saikrishna3599/building-an-artificial-neural-network-ann-502a63d76fb3> (accessed Jun. 30, 2020).
- [12] S. Pal and S. Paul, "Linking hydrological security and landscape insecurity in the moribund deltaic wetland of India using tree-based hybrid ensemble method in python," *Ecological Inform.*, vol. 65, Sep. 2021, Art. no. 101422.
- [13] J. Zhao, J. Jin, S. Chen, R. Zhang, B. Yu, and Q. Liu, "A weighted hybrid ensemble method for classifying imbalanced data," *Knowl.-Based Syst.*, vol. 203, Jun. 2020, Art. no. 106087.
- [14] T. Srivastava. "12 Important Model Evaluation Metrics for Machine Learning Everyone Should Know (Updated 2023)." ANALYTICSVIDHYA.com. <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2019/08/11-important-model-evaluation-error-metrics/> (accessed Jan. 8, 2024).
- [15] A. Elmouatamid, B. Fricke, J. Sun, and P. W. T. Pong, "Air conditioning systems fault detection and diagnosis-based sensing and data-driven approaches," *Energies*, vol. 16, no. 12, Jun. 2023, Art. no. 4721.
- [16] M. Yang, L. Cheng, M. Cao, and X. Yan, "A stacking ensemble learning method to classify the patterns of complex road junctions," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 11, no. 10, Oct. 2022, Art. no. 523, doi: 10.3390/ijgi11100523.

การศึกษาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ความสามารถในการทำงานได้ และกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชัน

จักรพันธ์ วงษ์พา¹ ไชยพัฒน์ ทวีทรัพย์พิทักษ์^{2*} สีนาด โกศลนันท์³ กรพินธุ์ อาระหงษ์⁴

^{1,2*,3,4}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี, จันทบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : chaiyapat.t@rbru.ac.th

รับต้นฉบับ : 18 เมษายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 9 กรกฎาคม 2567; ตอรับบทความ : 6 สิงหาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันชนิดแอมโมเนียต่ำ โดยทางคุณสมบัติทางกายภาพพิจารณาความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ รวมถึงความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ ส่วนคุณสมบัติทางกลได้ศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน กำหนดอัตราส่วนการแทนที่ด้วยน้ำยางชันเท่ากับร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำ ผลการทดลองพบว่าน้ำยางชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ และระยะเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ยังทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาค่าการไหลให้คงที่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 ส่วนกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมและพบว่าการแทนที่น้ำยางชันในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำเป็นอัตราการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้กำลังอัดสูงสุดรองจากมอร์ตาร์ชุดควบคุม กล่าวคือมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 29.68 MPa ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานทั่วไป และยังมีระยะเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุมถึง 30 นาที ซึ่งจะทำให้การทำงานสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : ซีเมนต์เพสต์ กำลังอัด น้ำยางชัน ระยะเวลาการก่อตัว ความสามารถในการทำงานได้

A Study of Setting Time of Cement Paste, Workability and Compressive Strength of Mortar Mixed with Concentrated Latex

Jakrapan Wongpa¹ Chaiyapat Thaweesapphithak^{2*} Sinat Koslanant³ Gorapin Arahung⁴

^{1,2*,3,4}*Department of Civil Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: chaiyapat.t@rbru.ac.th

Received: 18 April 2024; Revised: 9 July 2024; Accepted: 6 August 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

The objective of this research is to study the physical and mechanical properties of cement paste and mortar mixed with the Low Ammonia Concentrate Latex (LA-TZ). For physical properties, the normal consistency and the initial setting time of the cement paste samples are determined as well as the workability of the mortar samples. For the mechanical properties, the compressive strength of mortar mixed with concentrated latex are studied at the ages of 3, 7, 14, and 28 days. The replacement ratios of concentrated latex were 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 percent by weight of water. The results of the experiment showed that concentrated latex causes the cement paste to require more water content to obtain the normal consistency condition as well as the increasing of the initial setting time. It also causes the flow value of the mortar to be increased as well. It continues to increase water requirement to maintain the flow value of 110±5 period. It is also found that replacing concentrated latex at a ratio of 1.0 percent by weight of water is the most appropriate replacement rate because it provides the highest compressive strength after the control mixture. The compressive strength of the mortar at the age of 28 days to 29.7 MPa, which is sufficient for general use. Moreover, the initial setting time has been increased to 30 minutes from the control mixture, which makes the operation even more comfortable.

Keywords: Cement paste, Compressive strength, Concentrated latex, Setting time, Workability

1) บทนำ

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมวัสดุประเภทยางโดยเฉพาะน้ำยางจากต้นยางพาราส่วนมากมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติบางประการให้กับคอนกรีต เช่น กำลังอัด การดูดซึมน้ำ กำลังัดความทนทานต่อสภาวะกรดและซัลเฟต และการหดตัว เป็นต้น [1]–[11] ซึ่งงานผลจากการวิจัยส่วนมากพบว่าการใช้ยางพาราเป็นส่วนผสมในคอนกรีตมักทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความสามารถในการทำงานได้ลดลง ซึ่งโดยปกติแล้วความสามารถในการทำงานได้และกำลังอัดของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากคอนกรีตที่มีความชื้นเหลือของคอนกรีตสูงจะมีความสามารถในการทำงานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูง [12] และส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย [13] ดังนั้น คอนกรีตที่ดีย่อมต้องมีความชื้นเหลือที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังอัดตามต้องการ แต่กลับพบว่าในปัจจุบันยังมียางที่ศึกษาความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราอยู่น้อยมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชั้นมีความชื้นเหลือปกติเทียบเท่าซีเมนต์เพสต์แบบดั้งเดิม รวมถึงการศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชั้นในอัตราส่วนต่าง ๆ อีกทั้งยังศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมน้ำยางชั้นโดยควบคุมค่าการไหลให้อยู่ในช่วงการไหลที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ASTM C109/109M-23 [14] ผลจากการวิจัยนี้จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความสำคัญของความสามารถในการทำงานได้ต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางชั้น ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมน้ำยางชั้นให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงต่อไป

2) วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชั้นมีความชื้นเหลือปกติเทียบเท่าซีเมนต์เพสต์แบบดั้งเดิม รวมถึงการศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชั้นในอัตราส่วนต่าง ๆ
2. ศึกษา กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมน้ำยางชั้นโดยควบคุมค่าการไหลให้อยู่ในช่วงการไหลที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ASTM C109/109M-23

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) วัสดุ

3.1.1) *น้ำยางชั้น* ใช้เป็นประเภทแอมโมเนียต่ำ (low ammonia) ผสมเทตระเมทิลไทยูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide: TMTD) ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เพื่อรักษาสภาพน้ำยาง หรือที่รู้จักกันในชื่อ LA-TZ จาก บริษัท ดี.เอส.รับเบอร์แอนด์ลาเท็กซ์ จำกัด อัตราส่วนการแทนที่น้ำยางชั้นร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำ

3.1.2) *ปูนซีเมนต์* ใช้เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 [15] เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม [16] เป็นปูนซีเมนต์ใหม่ ไม่เป็ยกขึ้นหรือจับตัวเป็นก้อน

3.1.3) *มวลรวมละเอียด* ใช้เป็นทรายแม่น้ำล้างสะอาด โดยมีขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 16 และค้างตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200

3.1.4) *น้ำ* น้ำในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ตลอดงานวิจัยนี้มาจาก 2 ส่วน ส่วนแรกคือน้ำประปาที่ผลิตเองภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี และส่วนที่ 2 คือน้ำที่อยู่ในส่วนผสมของน้ำยางชั้น ซึ่งน้ำยางชั้นมีน้ำผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

3.2) วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1) *การคำนวณปริมาณน้ำในส่วนผสม* เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของน้ำยางชั้น ต่อคุณสมบัติทางกายภาพซีเมนต์เพสต์โดยเฉพาะความสามารถในการทำงานได้ และกำลังอัดของมอร์ตาร์ ดังนั้น การควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ให้ถูกต้องจึงมีความสำคัญมาก และเนื่องจากน้ำยางชั้นมีปริมาณน้ำผสมอยู่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ดังนั้น ในส่วนผสมซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของน้ำยางชั้นจึงคิดปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำยางชั้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก รวมกับน้ำประปา เพื่อคำนวณปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ให้ถูกต้องตามจริง

3.2.2) *ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชั้น* การหาความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ทุกส่วนผสมดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C187-23 [17] โดยกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 650 กรัม และปรับปริมาณน้ำด้วยวิธีการแบบสุ่ม ดังตารางที่ 1 ซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการผสมจะถูกนำไปทดสอบแบบไวแคตโดยกำหนดระยะเวลาปล่อยตกเท่ากับ 30 วินาที บันทึกค่าระยะจมไว้ จากนั้นให้ปรับปริมาณน้ำใหม่

ให้ทดสอบซ้ำจนกว่าจะมีค่าระยะจมทั้งที่มากกว่าและน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำค่าปริมาณน้ำและระยะจมไปสร้างเป็นแผนภูมิความสัมพันธ์ โดยปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มโวลแคตจมลงในเนื้อซีเมนต์เพสต์ลิก 10 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 30 วินาที คือปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีความชื้นเลวปกติ

ตารางที่ 1 : สัดส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชันเพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่ความชื้นเลวปกติ

ส่วนผสม	ตัวอย่างที่	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำยางชัน (กรัม)	น้ำ (กรัม)	
				น้ำในน้ำยางชัน (กรัม)	น้ำประปา (กรัม)
CT	1	650	0.00	0.00	189.00
	2	650	0.00	0.00	195.00
	3	650	0.00	0.00	208.00
0.5L	1	650	0.95	0.38	188.62
	2	650	0.98	0.39	194.61
	3	650	1.04	0.42	207.58
1.0L	1	650	2.08	0.83	207.17
	2	650	2.15	0.86	214.14
	3	650	2.21	0.88	220.12
1.5L	1	650	3.23	1.29	213.71
	2	650	3.32	1.33	219.67
	3	650	3.42	1.37	226.63
2.0L	1	650	4.30	1.72	213.28
	2	650	4.42	1.77	219.23
	3	650	4.56	1.82	226.18

หมายเหตุ : ตัวเลขที่ปรากฏในสัญลักษณ์ของส่วนผสมหมายถึงอัตราส่วนการแทนที่น้ำด้วยน้ำยางชันในหน่วยร้อยละ

3.2.3) ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชัน ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ทุกส่วนผสมที่ได้จากการหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเลวปกติในหัวข้อ 3.2 จะนำมาทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำยางชันที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C191-21 [18]

3.2.4) การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชัน ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบการไหลแผ่เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ โดยกำหนดให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ซึ่งปริมาณน้ำในส่วนผสม

จะใช้การทดลองแบบสุ่มเพื่อหาปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ตาร์ส่วนผสมนั้น ๆ มีค่าการไหลแผ่ตามที่กำหนด อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก โดยที่ทั้งค่าการไหลแผ่และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเป็นไปตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C109/C109M-23 [14] เพื่อให้ได้มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการทำงานได้เทียบเท่ากันตามมาตรฐาน แล้วจึงนำไปทดสอบกำลังอัดต่อไป ส่วนวิธีทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1437-20 [19]

3.2.5) กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชัน หลังจากทราบปริมาณน้ำที่ทำให้ค่าการไหลแผ่เท่ากับ 110 ± 5 แล้ว จึงทำการหล่อตัวอย่างลงในแบบหล่อ โดยก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนเป็นทรงลูกบาศก์มีความยาวด้านละ 5 เซนติเมตร หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมงแล้วจึงถอดแบบและบดตัวอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุทดสอบกำลังอัด โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ วิธีการทดสอบกำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-23 [14]

4) ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1) ปริมาณน้ำที่ความชื้นเลวปกติ

ตารางที่ 2 : ระยะจมของหัวทดสอบโวลแคตในซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชันที่มีปริมาณน้ำแตกต่างกัน

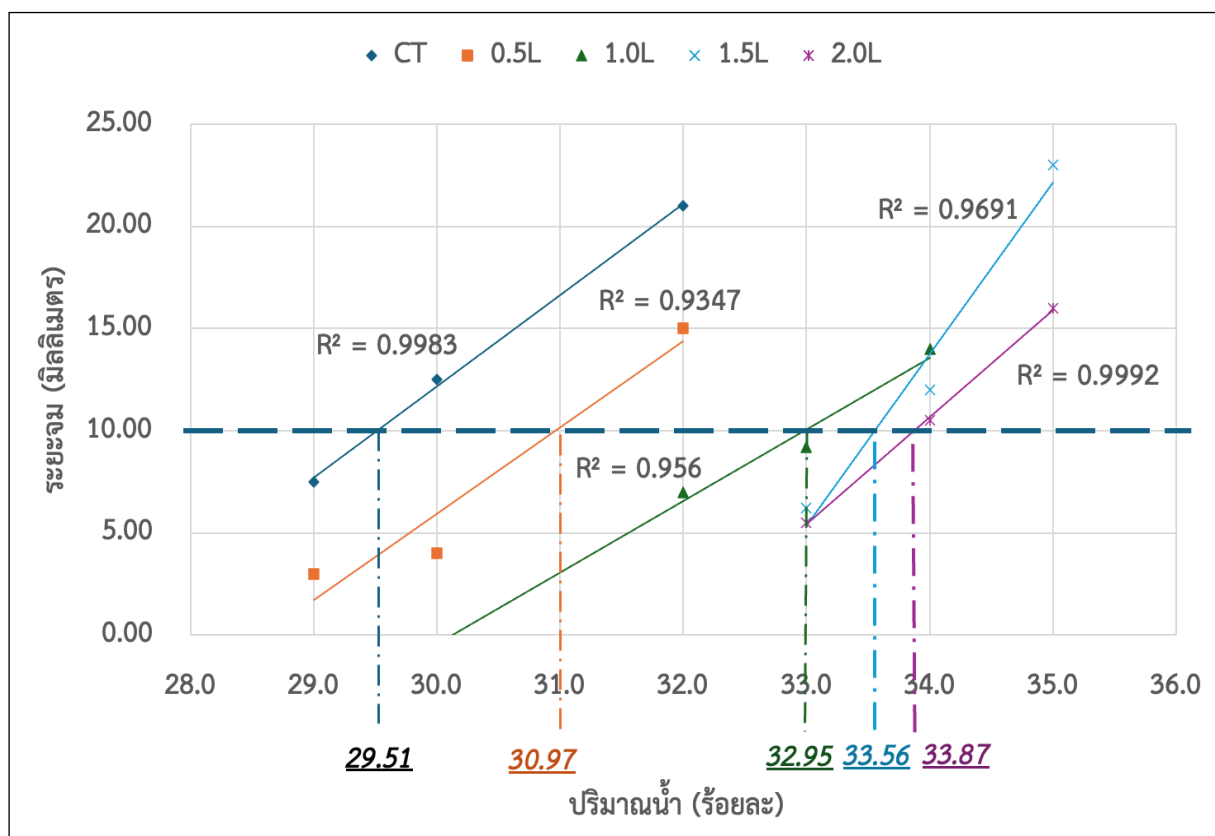
ส่วนผสม	ตัวอย่างที่	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ		ระยะจม (มม.)
			(กรัม)	(ร้อยละ)	
CT	1	650	189.00	29.08	7.50
	2	650	195.00	30.00	12.50
	3	650	208.00	32.00	21.00
0.5L	1	650	189.00	29.08	3.00
	2	650	195.00	30.00	4.00
	3	650	208.00	32.00	15.00
1.0L	1	650	208.00	32.00	7.00
	2	650	215.00	33.08	9.20
	3	650	221.00	34.00	14.00
1.5L	1	650	215.00	33.08	6.20
	2	650	221.00	34.00	12.00
	3	650	228.00	35.08	23.00
2.0L	1	650	215.00	33.08	5.50
	2	650	221.00	34.00	10.50
	3	650	228.00	35.08	16.00

จากการทดลองหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชันได้ผลการทดสอบระยะจมของหัวทดสอบไวแคตในตารางที่ 2 ซึ่งสามารถนำไปสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและระยะจมของหัวทดสอบไวแคตได้ดังรูปที่ 1 จากรูปพบว่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำยางชันร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.51, 30.97, 32.95, 33.56 และ 33.87 ตามลำดับ และจากผลการทดสอบทำให้พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองในแต่ละส่วนผสมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (R-Square) เกิน 0.9 ทุกส่วนผสม

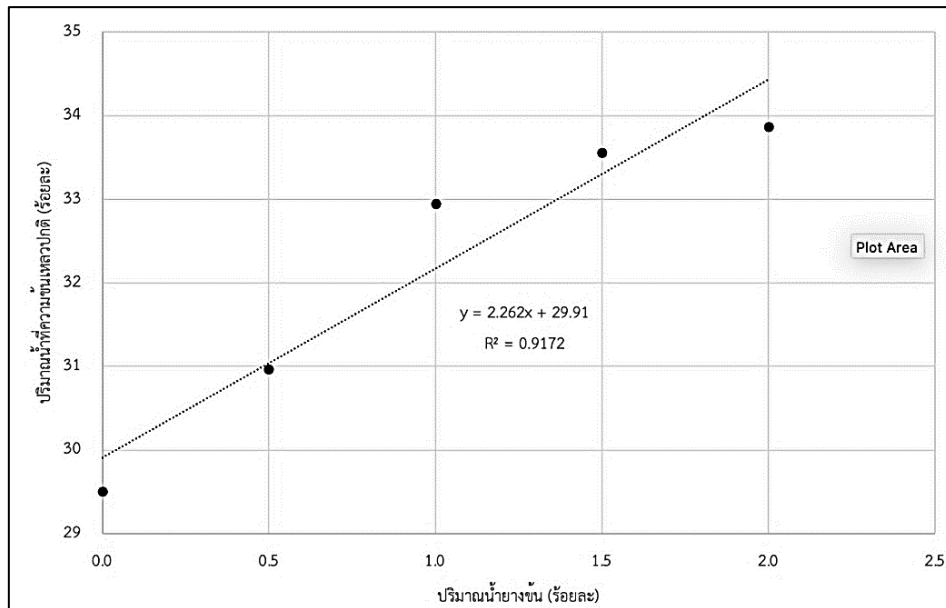
ซึ่งกล่าวได้ว่ายิ่งส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์มีปริมาณน้ำยางชันมากขึ้นยิ่งส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำสูงขึ้นเพื่อรักษาให้เนื้อของซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวเท่าเดิม ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 2 ซึ่งสมการเส้นตรงในรูปดังกล่าวสามารถใช้ทำนายปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำยางชันอื่น ๆ ได้เนื่องจากมีค่า R-Square ที่ 0.92

4.2) ผลทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชัน

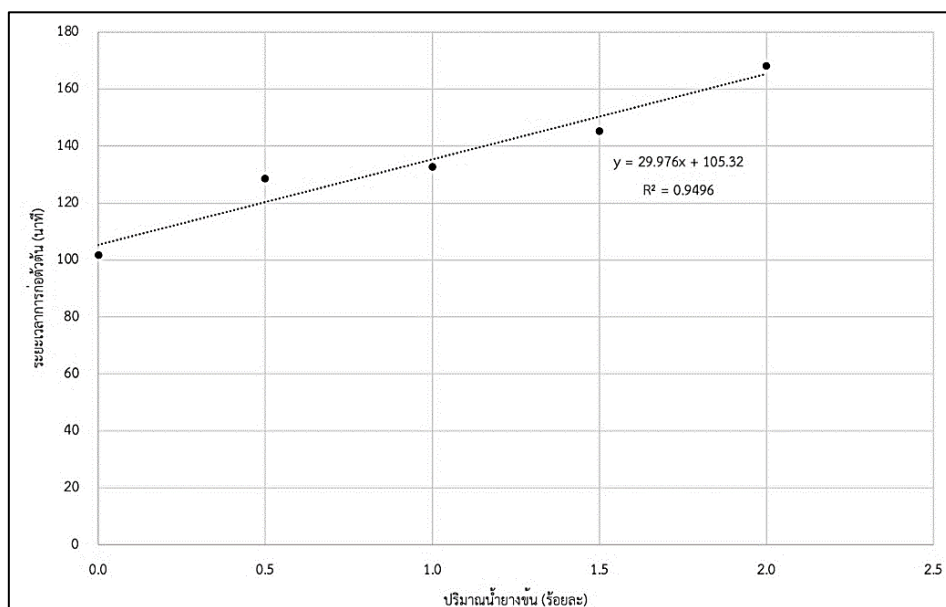
จากการทดสอบพบว่าปริมาณน้ำยางชันส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์อย่างมีนัยสำคัญและผลการทดสอบที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 3 ซึ่งจากข้อมูลในตารางพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำยางชันที่เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำยางชันร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำ ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นประมาณ 27 นาที หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 26 เมื่อเทียบกับส่วนผสมชุดควบคุม (CT) ในขณะที่ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำยางชันร้อยละ 2.0 ซีเมนต์เพสต์จะมีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 65 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 65 เมื่อเทียบกับส่วนผสมชุด CT ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าปริมาณน้ำมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์อย่างมาก เนื่องจากอนุภาคของยางมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 200–800 นาโนเมตร [20], [21] ในขณะที่อนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 10–60 ไมโครเมตร [22]



รูปที่ 1 : ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของหัวทดสอบไวแคตและปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำยางชันแตกต่างกัน



รูปที่ 2 : ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและปริมาณน้ำยั้งของซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 3 : ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวและปริมาณน้ำยั้งของซีเมนต์ผสมน้ำยั้ง

ในขณะที่ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำยั้งร้อยละ 2.0 ซีเมนต์เพสต์จะมีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 65 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 65 เมื่อเทียบกับส่วนผสมชุด CT ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าน้ำยั้งมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์อย่างมาก เนื่องจากอนุภาคของยางมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 200–800 นาโนเมตร [20], [21] ในขณะที่อนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 10-60 ไมโครเมตร [22] ซึ่งจะทำให้เห็นว่าอนุภาคของยางเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์โดยเฉลี่ยประมาณ

50 เท่า จึงอาจเป็นไปได้ว่าอนุภาคของน้ำยั้งเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์กับน้ำบริเวณผิวเม็ดปูนซีเมนต์ทำให้อนุภาคน้ำเข้าถึงอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ได้ยาก [20] รูปที่ 3 ได้เสนอสมการที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยั้งในปริมาณต่างๆ ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยั้งได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากมีค่า R-Square สูงถึง 0.95

ตารางที่ 3 : ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางชันในสัดส่วนต่าง ๆ

ส่วนผสม	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)
CT	101.72
0.5L	128.48
1.0L	132.69
1.5L	145.38
2.0L	166.21

ตารางที่ 4 : ผลทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (กรัม)	น้ำในยางชัน (กรัม)	ปริมาณน้ำสุทธิ (กรัม)	ค่าการไหล (ร้อยละ)
CTM	1000	2750	690	0	690	113.9
0.5LM	1000	2750	669	1	670	112
1.0LM	1000	2750	667	3	670	111.4
1.5LM	1000	2750	676	4	680	106.2
2.0LM	1000	2750	694	6	700	108.3

ตารางที่ 5 : ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ส่วนผสม	กำลังอัด (MPa)				น้ำหนัก (กรัม)
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
CTM	23.11 (100%)	27.59 (100%)	30.42 (100%)	33.12 (100%)	271
0.5LM	19.45 (84.18%)	23.73 (86.00%)	26.35 (86.61%)	28.27 (85.36%)	264
1.0LM	22.28 (96.42%)	25.92 (93.95%)	29.46 (96.86%)	29.68 (89.61%)	262
1.5LM	19.69 (85.22%)	23.98 (86.90%)	24.61 (80.91%)	27.56 (83.22%)	257
2.0LM	19.17 (82.96%)	21.06 (76.33%)	21.07 (69.27%)	22.93 (69.25%)	256

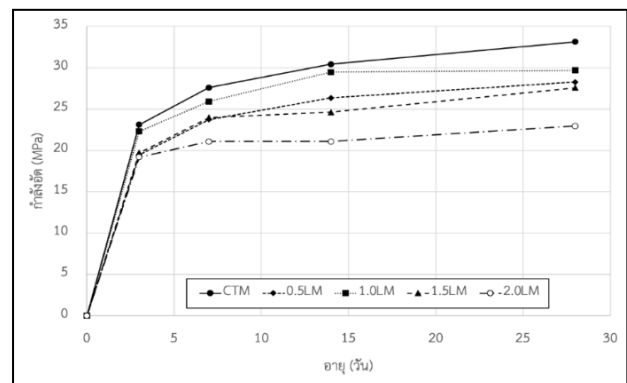
4.3) ผลการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชัน

จากการทดลองได้ค่าการไหลของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันในตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าส่วนผสมมอร์ตาร์ 0.5LM ที่มีปริมาณน้ำยางชันผสมอยู่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำจะส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำลดลงจาก 690 กรัมเป็น 670 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (Control Mortar: CTM) เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้หรือค่าการไหลแผ่วไว้ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ส่วนมอร์ตาร์ 1.0LM และ 1.5LM แม้จะยังมีความต้องการน้ำน้อยกว่า CTM แต่กลับพบว่ามีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับส่วนผสม 0.5LM ในขณะที่

ตัวอย่าง 2.0LM มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและมากกว่า CTM จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อน้ำยางชันจะทำให้ค่าการไหลของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น แต่การใส่น้ำยางชันในปริมาณที่มากขึ้นก็จะส่งผลให้มอร์ตาร์มีความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน และค่าปริมาณน้ำมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันมีแนวโน้มจะมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเมื่อมีการแทนที่น้ำยางชันในอัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 2.0 ขึ้นไป

4.4) กำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 4 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม CTM มีกำลังอัดสูงสุดทุกอายุการทดสอบ สำหรับส่วนผสมที่มีน้ำยางชันเป็นส่วนประกอบพบว่าที่อายุ 28 วัน 1.0LM มีกำลังอัดสูงที่สุด และมีกำลังอัดประมาณร้อยละ 89.61 ของส่วนผสม CTM ส่วนผสมที่มีกำลังอัดในลำดับถัดมาได้แก่ 0.5LM, 1.5LM และ 2.0LM ตามลำดับ



รูปที่ 4 : ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ซึ่งพบว่ากำลังอัดของส่วนผสมดังกล่าวมีค่าเทียบเท่ากับร้อยละ 85.36, 83.22 และ 69.25 ของส่วนผสม CTM ตามลำดับ ซึ่งในแง่ของกำลังอัดพบว่าการแทนที่น้ำยางชันในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของน้ำสามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากมีกำลังอัดลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม สาเหตุที่ทำให้มอร์ตาร์ผสมน้ำยางชันมีกำลังอัดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเนื่องมาจากอนุภาคของยางจะจับตัวกันเป็นฟิล์มบาง ๆ ซึ่งฟิล์มดังกล่าวจะขัดขวางการยึดเกาะกันระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม จึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ไม่สมบูรณ์ [23] ซึ่ง

หลักฐานดังกล่าวนี้สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลทดสอบระยะเวลาการก่อตัวต้นและค่าการไหลแผ่ข้างต้น อนุภาคภายในส่วนผสม นอกจากจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและขัดขวางการยึดเกาะกันระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมแล้วยังพบว่าชั้นฟิล์มดังกล่าวยังส่งผลต่อความหนาแน่นของมอร์ตาร์ดังรูปที่ 5 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์จะลดลงตามปริมาณน้ำยางชั้นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้รูปที่ 5 ยังเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนการแทนที่ด้วยน้ำยางชั้น ซึ่งสมการดังกล่าวมีความแม่นยำเนื่องจากมีค่า R-Square เท่ากับ 0.9377 ทั้งนี้ยังพบว่าตัวอย่าง 2.0LM มีความหนาแน่นลดลงจากมอร์ตาร์ควบคุมถึงประมาณร้อยละ 5 จึงส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลงของมอร์ตาร์ในชุดดังกล่าวอย่างเห็นได้ชัด

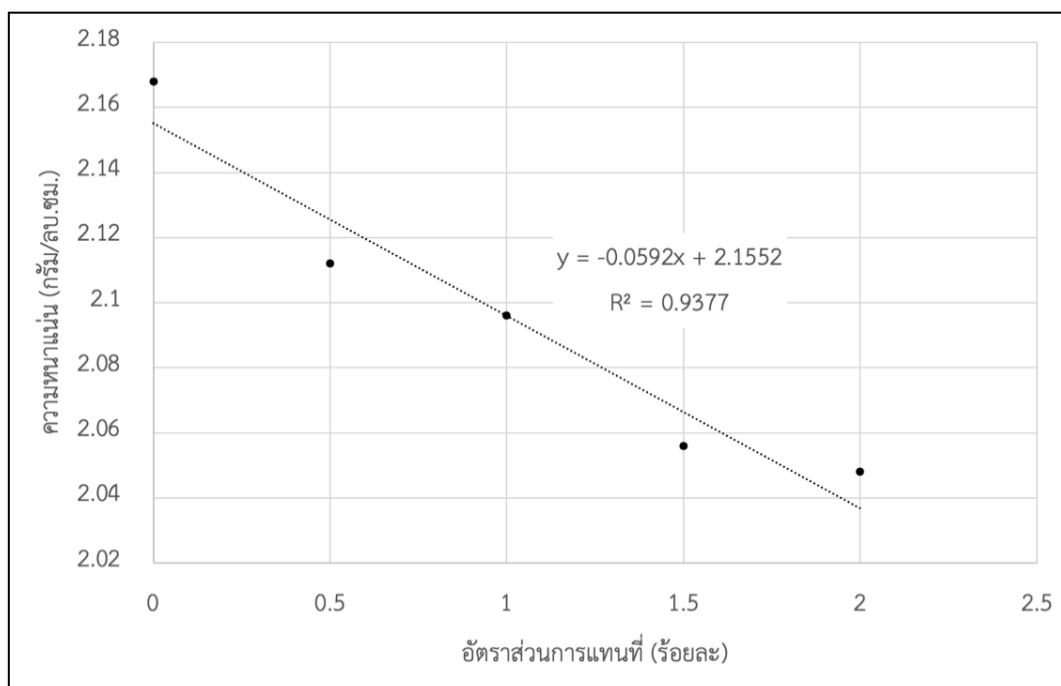
5) สรุปผล

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าน้ำยางชั้นส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาความชื้นเหลวปกติเอาไว้ได้ และยังส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นอย่างน้อยร้อยละ 26 เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม นอกจากนี้ น้ำยางชั้นยังส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการปริมาณน้ำลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมเพื่อรักษาค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากน้ำยางชั้นไปขัดขวางการ

ยึดเกาะกันระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ส่งผลให้มอร์ตาร์ผสมน้ำยางชั้นมีกำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และยังส่งผลให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นลดลงตามปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น ปริมาณการแทนที่น้ำยางชั้นที่ดีที่สุดคือร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำ เนื่องจากเป็นส่วนผสมที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวต้นมากขึ้น ในขณะที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดในกลุ่มของมอร์ตาร์ที่มีน้ำยางชั้นในส่วนผสม และจากการที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวช้าลงจะทำให้มอร์ตาร์ในตัวคอนกรีตมีเวลาในการทำงานที่ช้าขึ้น ส่งผลให้การทำงานในด้านคอนกรีตมีเวลาในการทำงานมากขึ้น เช่น การปรับแต่งคอนกรีต เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ปีงบประมาณ 2566 รหัสทุนที่ 2230/2566 ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งงบประมาณสนับสนุนข้างต้น รวมถึงคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี และบุคลากรประจำห้องปฏิบัติการคอนกรีตและโครงสร้าง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ Malay Hin และมณีนววรรณ สุวันดี ศิษย์เก่าระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่ช่วยดำเนินการทดสอบจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี



รูปที่ 5 : ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางชั้นกับอัตราส่วนการแทนที่

REFERENCES

- [1] C. Kererat, W. Kroehong, S. Thaipun, and P. Chindaprasit, "Bottom ash stabilized with cement and para rubber latex for road base applications," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, Dec. 2022, Art. no. e01259, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01259.
- [2] M. Hoy *et al.*, "Effect of wetting and drying cycles on mechanical strength of cement-natural rubber latex stabilized recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 394, Aug. 2023, Art. no. 132301, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132301.
- [3] P. Choi and K.-K. Yun, "Experimental analysis of latex-solid content effect on early-age and autogenous shrinkage of very-early strength latex-modified concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 396–404, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.007.
- [4] A. S. Al-Luhybi, I. A. Aziz, and K. I. Mohammad, "Experimental assessment of mechanical and physical performance of latex modified concrete with fine recycled aggregate," *Structures*, vol. 48, pp. 1932–1938, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jistruc.2023.01.069.
- [5] T. Yaowarat *et al.*, "Improvement of flexural strength of concrete pavements using natural rubber latex," *Constr. Build. Mater.*, vol. 282, May 2021, Art. no. 122704, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122704.
- [6] F. Moodi, A. Kashi, A. A. Ramezaniapour, and M. Pourebrahimi, "Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 145–154, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.198.
- [7] H. Bilal, T. Chen, M. Ren, X. Gao, and A. Su, "Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 275, Mar. 2021, Art. no. 122124, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122124.
- [8] B. Muhammad and M. Ismail, "Performance of natural rubber latex modified concrete in acidic and sulfated environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 129–134, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.099.
- [9] P. Khamput and K. Suweero, "Properties of mortar mixing with medium ammonia concentrated latex," *Energy Procedia*, vol. 9, pp. 559–567, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.09.065.
- [10] P. Nirot, P. Sutthiwattana, and J. Wongpa, "Effects of surfactant on compressive strength and density of concrete containing para rubber latex," (in Thai), *J. King Mongkut's Univ. Technol. North Bangkok*, vol. 33, no. 2, pp. 603–612, 2023.
- [11] B. Warinlai, U. Patipanpoomsakul, and P. Krammart, "Basic properties and carbonation of concrete with partial replacement of cement by rubber latex and limestone powder," (in Thai), *J. Ind. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 125–142, 2002.
- [12] J. Ahmad, O. Zaid, M. S. Siddique, F. Aslam, H. Alabduljabbar, and K. M. Khedher, "Mechanical and durability characteristics of sustainable coconut fibers reinforced concrete with incorporation of marble powder," *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 7, 2021, Art. no. 075505, doi: 10.1088/2053-1591/ac10d3.
- [13] S. Iffat, "Relation between density and compressive strength of hardened concrete," *Concrete Res. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 182–189, Dec. 2015.
- [14] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M-20, Mar. 2020. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0109_c0109m-20.html
- [15] *Thai Industrial Standard: Hydraulic Cement*, TIS 2594–2556, Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 2013.
- [16] *Notification of Ministry of Industry: The Hydraulic Cement Industry Product is Specified as a Material for Making Industrial Products, Concrete and Cement Product Groups (no. 6819), B. E. 2565*, Thai Government Gazette 139(282D), Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, Dec. 1, 2022.
- [17] *Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*, ASTM C187-16, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://www.astm.org/c0187-16.html>
- [18] *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM C191-21, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://www.astm.org/standards/c191>
- [19] *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, ASTM C1437-20, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://www.astm.org/c1437-20.html>

- [20] Y.-C. Wei, D. Zhu, W.-Y. Xie, J.-H. Xia, M.-F. He, and S. Liao, "In-situ observation of spatial organization of natural rubber latex particles and exploring the relationship between particle size and mechanical properties of natural rubber," *Indus. Crops Prod.*, vol. 180, Jun. 2022, Art. no. 114737, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.114737.
- [21] Y. Guo, K. Bao, X. Wu, D. Han, and J. Zhang, "Morphology and aggregation process of natural rubber particles," *Indus. Crops Prod.*, vol. 203, Nov. 2023, Art. no. 117153, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117153.
- [22] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete Technology*, 2nd ed. Harlow, England: Prentice Hall, 2010.
- [23] Y. Ohama, "Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes adhesion; binders (materials); bond (paste to aggregate); carbonation; chlorides; curing; diffusion;," *Mater. J.*, vol. 84, no. 6, pp. 511–518, Nov. 1987.

An Investigation of CFRP Laminates Cured in a Commercial Toaster Oven: Quality and Economic Assessment

Pimpet Sratong-on¹ Titirat Vivithkeyoonvong² Sutep Joy-A-Ka³ Sawanya Suwannawong^{4*}

^{1,4*}*Composite Materials and Lightweight Structures Laboratory, Faculty of Engineering,
Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

²*Advanced Mobility and Propulsion Research Laboratory, Faculty of Engineering,
Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

³*Materials Properties and Failure Analysis Laboratory,
Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Pathum Thani, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: sawanya@tni.ac.th

Received: 19 July 2024; Revised: 12 November 2024; Accepted: 12 November 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

This study demonstrated the ability to produce high-quality carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) laminates with low void contents using a single cure cycle setting up in commercial toaster oven via Vacuum-Bag-Only (VBO) process. The results were discussed in quality and economic views. X-ray micro-CT 3D images of the resulting laminates revealed the 0.28% void content; therefore, it can be classified as very good quality by Purslow chart. Tensile (ASTM D3039) and flexural (ASTM D790) tests were conducted and the results were compared to void-free laminate considered in finite element analysis. The high tensile and flexural strength of laminates were 451.02 MPa and 767.61 MPa, respectively, which were only 12.12% less than simulation results. The cost analysis was conducted to investigate the breakeven point of commercial toaster oven, autoclave and industrial thermal oven for curing CFRP. The results disclosed that the autoclave contributed the highest oven cost and electricity cost. The breakeven point of commercial toaster oven was 54,000 pieces of similar size of CFRP laminate curing by industrial thermal oven. This suggested that commercial toaster oven was economical choice for moderate production capacity and small working place.

Keywords: Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP), Mechanical properties, Vacuum-bag-only process (VBO), Void content, X-ray micro-CT

I. INTRODUCTION

Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) has been used as a lightweight material in the aerospace and automotive industries, as well as in the construction of sports equipment due to its high strength-to-weight ratio and its resistance to corrosion compared to metal. For the automobiles, lighter vehicles consume less energy, allowing vehicles to travel longer distances with lower emission of CO₂ [1]–[3]. Consequently, one of the main challenges for the automotive industry is to design lightweight vehicles using CFRP and/or other lightweight materials. Several studies have proposed the use of CFRP as a substitute for metallic parts or mixed with metals to enhance their strength-to-weight ratio and crashworthiness [4]–[6]. Nevertheless, unlike metals, an isotropic material, CFRP is an anisotropic material, making their mechanical properties are strongly dependent on the orientation of fibers [7], [8].

The fabrication of CFRP involves the hand lay-up of the carbon fiber to align the fibers in a desired direction, followed by curing of the thermoset or thermoplastic resins. In the aerospace industry, an autoclave oven is commonly used for the consolidation of CFRP since it allows for high pressures to be applied during curing process at elevated temperatures. Therefore, the autoclave process can achieve extremely low void contents (0–1%) while maintaining a 55–65% fiber fraction [9]. However, the high initial investment costs, severe maintenance requirements, long production times, and the large size of the autoclave lead to a high-cost manufacturing process with finite manufacturing capacities. Saenz-Castillo *et al.* studied the effect of consolidation cycles of three different out-of-autoclave (OOA) processes—Vacuum-Bag-Only (VBO), hot-press, and automatic lay-up with in-situ consolidation—on the void content and mechanical properties of carbon fiber/PEEK composites [10]. The in-plane and interlaminar shear strength of the materials rapidly decreased once

the void content was higher than 1.2%, 1.6%, and 2.7% for VBO, automatic lay-up with in-situ consolidation, and hot-press, respectively. Hence, it is demonstrated that VBO processes can achieve the low void contents necessary to produce CFRPs with improved mechanical properties. The detailed comparisons of autoclave and VBO processes with different curing methods, percentage of void content in CFRP laminate after curing and mechanical properties are summarized in Table 1.

Table 1: Comparison of autoclave and VBO process

Features	Autoclave	VBO	
		Thermal industrial curing oven	Microwave curing
Curing Pressure	0.3–0.7 MPa [11]–[13]	Atmospheric pressure	Atmospheric pressure
Curing time	≥ 480 min [14]	≥ 700 min [15]	≥ 271 min [16]
Curing step	2–8 [16], [17]	≥2 [9]	≥2 [16]
Part size	Length of 27 m [16]	0.1–2.5 m ² [15]	Only small size [18]
Achievable thickness	32 plies, 4.15 mm [19]	16 plies, 2.16 mm [10]	4 plies, 2.8 mm [20]
Void Content	0.0–1.0% [9]	0.5–3.0% [9]	8.9% [18]
In-plane shear strength	108.01 MPa [9]	111.36 MPa [9]	45.0 ± 4.05 MPa [21]
Energy consumption [16]	Vacuum: 1.3 kW·h Curing: 37.4 kW·h	Vacuum: 2.1 kW·h Curing: 10.8 kW·h	Vacuum: 1.8 kW·h Curing: 14.4 kW·h
Overhead cost [16]	252 \$/process	215 \$/hr	254 \$/process

VBO process uses the vacuum-bag pressure (typically -1 bar) to compact the pre-impregnated fibers (prepreg). The VBO process allows for the curing of prepreg over a diverse range of equipment, including thermal convection ovens, heat blankets, and microwave ovens

[22]–[24]. Among these curing techniques, thermal convection oven methods exhibited the lowest costs, cycle times, and energy requirements. Centea and Nutt conducted a technical cost analysis of the manufacturing costs of a VBO prepreg process followed by curing in a thermal convection oven and found that prepreg processing was the greatest contributor to material costs, while the oven accounted for most of the equipment costs [15]. Nevertheless, the cure cycle of a CFRP laminate produced a VBO process using a convection thermal oven needs at least two steps: 1) a low-temperature curing, involving TB (B-stage curing) with a first isothermal hold for t_b seconds; and 2) a high-temperature curing, T_c (C-stage curing) with a second isothermal hold for t_c seconds [25]. During B-stage curing, the volatiles, i.e., gas and reaction by-product of resin, are free to escape with sufficient dwell time and appropriate temperature and provide the rest of flowable resin for C-stage curing. In the autoclave process, the pressure is applied to consolidate the laminate, and the rest of flowable resin can fill the air gap between plies. For the OOA process, the resin is fully cured by the elevated temperature, allowing the consolidation of laminate. The total cure cycle time for VBO process by a thermal convection oven is approximately 700 minutes, which still represents a relatively long production cycle. The comparison of fabrication conditions, energy consumption and overhead cost between autoclave and VBO process are summarized in Table 1. Since at least two steps of the cure cycle are necessary to cure VBO-generated CFRP laminates in thermal convection ovens, this necessitates the installation of complicated controller systems within the thermal ovens. Thus, composite curing ovens used in VBO processes are generally made-to-order; consequently, the initial cost of procuring this equipment is still expensive and unaffordable for many small entrepreneurs compared to commercial ovens

that are widely available in both physical department stores and online marketplaces.

To the best of the authors' knowledge, the use of commercial ovens for the curing of CFRP laminates generated by VBO processes has not been demonstrated elsewhere. This study aims to demonstrate the use of commercial toaster ovens for the curing of CFRP laminates produced by VBO process. Due to the limited controls available to commercial toaster ovens, only a single cycle can be implemented: a single temperature ramp followed by an isothermal hold. The curing temperature at the final stage of vacuum bag curing, 120°C, and holding for 50 mins was selected as recommended by the manufacturer [17]. The mechanical properties; tensile and flexural tests, were conducted on the [0/90/0/90] CFRP laminate fabricated by VBO process with and without vacuum atmosphere and compared with finite element analysis due to negligible voids in laminate. The surface and through-thickness voids were investigated by digital microscope and X-ray micro-CT, respectively. The cost analysis was performed, and the break-even point was determined to investigate the economic alternatives between autoclave, industrial curing oven, and commercial toaster oven.

II. PREPARATION OF THE CFRP LAMINATE USING A COMMERCIAL TOASTER OVEN

A. Toaster Oven Setup

A 290 × 460 × 280 mm³ commercial toaster oven (Model No. OTTO TO-765, OTTO Kingglass Co. Ltd., Thailand); Figure 1a), was used to cure the CFRP laminate. The direction of heat flow in the oven was adjusted to flow from the top and bottom of the oven (Figure 1a), allowing the middle section of the oven to be maintained at an average temperature that was roughly equivalent to the set temperature. A temperature sensor was placed in the middle of the oven before fabrication to monitor the temperature in this section

of the oven (Figure 1b). The temperature of the oven was set to 120°C, while the timer was set to 50 mins. An alarm went off once the temperature in the oven reached 120°C. It was found that the oven took 40 mins to reach 120°C from the room temperature (22°C), indicating that the commercial toaster oven had a heating rate of 2.5°C/min, which falls within the range of heating ramp rates recommended for curing as indicated by the manufacturer [17].

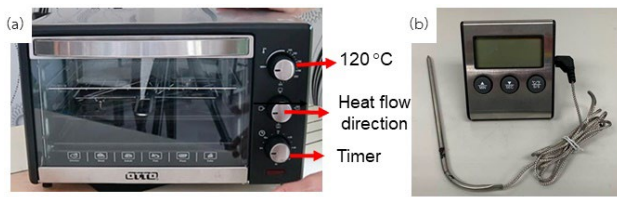


Figure 1: Equipment used for the VBO process used in this study: (a) Toaster oven and (b) temperature sensor.

B. Fabrication Procedures

A 200 g/m² 2 × 2 plain weave of carbon fiber prepreg consisting of 58 vol.% carbon fiber (Tenax HTA-3k) and 42 vol.% epoxy resin (DT806R; DeltaPreg, Italy) was used to fabricate a 120 × 240 mm² CFRP laminate with a stacking sequence of [0/90/0/90]. The non-vacuum specimen was used to investigate the maximum void content that could be obtained when the specimen was cured using a commercial toaster oven. The VBO accessories used in the experimental setup consisted of a release film, breather, vacuum bagging film, and carbon fiber laminate; these were arranged in order as shown in Figure 2a. The bagging film was then attached using sealant tape. For the specimen cured under vacuum, the apparatus was directly connected to the vacuum pump using a vacuum connector. Once the vacuum pressure (-1 bar) was reached, the vacuum pump was allowed to run continuously for 1 min before being turned off. This process was repeated 1–3 times until no additional air leakage was observed. The air leakage can be observed by the return of the

needle in pressure gage to atmospheric pressure. The carbon fiber laminate was cured at 120°C for 50 minutes, followed by cooling at room temperature. It was found that the final CFRP laminate product had a nominal thickness of 1 mm as shown in Figure 2b. The fabrication procedures used for the non-vacuum specimen were the same as the methods described above except that the vacuum pump was not used.

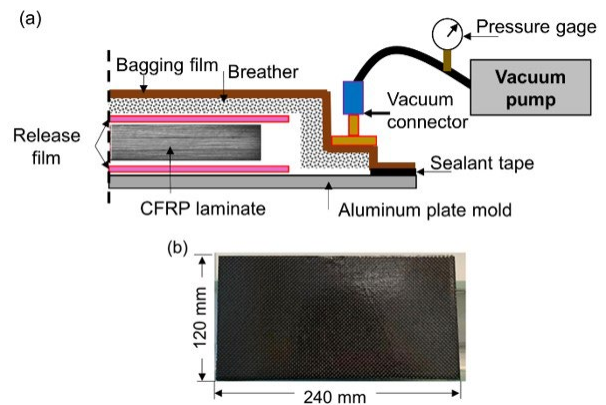


Figure 2: The fabrication process of the CFRP laminates: (a) schematic diagram of the VBO process used for the vacuum specimens; (b) an image of the final CFRP laminate cured under vacuum conditions.

III. FINITE ELEMENT (FE) MODELLING

Finite element analysis (FEA) typically neglects the presence of voids in CFRP specimens. Consequently, the results of a FEA should give an upper bound of the mechanical performance of the CFRP specimens. This study used the ANSYS Composite PrepPost (ACP) module in the ANSYS finite element software to model the CFRP specimens. Figures 3a and 3b illustrate the boundary conditions of the tensile and three-point bending tests, respectively. In the tensile test, one side of the CFRP was clamped. The other side of the specimen was used to exert tension along the y-axis by the applied displacement $\Delta\delta_y$. In the three-point bending test, no translation was allowed along the x-, y-, and z-axes in the left support, while no translation was allowed along the y- and z-axes in the right

support. The displacement, $\Delta\delta_y$, pointed in opposite direction to the y-axis at the middle of the specimen (i.e., at a distance of $L_y/2$) to perform three-point bending test. In both mechanical tests, the displacement was increased until the CFRP laminate failed under the Tsai-Wu failure criteria. The element size used in the FE model of the tensile and three-point bending tests was 2 mm, resulting in 726 elements and 854 nodes. The material constants of the carbon fiber prepreg (Tenax HTA-3k DT806R) used in the FE model are presented in Table 2.

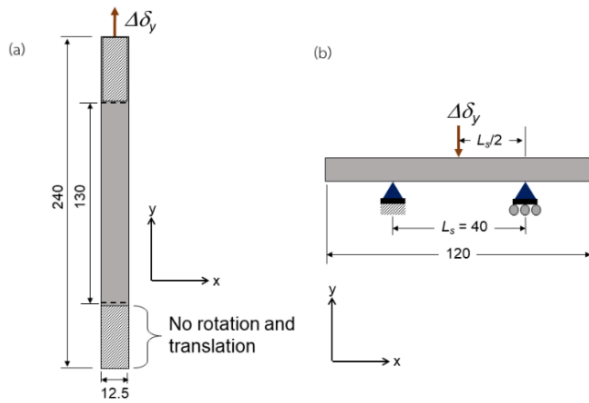


Figure 3: The boundary conditions for the FE model used to simulate the mechanical tests of the CFRP laminates: (a) the tensile test (ASTM D3039) and (b) the three-point bending test (ASTM D790). All dimensions are in mm.

Table 2: Material constants of CFRP for FE modeling [17]

E_x (GPa)	56.6	Density (kg/m ³)	1760
E_y (GPa)	56.6	G_{xy} (GPa)	3.5
E_z (GPa)	5.6	G_{yz} (GPa)	2.85
ν_{xy}	0.04	G_{xz} (GPa)	2.85
ν_{yz}	0.3	Areal weight (g/m ²)	200
ν_{xz}	0.3	Nominal thickness (mm)	0.25

IV. CHARACTERIZATION OF THE MATERIALS

A. Investigation of Surface Appearance and Through-thickness Voids

The surface appearance of CFRP laminate was examined at a 2000x magnification using a digital microscope (BM-DM61, Ningbo Barride Optics Co., Ltd.,

China). Since the table of the digital microscope was too small to allow for the observation of the 120 × 240 mm CFRP laminate, each specimen was cut into six 12.5 × 240 mm pieces using an advanced composite plate saw (EXTEC Labcut® 5000, Extec Corp, USA). These smaller-sized specimens were also used in the tensile tests (ASTM D3039 standard). The CFRP specimens were scanned using an X-ray micro-CT (Skyscan, 1273, Bruker, USA) to examine the properties of the through-thickness voids. The specimen was scanned under 40 kV and 300 μ A conditions with a 2 × 2 binning mode, 4 frames per projection, and a rotation step of 0.4°. The scan resolution (voxel size) was set to 12.0 μ m. The X-ray micro-CT system was then used to reconstruct the 3D image. Due to specimen size limitations, the CFRP laminates were cut into 12.5 × 12.5 × 1.0 mm pieces for X-ray micro-CT scanning to ensure a scanning resolution of 12.0 μ m. The distribution of the through-thickness voids in the CFRP laminates was found to be non-uniform along the length of the specimen [26], [27]. To ensure that the small portion of CFRP specimen scanned by X-ray micro-CT in this study was sufficiently representative of the void content of the entire sample, the error (e) of the deviation of the void content measured from smaller samples compared to the larger sample was determined by the following equation based on the work of Zhang *et al.* [28]:

$$e = \frac{|m - v|}{v} \quad (1)$$

where, m [%] and v [%] represent the void content of the small and large specimens, respectively.

While the width of the large sample was similar to that of the small CFRP specimen scanned by X-ray micro-CT, the length of the sample needed to be as large as possible for CCD camera detection. Consequently, the large sample cut from the CFRP laminate had dimensions of 12.5 × 180 mm. The larger specimen was scanned under the same conditions and resolutions used for the small specimens. It should be noted that

only the large specimen fabricated under vacuum was scanned as it was anticipated that the vacuum specimens would have a lower void content compared to the non-vacuum specimens, which was highly recommended for practical uses.

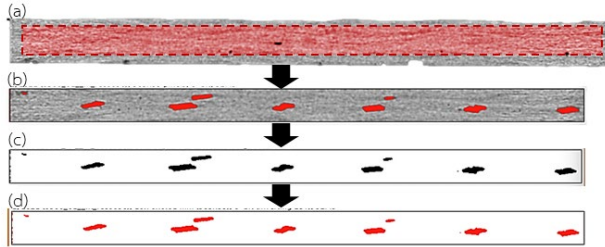


Figure 4: The workflow used to analyze the area of the through-thickness voids in the CFRP specimen using X-ray micro-CT imaging: (a) The image is cropped to exclude surface voids; (b) an appropriate threshold value is selected; (c) the 'Analyse Particles' function is used to highlight the void areas; (d) the area of voids in each slice is calculated.

B. An Analysis of Through Thickness Void Content Using X-ray Micro-CT Imaging

The ImageJ software was used to analyze the void content of the CFRP laminates in this study. All of the image stacks were imported and changed to an 8-bit image. Figure 4 presents the procedure used to analyze the through-thickness voids of the CFRP specimen from X-ray micro-CT images. First, the upper layer of each image was cropped to exclude voids on the surface of the specimens (Figure 4a). The voids created by air bubbles are presented in a dark black color compared to voids in the carbon fiber and matrix. Therefore, threshold range of 0–60 was used to visualize the area of the voids in the CFRP specimen and marked with the red coloring in Figure 4b. The 'Analyse Particles' mode was used to determine the area defined by this threshold (Figure 4c). The total void area in each slice, A_{void_slices} , was determined and multiplied by the thickness of each slice, t_{slice} , which was equal to the

scanning resolution. The void content of the specimen, V_{void_slice} , could then be determined as follows:

$$V_{void_slice} = \frac{A_{void_surface} \times t_{slice}}{V_{total}} \times 100\% \quad (2)$$

where V_{total} [mm³] is the total volume of the specimen, which can be determined by:

$$V_{total} = A_{crop} \times N_{slice} \times t_{slice} \quad (3)$$

where A_{crop} [mm²] and N_{slice} [-] are the cropped area of each slice and the total number of slices, respectively.

C. Mechanical Tests

The mechanical tensile and flexural tests were conducted based on ASTM D3039/D3039M-00 and ASTM D790-03 standards, respectively [29], [30]. A universal testing machine (Zwick Roell, Z100SH, Germany) was used to perform tensile and flexural tests in three-point bending mode. Five 12.5 × 240 mm CFRP specimens with a gauge length of 130 mm were used in the tensile test with 0.01 min⁻¹ strain rate. The ultimate tensile strength and tensile modulus were evaluated based on stress-strain curves. The percentage of elongation, %EL, was determined using Equation (4):

$$\%EL = \left(\frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} \right) \times 100\% \quad (4)$$

where ℓ is the gauge length of specimen under tension [mm] and ℓ_0 is the original gauge length of specimens [mm]. The ultimate tensile strength, tensile modulus, and percentage of elongation at break of both vacuum and non-vacuum specimens were plotted and compared with the FE results. 12.5 × 120 mm specimens with a 32 mm span length, L_s , were used for the three-point bending test; these samples were tested at a strain rate of 0.01 min⁻¹. Since the size of the specimens used in the three-point bending test was smaller than that of the specimens used in the tensile tests, a total of six samples from each group were tested. The flexural modulus (E_f), flexural strength (σ_f), and flexural strain (ϵ_f) were plotted and compared with

the FE results. The flexural modulus, flexural strength, and flexural strain of CFRP laminate were determined using Equations (5), (6), and (7) respectively.

$$E_f = \frac{L_s^3 F_{\max}}{4bh^3 (\Delta\delta_{\max})} \quad (5)$$

$$\sigma_f = \frac{3F_{\max} L_s}{2bd^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6(\Delta\delta_{\max})d}{L_s^2} \quad (7)$$

Here, $F_{\max}$, $\Delta\delta_{\max}$, b , h , and d represent the maximum force [N], maximum deflection [mm], width [mm], height [mm], and thickness [mm] of the CFRP beam, respectively.

V. COST ANALYSIS

The cost analysis was performed to identify that the commercial toaster oven used in VBO process is economical option to cure CFRP laminate compared with industrial-grade composite curing oven via the similar process and autoclave. The specification of the ovens and the cost data including the oven price and the electric consumption generated during each curing process were listed in Table 3. Due to the different size of three curing oven, we developed the definition of maximum production capacity of each oven to compare the production capacity in the similar scale. The maximum production capacity of each oven was defined as the ratio of the maximum size of CFRP laminate per one batch of production by the oven to the maximum achievable size of CFRP laminates produced by commercial toaster oven.

The electric consumption of the oven per one time of production, E_{oven} (kW·h), can be determined as follows:

$$E_{oven} = P_{oven} \times t_{curing} \quad (8)$$

where, P_{oven} and t_{curing} are electric power of the oven [kW] and total curing time of CFRP laminate [h], respectively.

Table 3: Specification and cost data of the ovens

	Autoclave oven*	Thermal convection ovens for VBO process	
		Industrial grade**	Toaster Oven
Internal dimensions [mm]	500×1,000	1,070×430 ×500	300×300 ×250
Weight [kg]	1,760	85	8
Total curing time/parts [min]	600	480	100
Power supply [V]	220	230	220
P_{OVEN} [kW]	25	2.2	1.5
Laminates size [mm]	760×420	740×370	240×120
Production capacity / batch [piece]	11	9	1
E_{OVEN} [kW·h]	250	17.6	2.5
C_E [\$]	28.72	1.56	0.22
C_{OVEN} [\$]	17,500	2,713.32	114.28

*Model NO. SN-CGF0510, Changzhou Sinomac Machinery Technology Co., Ltd., China

**Model NO. OV301, Easy Composites Ltd., United Kingdom

The electricity cost generated from the curing process, C_E [\$], can be determined by multiplying the electric consumption of the oven per one time of production and the energy charge rate per one unit of electricity appliance, C_{unit} [\$/kW·h]. Thus, it can be written as follows:

$$C_E = E_{oven} \times C_{unit} \quad (9)$$

According to the electricity tariffs in Thailand [31], for small business service, the rate of charge of the electric appliances are lower than 22 kV for first using of 0–150 kW·h and the next step of using of 151–400 kW·h is 0.08 \$/kW·h and 0.11 \$/kW·h, respectively. The businesses consuming the electricity more than 400 kW·h is charged with the fix rate of 0.12 \$/kW·h.

The breakeven analysis was conducted to investigate the economical option between industrial curing and commercial toaster ovens. The oven cost was set as a

fixed cost and the electricity cost per one time of production was considered as variable cost. Thus, the total cost of the oven, $C_{T,oven}$, can be written as follows:

$$C_{T,oven} = C_{oven} + C_E x \begin{cases} \text{Toaster oven : } x = 1, 2, 3, \dots, n \\ \text{Industrial oven : } x = \left\lceil \frac{n}{9} \right\rceil \end{cases} \quad (10)$$

where, C_{oven} [\$] and C_E [\$] represent the oven cost and the electricity cost generated from the curing process by the ovens, respectively. x is the number of CFRP laminate produced by the ovens. For the commercial toaster oven, x is integer, which can be counted from 1, 2, 3, ..., to n pieces of laminate. For the industrial-grade composite curing oven, the electricity cost per one time of production remained constant regardless of the size and the number of CFRP laminate, therefore, x is limited by the maximum production, which was nine times larger than commercial toaster oven. Hence, to compare both ovens in the same scale of production, x was set as the round up of the ratio of the n pieces of laminate per one time of running the oven to the maximum production capacity of industrial-grade composite curing oven.

VI. RESULTS AND DISCUSSION

A. Surface Appearance and Through-thickness Voids of CFRP Laminates

The surface appearance of representative locations on the CFRP laminates was captured using a digital microscope as shown in Figures. 5a and 5b for the non-vacuum and vacuum specimens, respectively.

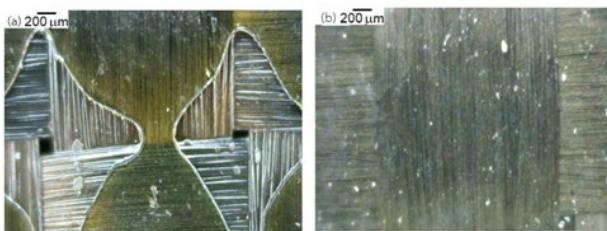


Figure 5: The surface appearance on the (a) non-vacuum and (b) vacuum CFRP specimens.

As expected, the sample cured under non-vacuum conditions exhibited a significant number of voids produced by air bubbles due to gas expansion as the oven was heated. Accordingly, the surface porosities of the non-vacuum specimen were observably higher than that of the vacuum specimen. In addition, uncured resin was observed at the cross-joint of the woven fiber in the non-vacuum specimen; this was not observed in the vacuum specimen. This suggests that a vacuum pressure of -1 bar allows the resin to fill the gaps between the fiber tow in the cross-joint network of the woven fiber prepreg even when utilizing a single cure cycle at 120°C with a dwell time of 50 minutes. Additional surface porosity generated by the presence of uncured resin at the cross-joints of the plain weave fiber is consistent with a previous study conducted by Hyun *et al.* [32]. The differences in surface porosities may influence the mechanical properties of the CFRP specimens; however, these porosities can be easily reduced or eliminated by grinding the sample using sandpaper [33]. Consequently, the increased surface porosities are typically treated as a minor problem when it comes to quality control. In contrast, the through-thickness voids in CFRP cannot be easily eliminated and are much harder to detect compared to surface porosity. Consequently, these voids are a major cause of failure in CFRP materials.

The distribution of the through-thickness voids as observed in the X-ray micro-CT 3D images extracted using ImageJ in both the non-vacuum and vacuum specimens are presented in Figures. 6a and 6b, respectively. The error (e) of the deviation of the void content in the small samples compared to the large samples was 0.53% at a scanning resolution of 12.0 μm. as calculated according to Equation (1). This indicates that the distribution of voids inside the sub-representative samples is uniform and sufficient to explain the distribution of void of the entire laminates. The void

content in the non-vacuum and vacuum specimens was found to be $10.78 \pm 0.001\%$ and $0.297 \pm 0.007\%$, respectively. The void content of the vacuum specimen was 96.95% less than that of the non-vacuum specimen, indicating that curing the specimens on the vacuum greatly reduced an amount of through-thickness voids in the samples. Furthermore, according to the Purslow's chart [34], the void content of the vacuum specimen would classify it under Grade B (very good quality), while the void content of the non-vacuum specimen would cause it to be classified as Grade F (very poor quality). These results show that high-quality CFRP specimens can be fabricated using a single cure cycle in a commercial toaster oven. The formation of through-thickness voids in the VBO process is generally due to one of two processes: 1) the insufficient impregnation of fibers before gelation, known as "flow-induced voids"; and 2) the presence of entrapped air, moisture, or resin volatiles, known as "gas-induced voids" [26].

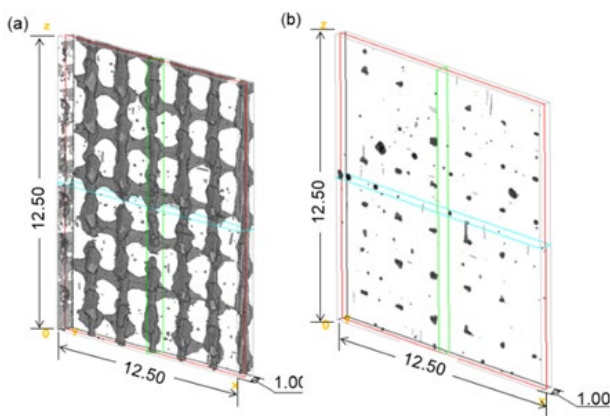


Figure 6: The distribution of through-thickness voids in a 3d view extracted from the X-ray micro-CT images using ImageJ:
(a) non-vacuum specimens and (b) vacuum specimens.

Centea and Hubert reported that the vacuum pressures assisted with the evacuation of air, resulting in the reduction of gas-induced voids when subjected vacuum conditions at ambient temperatures [35].

As the temperature increases, the resin begins to flow, filling in the dry regions of the fiber tows, leading to a decrease in the number of flow-induced voids. Therefore, the surface appearance of CFRP in Figure 5 suggests that the VBO process conducted under vacuum conditions (-1 bar) was sufficient to suppress the formation of flow-induced voids but not gas-induced voids. This can be clearly seen by the absence of uncured resin in the cross-joints of the fiber as well as the lower surface porosities observed in the vacuum specimens (Figure 5b). The single cure cycle, conducted by heating the oven from room temperature to 120°C at a ramp rate of $2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ followed by 50 minutes of isothermal holding, improved the flow of resin through the dry area of the fiber tow. Thus, CFRP laminates could be achieved in a commercial toaster oven using a single cure cycle within short duration.

B. Mechanical Properties of the CFRP Specimen

To quantitatively assess the mechanical performance of CFRP laminates cured using a single cure cycle in a commercial toaster oven, the upper bounds of the following mechanical properties were determined using the results of a finite element model in which the presence of voids in the CFRP laminate was neglected. The von Mises stress distribution of the CFRP specimens under tension and three-point bending load as obtained from the results of the finite element modeling are presented in Figures. 7a and 7b, respectively. These results were compared to the mechanical properties of the CFRP vacuum specimens as obtained from tensile and three-point bending tests (Figures. 7c and 7d, respectively).

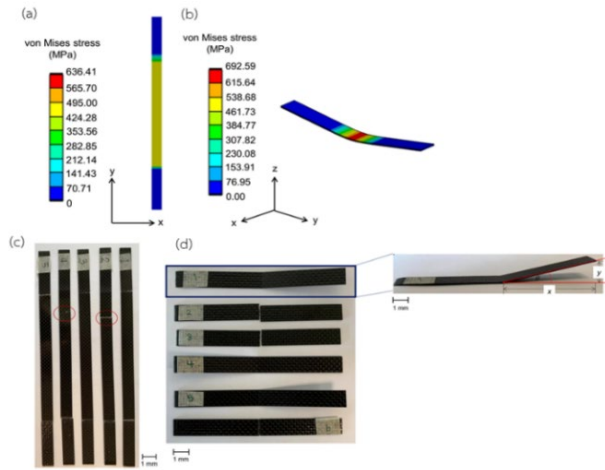


Figure 7: Stress distribution by FEA: (a) under tension; (b) under three-point bending. The fractured specimens obtained after (c) the tensile test and (d) the three-point bending test.

Figure 7a shows that the CFRP laminate was capable of withstanding a maximum stress of 424.28–495.00 MPa (yellow contour) at the gauge length before the specimen failed under the Tsai-Wu criteria. This suggests that, theoretically, fractures should occur around the gauge length. Experimentally, it was found that vacuum specimens #2 and #4 failed at the gauge length, consistent with the results of the simulation, while the other samples failed near the grips. Figure 7b shows that the middle of the CFRP beam (the location of the

load) was subjected to a maximum stress ranging from 615.64–692.59 MPa (red contour) before it failed under Tsai-Wu criteria. In the three-point bending test, three vacuum specimens (specimens #2, #3 and #6) ruptured in the middle of the beam, while the other three specimens (specimens #1, #4 and #5) failed on the outer surface of the middle of the beam without breaking into two parts (Figure 7d). All six vacuum specimens subjected to the three-point bending test failed at the point of loading (mid-span), consistent with the location of the greatest accumulated stress (red contour) as predicted by the finite element model (Figure 7b). The average value of the bending angle ($^{\circ}$) at failure, which calculated from specimens which failed on the outer surface as shown in Figure 7d was found to be 10.56° .

Table 4 summarizes the mechanical properties, void content and part quality based on Purslow's chart of CFRP laminates under tension and flexural loading in three cases: Vacuum, non-vacuum and FE analysis. Full detail of stress-strain curves CFRP under tensile and three-point bending tests are depicted in Figures. 8a and 8b, respectively. Values are plotted in mean $\pm$ SD, calculated from six replications.

Table 4: Mechanical properties, void content and part quality of CFRP laminates: Vacuum, non-vacuum and FE analysis

Properties	Vacuum	Non-vacuum	FE model
Through-thickness void [%]	0.297 ± 0.007	10.78 ± 0.001	N/A
Tensile modulus [GPa]	41.91 ± 0.19	35.98 ± 1.65	42.13
Tensile strength [MPa]	451.02 ± 11.78	344.04 ± 37.00	473.49
Elongation [%]	1.10 ± 0.03	0.90 ± 0.10	1.12
Flexural modulus [GPa]	42.26 ± 1.46	31.10 ± 2.13	35.82
Flexural strength [MPa]	767.61 ± 19.43	363.89 ± 26.18	734.16
Deformation [%]	1.8 ± 1.94	0.95 ± 0.14	2.05
Achievable thickness [mm]	0.97 ± 0.01	1.15 ± 0.01	1
Part quality based on Purslow's chart	B (very good quality)	F (very poor quality)	Ideal case

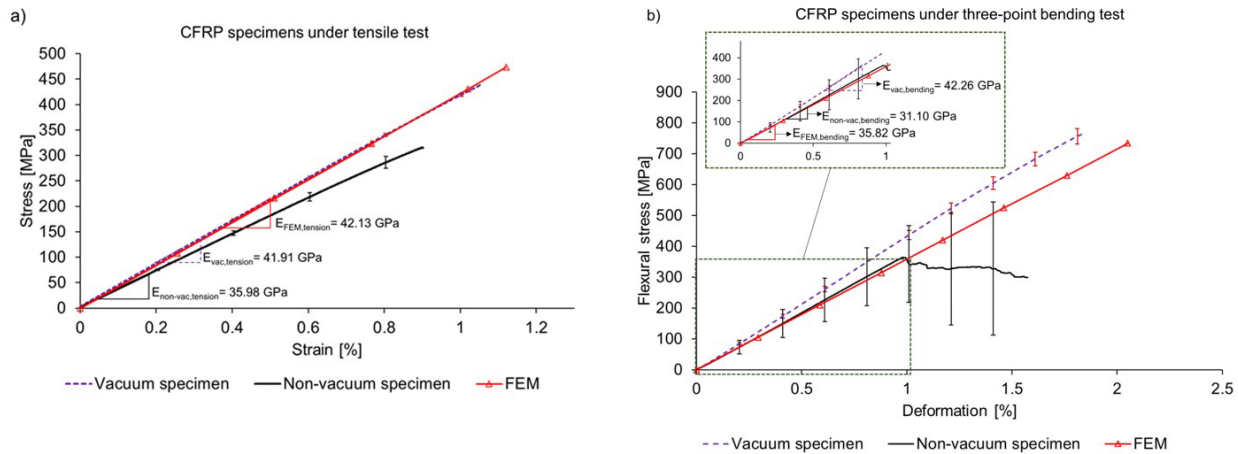


Figure 8: Stress-strain curves of CFRP laminates under (a) tensile and (b) three-point bending tests.

Values presented are the average along with error bars determined from the standard deviation (SD) of six replications.

Figure 8a shows the good agreement, 4.8% difference, between stress-strain curves of vacuum specimen (dashed purple line), and FE simulation result (red line with triangle). It is obvious that the stress-strain curve of vacuum CFRP is in good agreement with FE results, indicating that proposed single curing cycle in commercial toaster oven can achieve the maximum performance under tension.

On the other hand, non-vacuum CFRP specimen (black line) exhibited the lowest Young's modulus, 35.98 GPa, and tensile strength, 344.04 MPa. The non-vacuum CFRP samples—which had the highest void contents—exhibited a 27.38% and 14.90% decrease in ultimate tensile strength and tensile modulus compared to the FEM results, respectively. These results suggest that, in the context of tensional loading, CFRP specimens prepared under vacuum and cured using a single cure cycle in a commercial toaster oven can achieve mechanical properties that are close to the maximum theoretical mechanical performance.

Figure 8b shows the stress-strain curve of vacuum (dashed purple line), non-vacuum (black line), and FE results (red line with a triangle) of CFRP laminates under a three-point bending test. Despite the close value of flexural modulus of the non-vacuum specimen and

simulation result, the non-vacuum specimen broke at 0.95% flexural strain and achieved 363.89 MPa of flexural strength. The flexural strength and percentage of deformation of CFRP under three-point bending obtained from FE results was higher than in non-vacuum specimens. Regarding Table 4, flexural strength and deformation of simulation result were less than 12.12% difference compared to the vacuum specimen. When the specimens were under flexural test, both compression and tension load occurred, and most of them fractured at the tension load side. Figure 7d showed the fracture pattern of CFRP laminate under flexural loading, indicating the fracture along the tension side. Thus, it can be implied that non-vacuum CFRP specimens failed at the tension side, resulting in the lowest flexural strength and strain. One of the major factors influencing the flexural strength and modulus is the presence of voids. The rapid decrease in flexural strength of unidirectional CFRP laminates as the void content of the material increased was previously reported by Liu *et al.* [13]. It is thus important to note the flexural strength of the CFRP laminates was considered more sensitive to the presence of voids than other similar mechanical properties.

C. Cost Estimation and Breakeven Analysis for Manufacturing CFRP Using Commercial Toaster Oven

In the case of fabrication of CFRP laminate with similar size, the electricity cost per piece of CFRP laminate generated by autoclave was the highest, 2.61\$/piece, whereas, the commercial toaster and industrial-grade composite curing ovens exhibited 0.22\$/piece and 0.17\$/piece, respectively. The cost per piece of CFRP was the highest in autoclave process; however, the electricity cost per piece of CFRP laminate produced by commercial toaster oven in one time of operation was higher than that industrial-grade of composite curing ovens. To strategically compare type of oven, a break-even analysis is conducted. Here, a common variable for the analysis is the number of production quantities, and the dependent variable is the total cost of each alternative. The result of the break-even analysis is illustrated in Figure 9. The total cost of commercial toaster oven and industrial-grade composite curing oven are represented by the green line and the purple line, respectively. The break-even point occurs at a production quantity of 54,035 pieces. Consequently, if the demand for the CFRP laminate is greater than 54,035 pieces, the industrial-grade composite curing oven should be selected for VBO process since the total cost is lower.

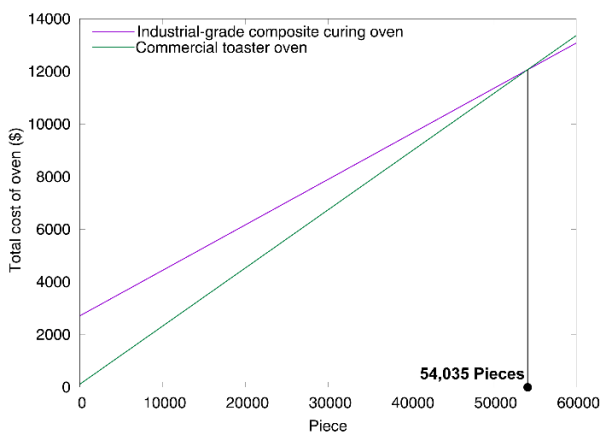


Figure 9: The total cost of the commercial toaster oven and industrial-grade composite curing oven.

In case industrial-grade composite curing and commercial toaster ovens are supposed to be used to fabricate similar sizes of CFRP parts using VBO process, the commercial toaster oven is more economical than the industrial-grade composite curing oven when a moderate production capacity is required. Furthermore, the required space for the installation of a commercial toaster oven is small as its size is compact. Hence, the commercial toaster oven used to cure CFRP laminate via VBO process is adequate in terms of high-quality CFRP laminate production and cost-effective solution for the small-scale companies, which have moderate production capacity and space for an installation is limited.

VII. LIMITATION OF THE STUDY

The results in this study are discussed based on the 23-litre size of commercial toaster ovens or smaller in which their functions are simple to operate and they can be easily found at department stores at affordable prices. However, various classifications of commercial toaster ovens that have more functions with larger sizes than the one used in this study. Therefore, the mechanical properties of CFRP and cost analysis in this study may not apply to the large-scale CFRP laminate and production capacity. Besides, the single-step curing proposed in this study can be applied up to four to eight plie, 2–3 mm CFRP thickness. The curing conditions of single-step curing should be further investigated for the greater CFRP thickness.

VIII. CONCLUSION

This study has successfully demonstrated that CFRP laminates with good mechanical properties and low void contents can be fabricated using a VBO process with a single cure cycle in a commercial toaster oven, providing an alternative, cost-effective manufacturing CFRP laminates for small entrepreneurs. The cost analysis



is carried out to investigate the cost-effective point of using a commercial toaster oven compared with using an industrial-grade composite curing oven in VBO and autoclave processes. A FE model, which neglected the presence of voids, was used to estimate the maximum theoretical mechanical performance of the CFRP laminates. The results of this study can be summarized as follows:

(i) X-ray micro-CT 3D images revealed that the through-thickness void contents of the vacuum and non-vacuum specimens were 0.28% and 10.78%, respectively. Thus, according to Purslow's chart, the specimen prepared under vacuum conditions could be classified as Grade B (very good quality), while the non-vacuum specimen could only be classified as Grade F (very poor quality).

(ii) The average tensile strength, modulus and percent elongation at break of CFRP specimens prepared under vacuum were 451.02 MPa, 41.90 GPa, and 1.10%, respectively; these values were approximately 4.8% less than the FE simulation results. In contrast, the non-vacuum specimen exhibited an average tensile strength, tensile modulus, and percent elongation at break of 344 MPa, 35.98 GPa, and 0.99%. This suggests that the presence of voids in CFRP laminates can reduce tensile strength and modulus by 27.38% and 14.90%, respectively. Thus, in the context of tensional loading, specimens prepared under vacuum using a VBO process with a single cure cycle in a commercial toaster oven can produce CFRP laminates with high mechanical performances. On the other hand, high void content presented in non-vacuum specimen gradually decreased 52.59% of flexural strength compared to vacuum specimen and simulation results. Non-vacuum specimen fractured at 0.95% deflection whereas vacuum specimen and simulation results broke at 1.8% and 2.05%, respectively. This indicates that the flexural strength of

the CFRP laminates was extremely sensitive to even small void contents, corresponding to published work [13].

(iii) The single-step cure cycle in commercial toaster oven allows for curing time of less than 100 minutes, which is almost 10 times less than the total curing time of multiple-step cure cycle operated by an autoclave and an industrial-grade composite curing oven in VBO process. Therefore, the energy consumption for total cure cycle using commercial toaster oven is the lowest, 2.5 kW·h. The break-even analysis disclosed that the commercial toaster oven would be economical option for a moderate capacity of production, 54,000 pieces, when the similar size of samples was considered. Consequently, the commercial toaster oven is recommended for implementation in VBO process for a small business that demands moderate production capacity and high-quality CFRP laminates. Additionally, the commercial toaster oven is installed easily in a limited space due to compact size, making it logistically convenient for many users

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Thai-Nichi Institute of Technology, grant numbers 2102/A004 and 2306/A001. The authors would like to acknowledge the financial support of the Department of Research and Innovation, Thai-Nichi Institute of Technology. We are also thankful to Mr. P. Prommachat for the fabrication of the CFRP laminate.

REFERENCES

- [1] J. T. J. Burd, E. A. Moore, H. Ezzat, R. Kirchain, and R. Roth, "Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions," *Appl. Energy*, vol. 283, Feb. 2021, Art. no. 116269, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116269.

- [2] B. Shaffer, M. Auffhammer, and C. Samaras, "Make electric vehicles lighter to maximize climate and safety benefits," *Nature*, vol. 598, pp. 254–256, Oct. 2021, doi: 10.1038/d41586-021-02760-8.
- [3] T. Ishikawa *et al.*, "Overview of automotive structural composites technology developments in Japan," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 155, pp. 221–246, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.09.015.
- [4] M. R. Bambach, M. Elchalakani, and X. L. Zhao, "Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact," *Compos. Struct.*, vol. 87, no. 3, pp. 282–292, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.02.008.
- [5] Q. Liu, Y. Lin, Z. Zong, G. Sun, and Q. Li, "Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle," *Compos. Struct.*, vol. 97, pp. 231–238, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.052.
- [6] J.-M. Lee, B.-J. Min, J.-H. Park, D.-H. Kim, B.-M. Kim, and D.-C. Ko, "Design of lightweight CFRP automotive part as an alternative for steel part by thickness and lay-up optimization," *Materials*, vol. 12, no. 14, Jul. 2019, Art. no. 2309, doi: 10.3390/ma12142309.
- [7] J. Hu, X. Deng, X. Zhang, W. X. Wang, and T. Matsubara, "Effect of off-axis ply on tensile properties of $[0/\theta]_n$ thin ply laminates by experiments and numerical method," *Polymers*, vol. 13, no. 11, May 2021, Art. no. 1809, doi: 10.3390/polym13111809.
- [8] M. Kawai and T. Taniguchi, "Off-axis fatigue behavior of plain weave carbon/epoxy fabric laminates at room and high temperatures and its mechanical modeling," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 2, pp. 243–256, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.07.003.
- [9] S. Y. Park, C. H. Choi, W. J. Choi, and S. S. Hwang, "A comparison of the properties of carbon fiber epoxy composites produced by non-autoclave with vacuum bag only prepreg and autoclave process," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 26, pp. 187–204, Feb. 2019, doi: 10.1007/s10443-018-9688-y.
- [10] D. Saenz-Castillo, M. I. Martín, S. Calvo, F. Rodríguez-Lence, and A. Güemes, "Effect of processing parameters and void content on mechanical properties and NDI of thermoplastic composites," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, vol. 121, pp. 308–320, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.035.
- [11] P. Olivier, J. P. Cottu, and B. Ferret, "Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates," *Composites*, vol. 26, no. 7, pp. 509–515, Jul. 1995, doi: 10.1016/0010-4361(95)96808-J.
- [12] M. Bodaghi, C. Cristóvão, R. Gomes, and N. C. Correia, "Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, vol. 82, pp. 88–99, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.11.042.
- [13] L. Liu, B. M. Zhang, D. F. Wang, and Z. J. Wu, "Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates," *Compos. Struct.*, vol. 73, no. 3, pp. 303–309, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.02.001.
- [14] K. S. Madhok, "Comparative characterization of out-of-autoclave materials made by automated fiber placement and hand-lay-up processes," M.S. thesis, Dept. Mech. Ind. Eng., Concordia Univ., Montreal, Canada, 2013. [Online]. Available: http://spectrum.library.concordia.ca/978552/1/Madhok_MASc_S2014.pdf
- [15] T. Centea and S. R. Nutt, "Manufacturing cost relationships for vacuum bag-only prepreg processing," *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 17, pp. 2305–2321, 2015, doi: 10.1177/0021998315602949.
- [16] R. A. Witik, F. Gaille, R. Teuscher, H. Ringwald, V. Michaud, and J.-A. E. Månson, "Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components," *J. Cleaner Prod.*, vol. 29–30, pp. 91–102, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.02.028.
- [17] *Matrix TDS–Technical Data Sheet DT806 Resins*, Delta-Tech., Lucca, Italy, 2014.
- [18] J. Galos, "Microwave processing of carbon fibre polymer composites: a review," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 29, no. 3, pp. 151–162, 2021, doi: 10.1177/0967391120903894.
- [19] H. Koushyar, S. Alavi-Soltani, B. Minaie, and M. Violette, "Effects of variation in autoclave pressure, temperature, and vacuum-application time on porosity and mechanical properties of a carbon fiber/epoxy composite," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 16, pp. 1985–2004, 2011, doi: 10.1177/0021998311429618.
- [20] Y. Alekajbaf, S. Murali, and D. Dancila, "Energy efficient microwave curing of carbon fiber reinforced polymer via metamaterial matching and advanced electromagnetic exposure control," *Int. J. Microw. Wireless Technol.*, pp. 1–7, 2024, doi: 10.1017/S1759078724000072.



- [21] M. Kwak, P. Robinson, A. Bismarck, and R. Wise, "Microwave curing of carbon-epoxy composites: Penetration depth and material characterisation," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, vol. 75, pp. 18–27, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.composita.2015.04.007.
- [22] K. B. Katnam, A. J. Comer, D. Roy, L. F. M. da Silva, and T. M. Young, "Composite repair in wind turbine blades: An overview," *J. Adhes.*, vol. 91, no. 1–2, pp. 113–139, 2015, doi: 10.1080/00218464.2014.900449.
- [23] D. B. Bender, T. Centea, and S. Nutt, "Fast cure of stable semi-pregs via VBO cure," *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.*, vol. 6, no. 4, pp. 245–255, 2020, doi: 10.1080/20550340.2020.1869891.
- [24] Y. Li, N. Li, J. Zhou, and Q. Cheng, "Microwave curing of multidirectional carbon fiber reinforced polymer composites," *Compos. Struct.*, vol. 212, pp. 83–93, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.027.
- [25] T.-H. Hou. *Cure cycle design methodology for fabricating reactive resin matrix fiber reinforced composites: - A protocol for producing void-free quality laminates.* (2014). [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140012782/downloads/20140012782.pdf>
- [26] M. Mehdikhani, L. Gorbatikh, I. Verpoest, and S. V. Lomov, "Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance," *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 12, pp. 1579–1669, 2018, doi: 10.1177/0021998318772152.
- [27] A. R. Chambers, J. S. Earl, C. A. Squires, and M. A. Suhot, "The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications," *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 10, pp. 1389–1398, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.02.033.
- [28] D. Zhang, D. Heider, and J. W. Gillespie, "Determination of void statistics and statistical representative volume elements in carbon fiber-reinforced thermoplastic prepregs," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 30, no. 8, pp. 1103–1119, 2015, doi: 10.1177/0892705715618002.
- [29] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM Standard D3039/D3039M-00, 2002.
- [30] *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM Standard D790-03, 2002.
- [31] "Electricity tariffs (January 2023)," Provincial Electricity Authority (PEA), Bangkok, Thailand, 2023. [Online]. Available: <https://www.pea.co.th/en/electricity-tariffs>
- [32] D.-K. Hyun, D. Kim, J. H. Shin, B.-E. Lee, D.-H. Shin, and J. H. Kim, "Cure cycle modification for efficient vacuum bag only prepreg process," *J. Compos. Mater.*, vol. 55, no. 8, pp. 1039–1051, 2021, doi: 10.1177/0021998320963541.
- [33] H. Sasahara, T. Kikuma, R. Koyasu, and Y. Yao, "Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel," *Precis. Eng.*, vol. 38, no. 4, pp. 775–782, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.precisioneng.2014.04.005.
- [34] D. Purslow, "On the optical assessment of the void content in composite materials," *Composites*, vol. 15, no. 3, pp. 207–210, Jul. 1984, doi: 10.1016/0010-4361(84)90276-3.
- [35] T. Centea and P. Hubert, "Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 5, pp. 593–599, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.compscitech.2010.12.009.

ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมสำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ของทาวเวอร์เครนและกองวัสดุก่อสร้าง

ณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว¹ ณุเจต บุตรแสน^{2*} ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี³

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, ชลบุรี, ประเทศไทย

^{2,3}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : nujet.b@ku.th

รับต้นฉบับ : 2 มกราคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 10 กรกฎาคม 2567; ตอบรับบทความ : 15 กรกฎาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

การวางแผนจัดแปลนพื้นที่ก่อสร้างเป็นปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้าง เนื่องจากจะต้องกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของสิ่งอำนวยความสะดวกชั่วคราวและพื้นที่ในจัดเก็บวัสดุในขอบเขตโครงการและช่วงเวลาที่เหมาะสม มิฉะนั้นจะทำให้เกิดความสูญเสียและผลกระทบ การศึกษาครั้งนี้เป็นการพัฒนารูปแบบการจัดแปลนพื้นที่ก่อสร้างโดยการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของทาวเวอร์เครนและพื้นที่กองวัสดุก่อสร้างที่มีความเป็นไปได้ และมีประสิทธิภาพในรูปแบบการนำเสนอที่เสมือนจริง โดยไม่ได้คำนึงถึงแค่เพียงระยะทางในการขนย้ายวัสดุของกิจกรรมการก่อสร้างเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึงระยะเวลาให้สอดคล้องกับแผนกำหนดเวลาของโครงการ (scheduling) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเช่าทาวเวอร์เครน ค่าขนส่ง ค่ากองเก็บ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุขาดแคลน และค่าเสียโอกาส โดยนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) มาช่วยในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับระยะตำแหน่งที่ตั้งตั้งทาวเวอร์เครน และระยะตำแหน่งที่ตั้งตั้งพื้นที่ในจัดเก็บวัสดุ โดยวิธีการดังกล่าวมีข้อดีในการช่วยหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด และสามารถหาแนวโน้มของคำตอบที่ถูกปรับปรุงขึ้น ซึ่งวิธีการข้างต้นได้นำมาทดลองกับโครงการกรณีศึกษา พบว่าวิธีการพัฒนารูปแบบการจัดแปลนพื้นที่ก่อสร้างโดยการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของทาวเวอร์เครนและพื้นที่กองวัสดุก่อสร้างสามารถช่วยลดระยะทางในการขนย้ายวัสดุ ทำให้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายลดน้อยลงตามอีกด้วย

คำสำคัญ : ความปลอดภัยในการก่อสร้าง การวางตำแหน่งอุปกรณ์ โลจิสติกส์ การออกแบบและการวางแผนผังไซต์

Building Information Modeling for Construction Site Layout Planning

Narongrit Wongwai¹ Nujet Butsan^{2*} Suphawut Malaikrisanachalee³

¹*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus,
Chonburi, Thailand*

^{2*,3}*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: nujet.b@ku.th

Received: 2 January 2024; Revised: 10 July 2024; Accepted: 15 July 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

The planning of construction site layouts is a critical challenge in construction projects, requiring the allocation of suitable positions for temporary facilities and material storage areas within project boundaries and at appropriate time intervals. Failure to do so can result in significant losses and repercussions. This study aims to develop a construction site layout model by identifying optimal position for tower cranes and construction material storage area that are both feasible and efficient, presented in a format that mirrors reality. The methodology extends beyond merely considering the distance of material movement during construction activities. It aligns time intervals with project scheduling to reduce costs related to crane rental, transportation, storage facilities, material shortages, and opportunity costs. The application of a genetic algorithm is employed to discover the best solutions for positioning tower cranes and storage areas. This approach offers the advantage of approximating the best possible solution and revealing trends in improved solutions. The methodology has been applied to a case study project, illustrating that the development of construction site layouts by identifying optimal positions for tower cranes and construction material storage areas can significantly reduce material movement distances, resulting in reduced time and costs.

Keywords: Construction safety, Construction site layout optimal tower cranes position, Logistics, Site design and planning

1) บทนำ

การวางแผนจัดแปลนพื้นที่ก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพของพื้นที่ก่อสร้าง เป็นพื้นฐานสำหรับการดำเนินโครงการที่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากช่วยเพิ่มทั้งผลผลิตและความปลอดภัยในพื้นที่ก่อสร้าง โดยส่วนใหญ่งานนี้ประกอบด้วยกระบวนการระบุสิ่งอำนวยความสะดวกชั่วคราวที่จำเป็นในการสนับสนุนการก่อสร้างการดำเนินการกำหนดขนาดและรูปร่าง และการวางตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ว่างภายในขอบเขตของโครงการ ปัญหาการวางแผนจัดแปลนพื้นที่ก่อสร้าง คือปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงผสมที่ซับซ้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์หลายปัจจัยและปัญหาที่เพิ่มขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมากตามจำนวนสิ่งอำนวยความสะดวกและข้อจำกัดที่เพิ่มขึ้น จากการทบทวนวรรณกรรมประกอบด้วย บทวิเคราะห์ที่หลากหลายเทคนิคฮิวริสติกและเมตาฮิวริสติกสำหรับแก้ปัญหา แต่ในการศึกษาที่ผ่านมาโดยส่วนมากจะตรวจสอบสิ่งอำนวยความสะดวกจำนวนน้อย และมุ่งเน้นไปที่การลดระยะการเดินทางให้น้อยที่สุด โดยไม่สนใจปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุน โดยทั่วไปหรือพารามิเตอร์การตัดสินใจอื่น ๆ วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือการพัฒนาโซลูชันการจัดวางแปลนพื้นที่ก่อสร้างที่เป็นไปได้ และมีประสิทธิภาพในรูปแบบการนำเสนอที่เหมือนจริง โดยคำนึงถึงระยะทางทั้งหมดที่เดินทางรวมถึงค่าใช้จ่ายและพารามิเตอร์ความปลอดภัย มีการพัฒนารูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ ตั้งเป้าที่จะลดฟังก์ชันต้นทุนทั่วไปให้น้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากต้นทุนการก่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกที่เป็นทางเลือกสถานที่ ค่าขนส่งระหว่างสถานที่ และข้อกีดขวางด้านความปลอดภัยใด ๆ ในรูปแบบของความใกล้เคียงหรือความห่างไกลที่ต้องการสิ่งอำนวยความสะดวกเฉพาะไปยังสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ หรือพื้นที่ทำงาน การพัฒนารวมวัตถุประสงค์การค้นหาที่จำเป็นเข้ากับความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ได้รับการทดสอบในหลายกรณีทดสอบและผลลัพธ์ของการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีอยู่จากวรรณกรรม การประเมินผลบ่งชี้ว่ารูปแบบที่นำเสนอให้วิธีแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพและมีเหตุผล เพื่อตอบสนองต่อพารามิเตอร์การตัดสินใจและข้อจำกัดของปัญหา และส่งผลให้ดีขึ้นในการวางแผนจัดแปลนพื้นที่ที่เหมาะสมกว่าวิธีก่อนหน้านี้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงพัฒนารูปแบบการจัดแปลนพื้นที่ก่อสร้างโดยการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของทาวเวอร์เครนและพื้นที่กอง

วัสดุก่อสร้าง เพื่อหาระยะตำแหน่งที่ติดตั้งทาวเวอร์เครน และระยะตำแหน่งที่ติดตั้งพื้นที่ในการจัดเก็บวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในโครงการ ซึ่งส่งผลให้ลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายของโครงการ แต่ยังไม่ได้ศึกษาในส่วนของการใช้จ่ายในโครงการก่อสร้างจริงทั้งหมด ได้แก่ ค่าเช่าทาวเวอร์เครน ค่าขนส่ง ค่ากองเก็บวัสดุ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุขาดแคลน และค่าเสียโอกาส

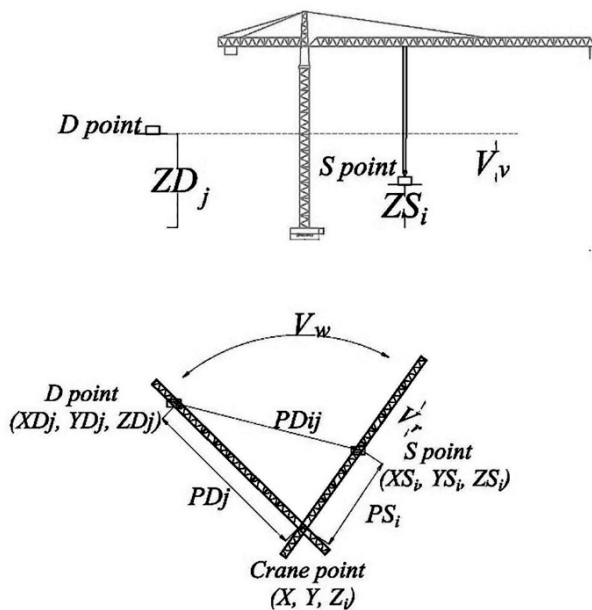
2) ทบทวนวรรณกรรม

2.1) การวางแผนเค้าโครงทาวเวอร์เครน

งานวิจัยจำนวนมากได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสถานที่ของทาวเวอร์เครนตามเกณฑ์ต่าง ๆ ที่เน้นเป็นหลักลดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย

Zhang *et al.* แนะนำแบบจำลองที่สำคัญ-ทางคณิตศาสตร์ [1] ที่ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตำแหน่งที่ตั้งของกลุ่มของทาวเวอร์เครนโดยใช้การจำลองแบบมอนติคาร์โล มีงานวิจัยมากมายปรับรูปแบบนี้ Marzouk and Abubakr [2] ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการสร้างแบบจำลองข้อมูลอาคาร (BIM) สำหรับทาวเวอร์เครนในการวางแผน แบบจำลองที่ใช้ BIM นี้ใช้เพื่อตรวจสอบตำแหน่งของปั้นจั่นโดยใช้การตรวจสอบการปะทะและพัฒนาแผน 4 มิติ Abdelmegid *et al.* [3], Tam *et al.* [4] และ Alkriz and Mangin [6] ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยลดเวลาและค่าใช้จ่ายโดยรวม Al-Hussein *et al.* [5] พัฒนาระบบบูรณาการสำหรับการจำลองและ 3 มิติ การสร้างภาพการทำงานของทาวเวอร์เครน Huang *et al.* [7] การใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม นั้นมีความยืดหยุ่นกว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm), Irizarry and Karan [8] การรวมทั้ง GIS และ BIM เข้าด้วยกันและเปิดใช้งานการแสดงผลภาพโมเดล 3 มิติของทาวเวอร์เครนที่เหมาะสมที่สุดสถานที่ แบ่งประเภทพื้นที่ที่เป็นไปได้สำหรับที่ตั้งทาวเวอร์เครนเพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความขัดแย้ง Lien and Cheng [9] ใช้อัลกอริทึมของ Particle Bee เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตำแหน่งของทาวเวอร์เครนและลดต้นทุนการดำเนินงาน

$$Tw = \frac{1}{V_w} * Arc \cos \frac{P(Di)^2 - P(Si)^2 - P(Dj)^2}{2 * P(Dj) * P(Si)} \quad (1)$$



รูปที่ 1 : การเคลื่อนที่ของทาวเวอร์เครน

เมื่อ X, Y, Z = พิกัดของจุดเครน (m)

XDj, YDj, ZDj = พิกัดของจุดอุปสงค์ (m)

XSj, YSj, ZSj = พิกัดของจุดจ่าย (m)

XSj', YSj', ZSj' = พิกัดของจุดจ่ายที่แปลงแล้ว (m)

Δ = ความแตกต่างของระดับสิ่งกีดขวางเพิ่มเติม

$P(Dij)$ = ระยะทางจากจุดจัดหา (i) ไปยังจุดอุปสงค์ (j)

$P(Dj)$ = ระยะทางจากจุดปั่นจั่นถึงจุดอุปสงค์ (j) (m)

$P(Si)$ = ระยะทางจากจุดปั่นจั่นถึงจุดจ่าย (i) (m)

LB = ความยาวของบูม Luffing

V_r = ความเร็วในแนวนอนของรถเข็น (m/min)

V_{luff} = ความเร็วการล่อของ jib (m/min)

V_w = ความเร็วการแกว่งของ jib (rad/min)

V_v = ความเร็วแนวตั้งในการยก (m/min)

T = เวลาเดินทางของเบ็ดทั้งหมดจากจุด i ไปยังจุด j

T_r = เวลาสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวนอนของตะขอ (min)

T_{luff} = เวลาสำหรับการเคลื่อนตัวของตะขอ (min)

T_w = เวลาในการแกว่งตะขอ (min)

T_v = เวลาในการยกตะขอในแนวตั้ง (min)

T_h = เวลาในการเคลื่อนที่ของตะขอในแนวนอน (min)

T_L = เวลาในการโหลด

T_u = เวลาขนถ่าย

α = พารามิเตอร์การเคลื่อนไหวพร้อมกันของ jib (ระดับการประสานงานของการเคลื่อนที่ของตะขอในแนวนอนและแนว

สัมผัสในแนวนอนระหว่าง 0 ถึง 1) (สันนิษฐานว่าเป็น 0.25)

β = ของพารามิเตอร์การเคลื่อนไหวพร้อมกัน (ระดับของการประสานงานของการเคลื่อนที่ของตะขอในแนวนอนแนวตั้งและแนวนอนระหว่าง 0 และ 1) (สันนิษฐานว่าเป็น 1.0)

แต่ละงานวิจัยที่กล่าวถึงมีเพียงการคำนวณจุดติดตั้งของทาวเวอร์เครนที่เหมาะสมเท่านั้น ไม่ได้กล่าวถึงจุดตำแหน่งของกองวัสดุก่อสร้าง และจุดติดตั้งบนอาคารด้วย บทความนี้ได้ทำการวิจัยถึงทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งของทาวเวอร์ ตำแหน่งของกองวัสดุ และตำแหน่งจุดติดตั้งของอาคารแต่ละจุดของแต่ละชั้น ทำให้ผลที่ได้รับมีประสิทธิภาพในรูปแบบการนำเสนอที่เสมือนจริงมากขึ้น

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) นำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) มาใช้ในการวิเคราะห์

เพราะเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติเลียนแบบวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต โดยอาศัยแนวคิดที่ว่า ยีนของสิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงจะมีโอกาสในการสร้างทายาทจากรุ่นสู่รุ่นมากกว่ายีนของสิ่งมีชีวิตที่ไม่แข็งแรง ประกอบด้วย ประชากร (population) พ่อและแม่พันธุ์ (parent) ทายาท (offspring) การสุ่มเลือก (selection) การแสดงโครโมโซม (chromosome representation) ดังตารางที่ 1 การผสมข้ามสายพันธุ์ (crossover) ดังตารางที่ 2 กลายพันธุ์ (mutation) ดังตารางที่ 3 และ 4 ความแข็งแรง (fitness value) และฟังก์ชันความแข็งแรง (fitness function) โดยการสุ่มเลือกจะใช้วิธี Roulette wheel ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_j(f_j)} \text{ For } j = 1, \dots, N \quad (2)$$

เมื่อ P_i คือ ค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกคัดเลือกของโครโมโซม i

f_i คือ ความแข็งแรง (Fitness Value)

N คือ จำนวนของประชากร (Population)

ตารางที่ 1 : ตัวอย่าง Chromosome Representation

ตำแหน่งติดตั้งทาวเวอร์เครน (Population)						
Parent 1	1	2	3	4	5	6
Parent 2	1	2	6	5	3	4
Parent 3	1	6	2	4	5	3

ตารางที่ 2 : ตัวอย่างการผสมข้ามสายพันธุ์ (Crossover)

ตำแหน่งติดตั้งทาวเวอร์เครน (Population)						
Parent 1	1	2	6	5	3	4
Parent 2	1	6	2	4	5	3
ผสมข้ามสายพันธุ์ (Crossover)						
Offspring 1	1	2	6	4	5	3
Offspring 2	1	6	2	5	3	4

ตารางที่ 3 : ตัวอย่างการกลายพันธุ์แบบที่ 1 (Mutation)

ตำแหน่งติดตั้งทาวเวอร์เครน (Population)						
Parent 1	1	2	6	5	3	4
กลายพันธุ์ (Mutation)						
Mutation	1	2	5	6	3	4

ตารางที่ 4 : ตัวอย่างการกลายพันธุ์แบบที่ 2 (Mutation)

ตำแหน่งติดตั้งทาวเวอร์เครน (Population)						
Parent 1	1	2	3	4	5	6
Offspring 1	1	2	6	4	5	3
กลายพันธุ์ (Mutation)						
Mutation	1	3	6	4	5	2

3.2) การทดสอบกับโจทย์ปัญหาจริง

ตั้งโจทย์ เป็นโครงการก่อสร้าง อาคารห้องชุดพักอาศัย สูง 10 ชั้นเท่ากัน รวม 230 ยูนิต บนที่ดินขนาด 10,000 ตร.ม. มีแบบแปลนภาพรวมของโครงการ และกำหนดกริดพื้นที่โครงการก่อสร้าง ตามแปลนรูปที่ 2

3.3) Installation Point

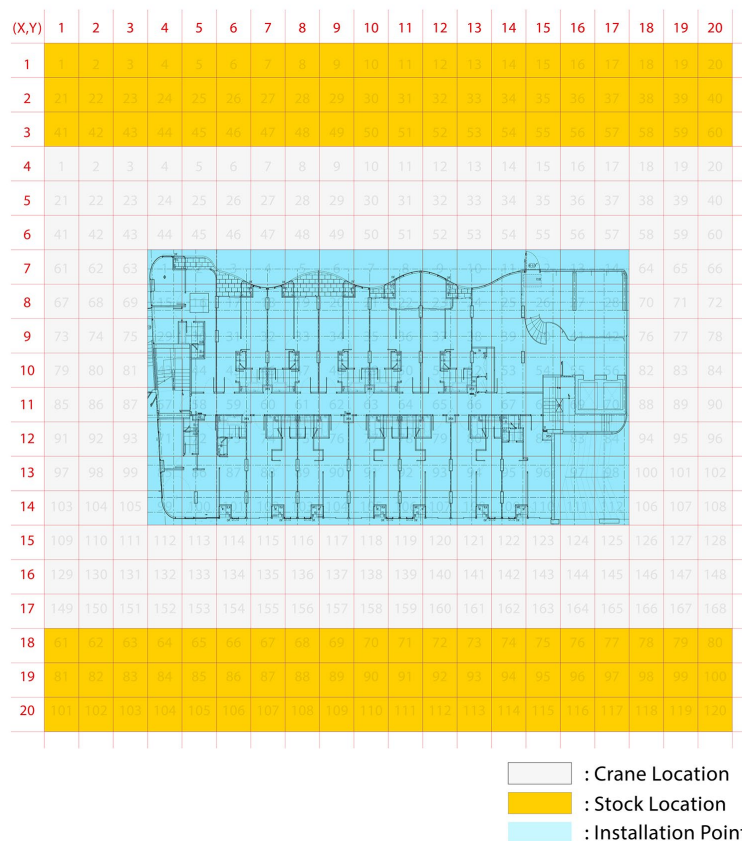
จุดติดตั้งและกำหนดกิจกรรมกำหนด 1,120 กิจกรรม (112 กิจกรรม ต่อ 1 ชั้น) มีทั้งหมด 10 ชั้น

3.4) Tower Crane Location

ตำแหน่งที่ตั้งทาวเวอร์เครนและกำหนดกิจกรรมกำหนด 168 กิจกรรม

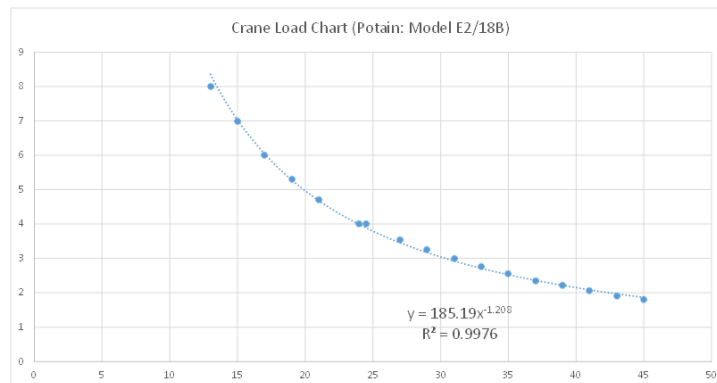
3.5) Stock Location

ตำแหน่งที่ตั้งสต็อก กองวัสดุและกำหนดกิจกรรมกำหนด 120 กิจกรรม



รูปที่ 2 : แปลนและกำหนดกริดพื้นที่โครงการก่อสร้าง

ทาวเวอร์เครน Tower Crane ยี่ห้อ Potain รุ่น E2/18B																	
ความสูงในฐาน 35 เมตร ความยาวแขน 45 เมตร																	
น้ำหนักยกสูงสุด 8 ตัน @ 13 เมตร น้ำหนักยกปลายแขน 1.8 ตัน @ 45 เมตร																	
m	13	15	17	19	21	24	24.5	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45
t	8	7	6	5.3	4.7	4	4	3.55	3.25	3	2.75	2.55	2.35	2.22	2.05	1.9	1.8

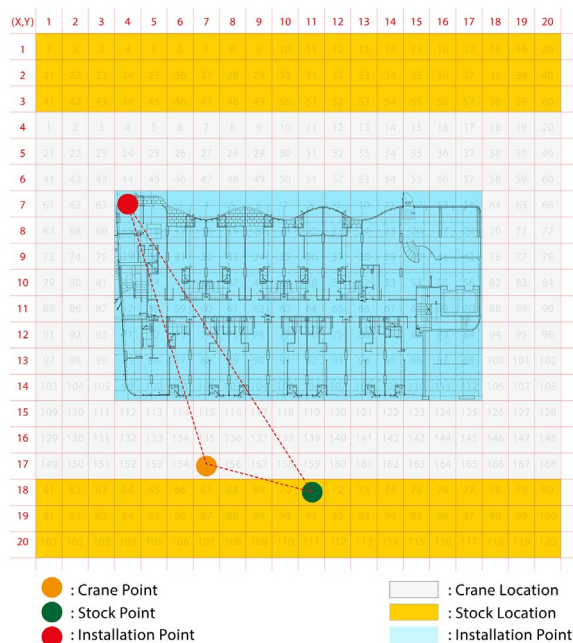


รูปที่ 3 : Crane Load Chart (Potain: Model E2/18B)

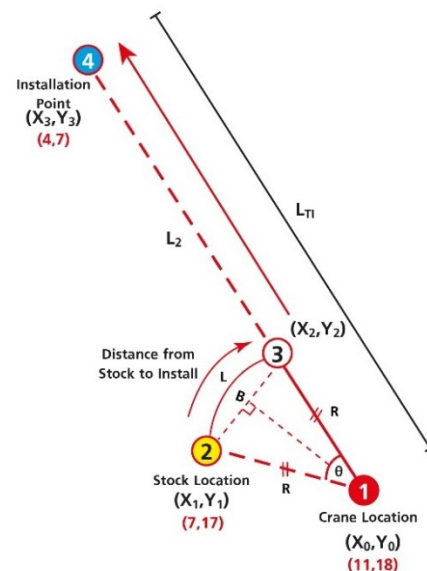
3.6) ตารางน้ำหนักการโหลดของทาวเวอร์เครน (Crane Load Chart (Potain: Model E2/18B))

3.7) คำนวณน้ำหนักโหลดสูงสุดต่อรอบ Max Load per Cycle (T) ในแต่ละรุ่นของทาวเวอร์เครน

คำนวณจาก รูปที่ 3: Crane Load Chart (Potain: Model E2/18B)



รูปที่ 4 : แพลนและกำหนดกริดพื้นที่จุดในการคำนวณ



รูปที่ 5 : รูปแบบและสมการในการคำนวณ

$$R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (3)$$

$$L_{Ti} = \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_3 - y_0)^2} \quad (4)$$

$$L_2 = L_{Ti} - R \quad (5)$$

$$L_{Total} = \frac{2\pi r}{360^\circ} \quad (6)$$

$$B = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7)$$

$$\theta = 2 \times \sin^{-1} \left(\frac{B/2}{R} \right) \quad (8)$$

$$L_{Total} = L + |L_{Ti} - R| \quad (9)$$

$$L_{Total} = \frac{2\pi r}{360^\circ} \left(2 \times \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{2R} \right) + \left| \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2} - \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \right| \right) \quad (10)$$

เมื่อ X_0, Y_0 = พิกัดของจุดเครน

X_1, Y_1 = พิกัดของจุดกองวัสดุ

X_2, Y_2 = พิกัดของแนวรัศมีเหวี่ยงทิศทางไปจุดติดตั้ง

X_3, Y_3 = พิกัดของแนวรัศมีเหวี่ยงทิศทางไปจุดติดตั้ง

R = ระยะทางความยาวจากเครนไปยังจุดกองวัสดุ

L_{π} = ระยะทางความยาวจากเครนไปยังจุดติดตั้ง

L_{Total} = ระยะทางรวมความยาวจากเครนไปจุดกองวัสดุและไปยังจุดติดตั้ง

3.8) ประชากรในรุ่น (Populations for a Generation)

กำหนดจำนวนคำตอบในแต่ละรุ่น 100 คำตอบ ในแต่ละรุ่นจะดึงคำตอบจำนวน 1 คู่ (1 parents) ด้วยวิธี Roulette wheel เพื่อมาปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี Crossover และ Mutation

3.9) การวนหาคำตอบ (Iterations)

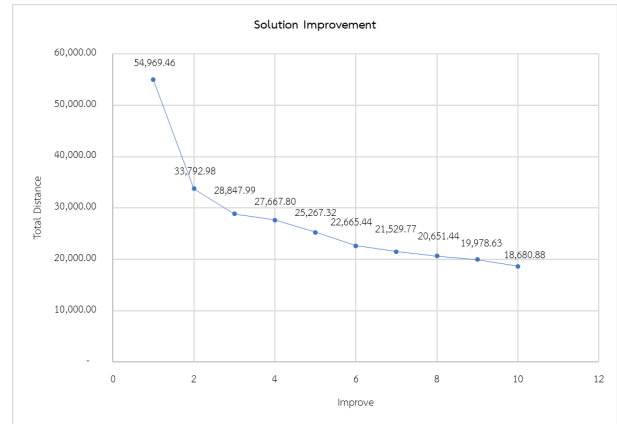
กำหนด 1000 รุ่น

3.10) คำนวณระยะทางรวมจากสต็อกถึงการติดตั้ง

3.11) วิเคราะห์และเปรียบเทียบหาค่าความเหมาะสมที่สุดของระยะทางรวมจากสต็อกถึงการติดตั้ง (Total Distance)

ตารางที่ 5 : ค่าความเหมาะสมที่สุดของการวนหาคำตอบ (iteration) ของทาวเวอร์เครนความยาวแขน 45 เมตร

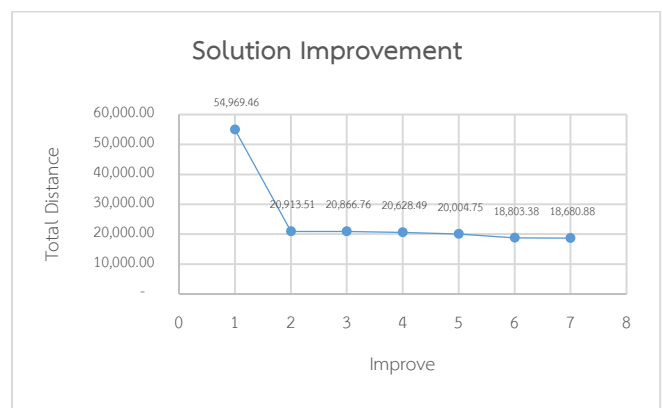
Improve	Iteration	Solution ID	Total Distance
1	1	1	54,969.46
2	1	6	33,792.98
3	1	11	28,847.99
4	1	62	27,667.80
5	2	127	25,267.32
6	2	147	22,665.44
7	5	422	21,529.77
8	8	744	20,651.44
9	9	866	19,978.63
10	17	1,676	18,680.88



รูปที่ 6 : กราฟค่าความเหมาะสมที่สุดของการวนหาคำตอบ (iteration) ของทาวเวอร์เครนความยาวแขน 45 เมตร

ตารางที่ 6 : ค่าความเหมาะสมที่สุดของการวนหาคำตอบ (iteration) ของทาวเวอร์เครนความยาวแขน 40 เมตร

Improve	Iteration	Solution ID	Total Distance
1	1	1	54,969.46
2	1	37	20,913.51
3	3	300	20,866.76
4	4	360	20,628.49
5	7	633	20,004.75
6	148	14,763	18,803.38
7	298	29,730	18,680.88

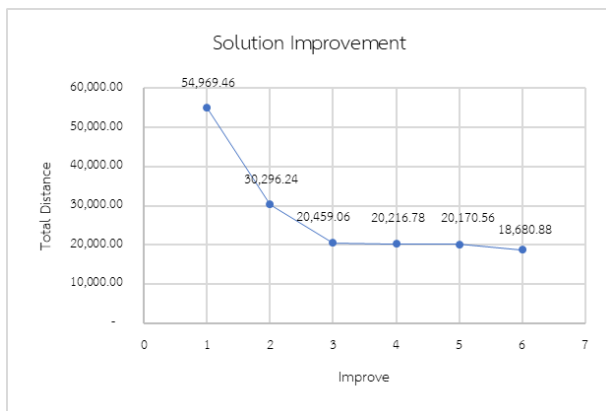


รูปที่ 7 : กราฟค่าความเหมาะสมที่สุดของการวนหาคำตอบ (iteration) ของทาวเวอร์เครนความยาวแขน 40 เมตร

ตารางที่ 7 : ค่าความเหมาะสมที่สุดของการวนหาคำตอบ (iteration)

ของทาวเวอร์เครนความยาวแขน 35 เมตร

improve	Iteration	Solution ID	Total Distance
1	1	1	54,969.46
2	1	4	30,296.24
3	1	24	20,459.06
4	2	121	20,216.78
5	2	190	20,170.56
6	3	242	18,680.88



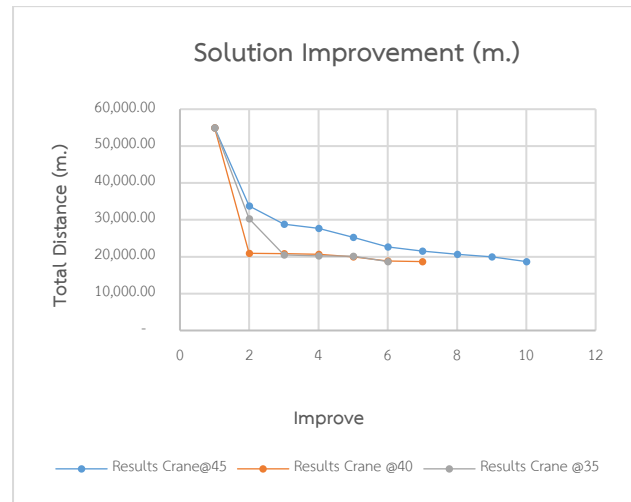
รูปที่ 8 : กราฟค่าความเหมาะสมที่สุดของการวนหาคำตอบ (iteration)

ของทาวเวอร์เครนความยาวแขน 35 เมตร

ตารางที่ 8 : ค่าความเหมาะสมที่สุดของการหาคำตอบ (results distance)

ของทาวเวอร์เครนแต่ละช่วง

Results Distance (m.)			
improve	Crane @45	Crane @40	Crane @35
1	54,969.46	54,969.46	54,969.46
2	33,792.98	20,913.51	30,296.24
3	28,847.99	20,866.76	20,459.06
4	27,667.80	20,628.49	20,216.78
5	25,267.32	20,004.75	20,170.56
6	22,665.44	18,803.38	18,680.88
7	21,529.77	18,680.88	-
8	20,651.44	-	-
9	19,978.63	-	-
10	18,680.88	-	-



รูปที่ 9 : กราฟค่าความเหมาะสมที่สุดของการวนหาคำตอบ (distance)

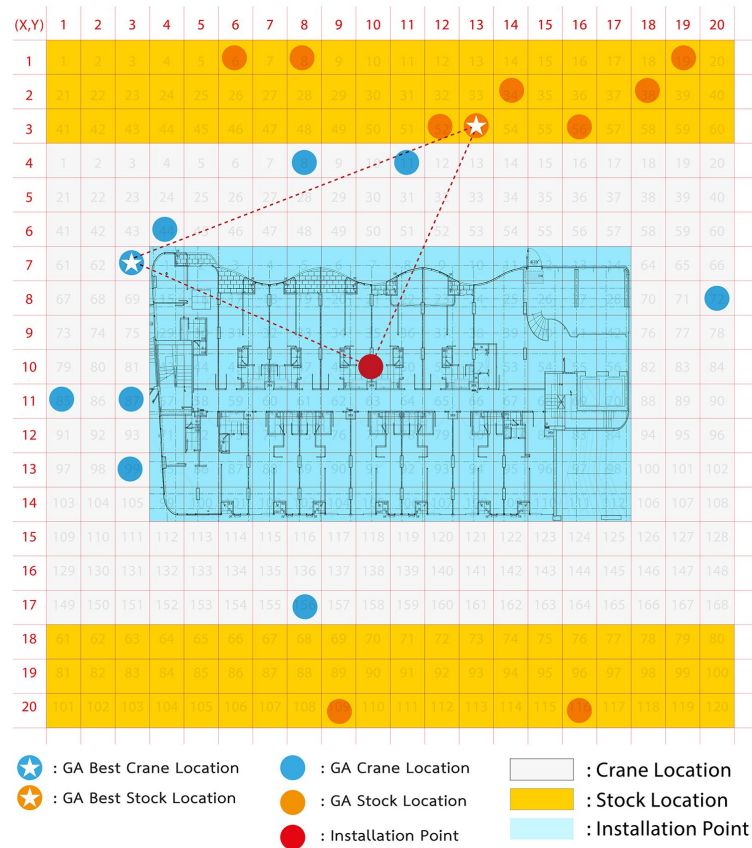
ของทาวเวอร์เครนความยาวแขน 45/40/35 เมตร

จากตารางที่ 8 และรูปที่ 9 พบว่า คำตอบที่ดีที่สุดคือ 1000 รุ่น ยิ่งวนหาคำตอบทั้งหมดของแต่ละรุ่นมากเท่าไร ก็จะได้ระยะจุดตำแหน่งที่ตั้งทาวเวอร์เครน และตำแหน่งที่ตั้งสต็อกกองวัสดุ ระยะทางในการขนส่งที่น้อยลงเท่านั้น สังเกตได้จากการปรับปรุงคำตอบครั้งที่ 2 และ 3 ของ 1000 รุ่น ระยะทางที่ได้จะน้อยลงถึงหลักหมื่น เมื่อเทียบกับ 5 และ 10 รุ่น ระยะทางที่ได้จะน้อยลงซึ่งจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงจุดที่ไม่สามารถหาตำแหน่งที่น้อยลงกว่านี้ได้

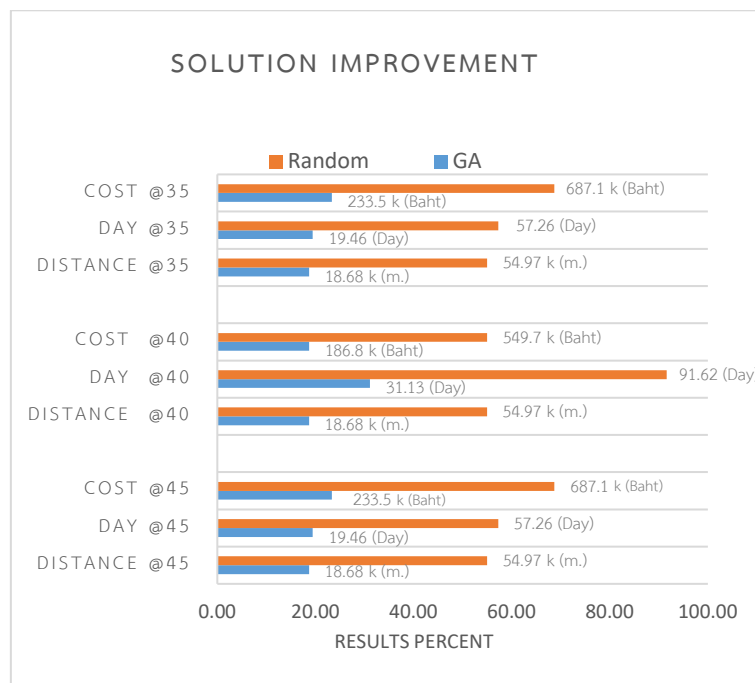
ตารางที่ 9 : เปรียบเทียบระหว่างการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

และการสุ่มเลือกตำแหน่ง

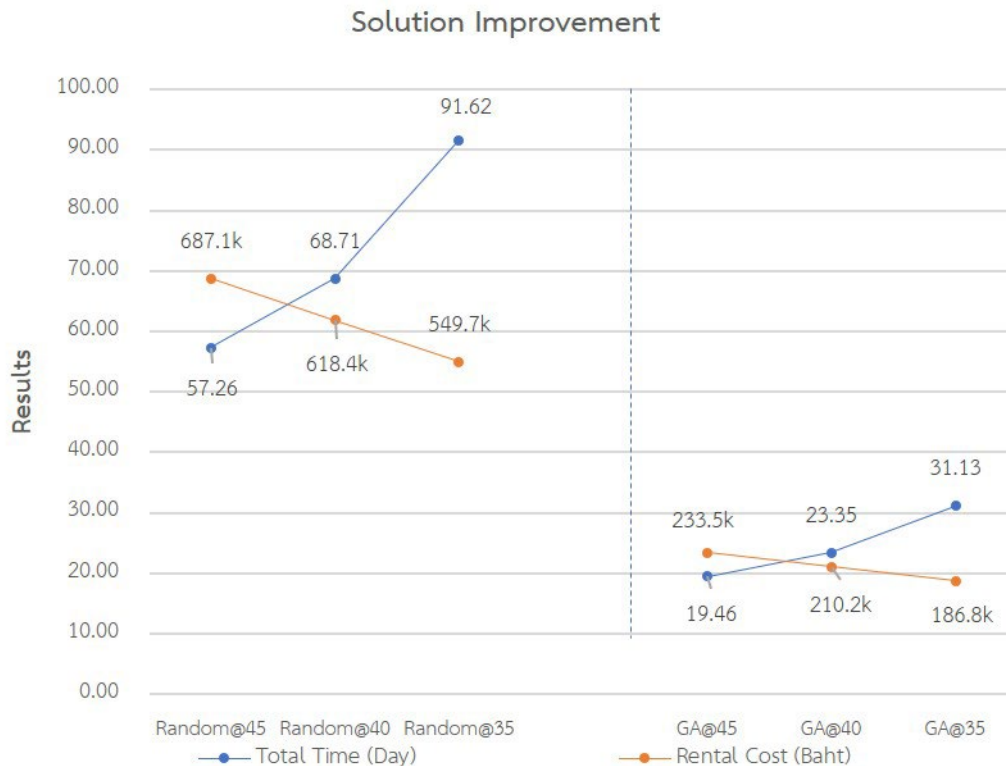
	GA	Random	%Improve
Distance @45	18.68	54.97	66.02
Day @45	19.46	57.26	66.02
Cost @45	23.35	68.71	66.02
Distance @40	18.68	54.97	66.02
Day @40	31.13	91.62	66.02
Cost @40	18.68	54.97	66.02
Distance @35	18.68	54.97	66.02
Day @35	19.46	57.26	66.02
Cost @35	23.35	68.71	66.02



รูปที่ 10 : แผนและกำหนดกริดพื้นที่จุดในการคำนวณค่าความเหมาะสมที่สุดของการหาคำตอบ (results distance)



รูปที่ 11 : กราฟค่าแสดงเปรียบเทียบระหว่างการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการสุ่มเลือก



รูปที่ 12 : กราฟค่าแสดงเปรียบเทียบระหว่างจำนวนวันและค่าใช้จ่าย

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากข้อมูลรูปที่ 10 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลองจุดตำแหน่งที่ตั้งทาวเวอร์เครน และตำแหน่งที่ตั้งสต็อกกองวัสดุ ซึ่งใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยเลือกการปรับปรุงคำตอบครั้งที่ 1-10 มาเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากระยะทางรวมจากสต็อกกองวัสดุถึงการติดตั้ง Total Distance from Stock to Installation (m) ของแต่ละกรณีของการใช้ทาวเวอร์เครนความยาวแขน 35, 40 และ 45 เมตร ผลจากการเลือกใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ทำให้เห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์คำตอบดีขึ้นถึง 66.02% จึงสรุปได้ว่าการใช้ทาวเวอร์เครนความยาวแขนยิ่งมากระยะเวลาในการทำงานจะสั้นลง และค่าใช้จ่ายในการเช่าก็จะสูงขึ้น ดังนั้นการเลือกขนาดของทาวเวอร์เครน และจุดตำแหน่งการติดตั้งให้สอดคล้องกับแผนงานของโครงการก็จะส่งผลให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในโครงการ ต้นทุนทางอ้อม (indirect cost) และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการว่างงาน (idling cost) อีกทั้งยังคำนึงถึงระยะเวลาในการก่อสร้างโครงการ (project duration) อีกด้วย

5) ข้อเสนอแนะ

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาวิเคราะห์เพียงแค่วิธีแบบจำลองการติดตั้งจุดตำแหน่งที่ตั้งทาวเวอร์เครน และตำแหน่งที่ตั้งสต็อกกองวัสดุ เพื่อหาระยะทางที่เหมาะสมที่สุดในการขนย้ายในกิจกรรมต่าง ๆ ของการก่อสร้างโครงการ หากกรณีมีตำแหน่งที่ตั้งสต็อกกองวัสดุ มากกว่า 1 ตำแหน่ง อาจจะทำให้การขนย้ายกองวัสดุไปยังจุดติดตั้งได้ระยะทางที่สั้นและไวยิ่งขึ้น ย่อมส่งผลให้การส่งวัสดุไปยังจุดติดตั้งต่าง ๆ เป็นไปตามแผนงานที่วางไว้ การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม พบว่าทำให้ได้คำตอบที่ดีกว่าการคำนวณหาจุดติดตั้ง ที่ตั้งทาวเวอร์เครน และตำแหน่งที่ตั้งสต็อกกองวัสดุเอง ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ช่วยในการคำนวณที่ซับซ้อนของ maximum load ตามรัศมีของทาวเวอร์เครนแต่ละขนาด ไปยังจุดตำแหน่งของกองวัสดุก่อสร้างและจุดติดตั้งด้วย ซึ่งมีการคำนวณระยะจุดติดตั้งทั้ง 3 แกน X, Y, Z ในแต่ละรอบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยและไม่ให้เกิดอุบัติเหตุได้ งานวิจัยนี้จึงสามารถต่อยอดในการสร้างสมการแบบจำลองการส่งวัสดุแต่ละประเภทในกิจกรรมโครงการก่อสร้าง เพื่อคำนึงถึง

ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่โครงการต้องเสียไปจากการวางแผนการก่อสร้างที่ไม่ถูกต้องได้

งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้กับโครงการการอื่นได้ โดยการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ และปรับระยะกำหนดกริดพื้นที่ให้สอดคล้องกับระยะของแปลน

6) ข้อจำกัดในการวิจัย

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรการติดตั้งจุดตำแหน่งที่ตั้งทาวเวอร์เครน และตำแหน่งที่ตั้งสต็อกกองวัสดุเพียงอย่างละ 1 จุด หากกรณีมีทาวเวอร์เครน และตำแหน่งที่ตั้งสต็อกกองวัสดุ มากกว่า 1 ตำแหน่ง จะยังไม่สามารถคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมเพื่อนนิสิตทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาตลอดจนตรวจสอบแก้ไขในงานวิจัยฉบับนี้

REFERENCES

- [1] H. Zhang and J. Y. Wang, "Particle swarm optimization for construction site unequal-area layout," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 134, no. 9, pp. 739–748, 2008.
- [2] M. Marzouk and A. Abubakr, "Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms," *Autom. Constr.*, vol. 61, pp. 1–15, 2016.
- [3] M. A. Abdelmegid, K. M. Shawki, and H. Abdel-Khalek, "GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites," *Alex. Eng. J.*, vol. 54, no. 3, pp. 519–526, 2015.
- [4] C. M. Tam, T. K. L. Tong, and W. K. W. Chan, "Genetic algorithm for optimizing supply locations around tower crane," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 127, no. 4, pp. 315–321, 2001.
- [5] M. Al-Hussein, M. A. Niaz, H. Yu, and H. Kim, "Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites," *Autom. Constr.*, vol. 15, no. 5, pp. 554–562, 2006.
- [6] K. Alkris and J. C. Mangin, "A new model for optimizing the location of cranes and construction facilities using genetic algorithms," in *Proc. 21st Annu. ARCOM Conf.*, London, UK, 2005, pp. 981–991.
- [7] C. Huang, C. K. Wong, and C. M. Tam, "Optimization of tower crane and material supply locations in a high-rise building site by mixed-integer linear programming," *Autom. Constr.*, vol. 20, no. 5, pp. 571–580, 2011.
- [8] J. Irizarry and E. P. Karan, "Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration," *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 17, no. 23, pp. 351–366, 2012.
- [9] L.-C. Lien and M.-Y. Cheng, "Particle bee algorithm for tower crane layout with material quantity supply and demand optimization," *Autom. Constr.*, vol. 45, pp. 25–32, 2014.

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตอุปกรณ์ใช้ระดับน้ำมัน โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม

ศุภพร ศีลาลอย^{1*} จิรวัดน์ ณ พัทลุง²

^{1,2}สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, ชลบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : supat_si@rmutto.ac.th

รับต้นฉบับ : 22 มิถุนายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 8 สิงหาคม 2567; ตอรับบทความ : 20 สิงหาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดของเสียในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม (DOE) การศึกษาเบื้องต้นพบว่าอุปกรณ์ใช้ระดับน้ำมันขึ้นงานฉีดไม่เต็มตามข้อกำหนดของการผลิต เกิดจากพลาสติกที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ เกิดการแข็งตัวก่อนที่จะเต็มแม่พิมพ์ เนื่องจากสภาวะของเครื่องจักรไม่คงที่ ได้แก่ แรงดันฉีดพลาสติก (P) กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2), เวลาในการฉีดพลาสติก (T) วินาที (sec) และความเร็วในการฉีด (S) มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) จากนั้นเลือกใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ ใช้พารามิเตอร์ในการทดลอง ดังนี้ แรงดันฉีดพลาสติก (P) 966, 1000, 1050, 1100, 1134 เวลาในการฉีดพลาสติก (T) 17, 20, 25, 30, 33 และความเร็วในการฉีด (S) 13, 15, 18, 20, 22 จึงได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ แรงดันในการฉีดพลาสติก (P) = 1022 kg/cm^2 เวลาที่ใช้ในการฉีดพลาสติก (T) = 32 sec ความเร็วในการฉีด (S) = 17 mm/s เมื่อนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเหล่านี้มาดำเนินการผลิตจริง พบว่าสามารถลดปริมาณของเสียจากเดิมร้อยละ 2.27 เหลือร้อยละ 1.68 และสามารถลดต้นทุนต่อหน่วยลงจากเดิม 5 บาทต่อชิ้น เหลือ 4.27 บาทต่อชิ้น

คำสำคัญ : การออกแบบส่วนประสมกลาง ลดของเสีย งานฉีดขึ้นรูปพลาสติก

Determining the Optimal Parameters of Oil Checking Processing Using Engineering Experimental Design Techniques

Supat Silaloy^{1*} Chirawat Na-Badalung²

^{1*,2}*School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: supat_si@rmutto.ac.th

Received: 22 June 2024; Revised: 8 August 2024; Accepted: 20 August 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

Focuses on reducing waste in the plastic injection molding process by using the Design of Experiments (DOE) technique. Preliminary studies found that the oil level checking devices did not meet production specifications due to the plastic solidifying before completely filling the mold. This issue arose from unstable machine conditions, including injection pressure (P) in kilograms per square centimeter (kg/cm²), injection time (T) in seconds, and injection speed (S) in millimeters per second (mm/s). To identify the optimal parameters, the central composite design method was employed. The experimental parameters used were: injection pressure (P) at 966, 1000, 1050, 1100, and 1134 kg/cm²; injection time (T) at 17, 20, 25, 30, and 33 seconds; and injection speed (S) at 13, 15, 18, 20, and 22 mm/s. The optimal parameters determined were an injection pressure (P) of 1022 kg/cm², injection time (T) of 32 seconds, and injection speed (S) of 17 mm/s. Applying these optimal parameters in actual production resulted in a reduction of waste from 2.27% to 1.68%, and the cost per unit decreased from 5 baht per piece to 4.27 baht per piece.

Keywords: Central composite design (CCD), Defect reduction, Plastic injection

1) บทนำ

จากสถานการณ์ของอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลก จะเห็นได้ว่าหลายปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมยานยนต์ต้องเผชิญกับผลกระทบจากเหตุการณ์ต่าง ๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นวิกฤติการณ์เศรษฐกิจโลกหรือการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและผลกระทบจากความผันผวนของราคาพลังงาน จากสถานการณ์ดังกล่าวนี้ทำให้ผู้ประกอบการในธุรกิจอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ต้องตระหนักและปรับตัวให้เท่าทันต่อสถานการณ์ต่าง ๆ [1] รวมถึงอุตสาหกรรมงานฉีดแม่พิมพ์พลาสติก ซึ่งเป็นกลุ่มธุรกิจหนึ่งที่มีอัตราการเติบโตและการแข่งขันที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง [2] จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ผลิตจะต้องปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [3]

บทความจากงานวิจัยในการศึกษาและปรับปรุงคุณภาพของการลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป [4] พบว่าในงานวิจัยนี้มีการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ Box-Behnken Design เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดรวมของโรงอากาศมีค่าน้อยกว่า 500 ไมครอน โดยเบื้องต้นได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่น่าจะมีผลต่อการเกิดของเสียแบบโรงอากาศ โดยใช้หลักการแผนผังก้างปลา ร่วมกับการวิเคราะห์กับผู้เชี่ยวชาญ พบว่ามี 4 ปัจจัยที่น่าจะส่งผลได้แก่ แรงอัดของแม่พิมพ์, แรงฉีดเรซิน, ระยะเวลาในการฉีดเรซิน และระยะเวลาในการอุ่นเรซิน จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยส่งผลต่อการเกิดของเสียแบบโรงอากาศแบบมีนัยสำคัญ รวมทั้งอันตรกิริยาแรงอัดและระยะเวลาในการอุ่นเรซิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนืด แรงและความเร็วในการไหลมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเรซิน โดยได้ขนาดรวมของโรงอากาศเฉลี่ยที่น้อยที่สุดที่ 218.25 ไมครอน และจากการทดสอบยืนยันผลพบว่าไม่มีของเสียเนื่องจากขนาดโรงอากาศเกินกว่า 500 ไมครอน

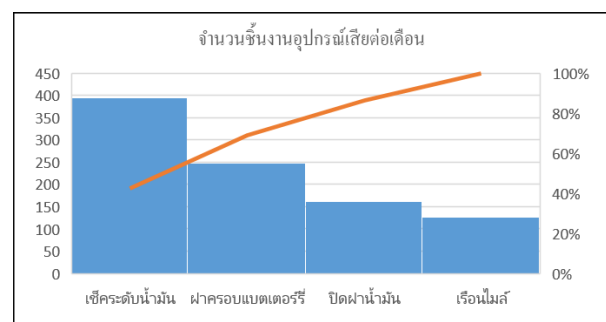
จากการศึกษาและปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการฉีดพลาสติกของโรงงานกรณีศึกษา ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นส่วนฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ติดตั้งนอกอาคารที่ผลิตจากการฉีดพลาสติก [5] จากการศึกษาพบว่าความเร็วในการฉีดพลาสติก, ความดันในการฉีด, ความเร็วของสกรู, ความเร็วในการหลอมเหลว และอุณหภูมิภายในกระบอบสูบส่วนกลางเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียแบบฉีดไม่เต็ม และเมื่อทำการพิจารณาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม พบว่าความเร็วในการฉีดพลาสติกควรอยู่ที่ 47 มิลลิเมตรต่อวินาที, ความดันในการฉีด

พลาสติก 42.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสกรู 91.5 มิลลิเมตรต่อวินาที, ความเร็วในการหลอมพลาสติก 7.67 มิลลิเมตรต่อวินาที และอุณหภูมิภายในกระบอบสูบส่วนกลาง 225 องศาเซลเซียส โดยการปรับใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ทำให้สามารถลดของเสียแบบฉีดไม่เต็มที่เกิดขึ้นได้ 1.94%

วัตถุประสงค์ในการศึกษางานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกอุปกรณ์เชื้อระดับน้ำมันของบริษัทแห่งหนึ่งซึ่งกำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับของเสียชิ้นงานฉีดไม่เต็มในกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ใช้การออกแบบการทดลองด้วยการออกแบบส่วนประสมกลาง [6] ใช้เป็นแนวทางนำไปสู่ระดับปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อการผลิตชิ้นงานพลาสติกด้วยกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งบทสรุปสุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้จะได้นำเอาไปสร้างเป็นมาตรฐานการทำงานของกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติก (Standard Operation Procedure: SOP) และนำผลการปรับปรุงที่ได้ไปปรับใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ในบริษัทต่อไป

2) ข้อมูลการวิจัย

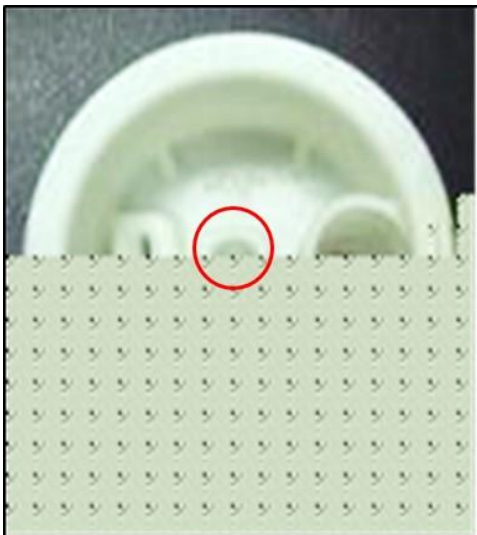
สถานการณ์ปัจจุบันของกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกในบริษัทแห่งหนึ่งมีของเสีย (defect) ที่เกิดขึ้นกับหลายผลิตภัณฑ์ แต่พบว่าผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เชื้อระดับน้ำมัน มีจำนวนของเสียสูงที่สุด คือ 394 ชิ้นต่อเดือน ดังรูปที่ 1 จึงนำผลิตภัณฑ์ชิ้นงานอุปกรณ์เชื้อระดับน้ำมัน ดังรูปที่ 2 มาแก้ปัญหาด้วยการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของอุปกรณ์เชื้อระดับน้ำมัน ซึ่งชิ้นงานฉีดไม่เต็มและชิ้นงานเสียหาย (Dimension NG) ดังรูปที่ 3 เกิดเป็นของเสียจำนวนมาก (เนื่องจากรูปภาพเป็นความลับทางการค้าจึงได้แสดงรูปภาพภายในชิ้นงานเพียงบางส่วนเท่านั้น)



รูปที่ 1 : กราฟจำนวนปริมาณชิ้นงานเสียต่อเดือน



รูปที่ 2 : ชิ้นงานอุปกรณ์ซีกระดับน้ำมัน



รูปที่ 3 : ชิ้นงานที่เสียหายไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ

3) วิธีดำเนินการวิจัย

แนวทางในการปรับปรุงปัญหาจะเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) [7] โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 พารามิเตอร์ ที่ได้มาจากการวิเคราะห์เบื้องต้น (pretest) [3] ของข้อมูลการผลิตปัจจุบันจากบันทึกการทำงาน ได้แก่ แรงดันในการฉีดพลาสติก (injection pressure: P) 1,000 และ 1,100 kg/cm² เวลาในการฉีดพลาสติก (injection time: T) 20 และ 30 sec และความเร็วในการฉีด (injection speed: S) 15 และ 20 mm/s เป็นระดับพารามิเตอร์ในการนำเข้าสู่การออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถ

แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับระดับของพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 1 ส่วนผลตอบแทน (response) จะเป็นของเสีย (defect) ที่เกิดขึ้นหลังการผลิต [8] สามารถแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งได้มาจากการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

ตารางที่ 1 : พารามิเตอร์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	แรงดัน (P) kg/cm ²	เวลาฉีด (T) sec	ความเร็ว (S) mm/s
ระดับ 1	966	17	13
ระดับ 2	1000	20	15
ระดับ 3	1050	25	18
ระดับ 4	1100	30	20
ระดับ 5	1134	33	22

ข้อมูลจากการทดลองตามแผนการทดลองเชิงสถิติด้วยเทคนิค CCD ของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ซีกระดับน้ำมัน หลังจากประมวลผลระดับของพารามิเตอร์ในการทดลองแล้ว จะได้แผนการทดลองจำนวน 20 ชุด คือ ทดลองจำนวน 1 ครั้ง ไม่ได้มีการทดลองซ้ำ เนื่องจากข้อจำกัดของบริษัท และผลการทดลอง แสดงข้อมูลการทดลองได้ดังตารางที่ 2 โดยผลตอบแทน 0 คือ ชิ้นงานดี และ ผลตอบแทน 1 คือ ชิ้นงานเสีย

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

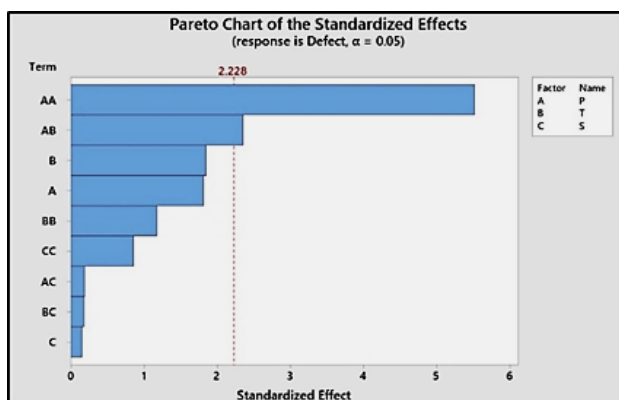
การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) ตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) [9] นั้น สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 3 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ตัวแปรตอบสนอง คือ ปริมาณของเสียประเภทฉีดไม่เต็มที่เกิดขึ้นในช่วงปรับฉีดพบว่าปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งได้แก่ ปัจจัยหลัก (main effect) จำนวน 2 ปัจจัย คือ แรงดันในการฉีดพลาสติก (P) และเวลาในการฉีด (T) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของเสียแบบฉีดไม่เต็ม พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ แรงดันในการฉีดพลาสติก และเวลาในการฉีด (p-value < 0.05)

สมการแสดงของเสียจากการผลิตอุปกรณ์ซีกระดับน้ำมัน เป็นผลลัพธ์ของการผลิตอุปกรณ์ซีกระดับน้ำมัน ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงดันในการฉีดพลาสติก เวลาในการฉีดพลาสติก และความเร็วในการฉีด สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Defect} = & 220.2 - 0.3868 P - 1.309 T - 0.219 S + \\ & 0.000175 P*P + 0.00403 T*T + 0.0099 \\ & S*S + 0.001000 P*T + 0.001000 P*S - \\ & 0.000163 P*S + 0.00154 T*S \end{aligned} \quad (1)$$

ตารางที่ 2 : ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ตามการทดลอง CCD

ลำดับ	แรงดัน (kg/cm ²)	เวลาฉีด (sec)	ความเร็ว (mm/s)	Defect ชิ้นงาน
1	1000	20	20	1
2	1000	30	15	0
3	1050	25	18	0
4	966	25	18	1
5	1050	25	22	0
6	1050	25	18	0
7	1050	25	18	0
8	1050	25	18	0
9	1050	17	18	0
10	1000	20	15	1
11	1050	25	18	0
12	1134	25	18	1
13	1050	25	13	0
14	1050	33	18	0
15	1050	25	18	0
16	1100	20	20	1
17	1000	30	20	0
18	1100	30	15	1
19	1100	30	20	1
20	1100	20	15	1

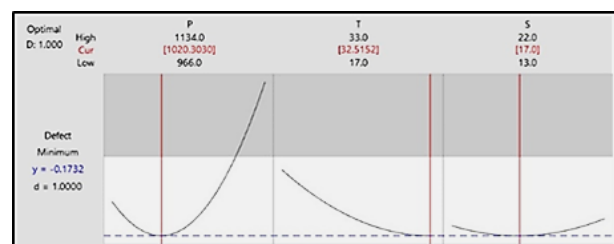


รูปที่ 4 : กราฟของปัจจัยที่มีผลกระทบกับชิ้นงาน

ตารางที่ 3 : การวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลอง CCD

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	9	3.900	0.433	4.82	0.011
P	1	0.296	0.296	3.330	0.099
T	1	0.307	0.307	3.42	0.094
S	1	0.002	0.002	0.02	0.879
P*P	1	2.740	2.739	30.45	0.000
T*T	1	0.124	0.124	1.39	0.266
S*S	1	0.066	0.066	0.74	0.411
P*T	1	0.500	0.500	5.56	0.040
P*S	1	0.003	0.003	0.04	0.850
T*S	1	0.003	0.003	0.03	0.859
Error	10	0.899	0.089	-	-
Total	19	4.800	-	-	-

ในส่วนการวิเคราะห์หาสภาวะพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (parameters optimization) ของการลดปัญหาของเสียประเภท ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม ดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์เชื้อระดับน้ำมัน คือ แรงดันในการฉีดพลาสติก (P) 1020 kg/cm² เวลาในการฉีดพลาสติก (T) 32 sec และความเร็วในการฉีด (S) 17 mm/s ซึ่งจะทำให้พบชิ้นงานฉีดไม่เต็มน้อยลงในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยจึงใช้พารามิเตอร์ที่ได้ทดลองผลิตอีกครั้งเพื่อใช้ยืนยันผลการทดลอง จำนวน 30 ตัวอย่าง [10] ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 5 : สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์

ตารางที่ 4 : ข้อมูลการทดลองผลิต จำนวน 30 ตัวอย่าง

ลำดับ	แรงดัน (kg/cm ²)	เวลาฉีด (sec)	ความเร็ว (mm/s)	Defect ชิ้นงาน
1	1020	32	17	0
2	1020	32	17	0
3	1020	32	17	0
4	1020	32	17	0

ตารางที่ 4 : ข้อมูลการทดลองผลิต จำนวน 30 ตัวอย่าง (ต่อ)

ลำดับ	แรงดัน (kg/cm ²)	เวลาฉีด (sec)	ความเร็ว (mm/s)	Defect ชิ้นงาน
5	1020	32	17	0
6	1020	32	17	0
7	1020	32	17	0
8	1020	32	17	1
9	1020	32	17	0
10	1020	32	17	0
11	1020	32	17	0
12	1020	32	17	0
13	1020	32	17	0
14	1020	32	17	0
15	1020	32	17	0
16	1020	32	17	0
17	1020	32	17	0
18	1020	32	17	1
19	1020	32	17	0
20	1020	32	17	0
21	1020	32	17	0
22	1020	32	17	0
23	1020	32	17	0
24	1020	32	17	0
25	1020	32	17	0
26	1020	32	17	0
27	1020	32	17	0
28	1020	32	17	0
29	1020	32	17	0
30	1020	32	17	0

ตารางที่ 5 : การทดสอบค่าเฉลี่ยกับเกณฑ์ของเสีย Defect 0

Null hypothesis (H ₀)	H ₀ : $\mu = 0$
t-value	p-value
1.44	0.161

หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ความถูกต้องที่ได้มาของข้อมูล โดยใช้โปรแกรม Minitab ดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่า p-value อยู่ที่ 0.161 ซึ่งมีค่ามากกว่า α 0.05 ซึ่งยอมรับ H₀ นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับของเสีย Defect 0

5) สรุปผล

งานวิจัยนี้ใช้แนวทางการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเพื่อลดปริมาณของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้ข้อมูลจากรายงานการผลิตนำมาทดลองหาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (parameters optimization) สำหรับกระบวนการผลิตอุปกรณ์ใช้ระดับน้ำมัน คือ แรงดันในการฉีดพลาสติก (P) 1020 kg/cm² เวลาในการฉีดพลาสติก (T) 32 sec และความเร็วในการฉีด (S) 17mm/s ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ใช้ระดับน้ำมันมีปริมาณของเสียลดลง หลังจากได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงนำไปทดลองผลิตอุปกรณ์ใช้ระดับน้ำมัน จำนวน 30 ตัวอย่าง เพื่อยืนยันพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าข้อมูลความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับของเสีย สามารถลดของเสีย จากเดิมที่ร้อยละ 2.27 เหลือเพียงร้อยละ 1.68 และสามารถลดต้นทุนต่อหน่วยลงจากเดิม 5 บาทต่อชิ้น เหลือ 4.27 บาทต่อชิ้น และทางบริษัท ภิรมศึกษาได้จัดทำมาตรฐานการผลิตอุปกรณ์ใช้ระดับน้ำมัน เพื่อให้พนักงานได้ปฏิบัติตามมาตรฐานที่จัดทำขึ้น รวมถึงได้นำวิธีการออกแบบการทดลองนี้ไปศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ปรับปรุงกับอุปกรณ์ปิดฝาน้ำมัน เนื่องจากมีปัญหาชิ้นงานผิดไม่เต็มเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานภิรมศึกษาที่กรุณาให้การสนับสนุน และการช่วยเหลือด้านการเก็บข้อมูลชิ้นงานตัวอย่าง ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งาน โปรแกรม Minitab สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล

REFERENCES

- [1] P. Puangdee and J. Ngaoprasertwong, "Loss reduction in injection molding machine setup in car seats (factory case study)," (in Thai), in *Proc. 39th Conf. Indus. Eng. Netw.*, Songkhla, Thailand, May 2021, pp. 585–591.
- [2] S. Mekboon and J. Plongmai, "Defects reduction in metal parts production process," (in Thai), *Kasem Bundit Eng. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 91–106, 2016.
- [3] M. Vanichdee, W. Saleekongchai, and J. Pradabwong, "Parameter design for reducing the defects of the flow marks in plastic injection molding process," (in Thai), *APHEIT J.*, vol. 9, no. 1, pp. 32–45, 2020.



- [4] S. Tangjitsitharoen, "Reduction of void defective proportion in microchip molding process," (in Thai), *J. King Mongkut's Univ. Technol. North Bangkok*, vol. 22, no. 3, pp. 610–621, 2012.
- [5] C. Laosutsan, "Design of experimental to improve quality in the plastic injection process: A case study of a plastic injection factory," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Indus. Eng., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2005.
- [6] P. Sudasna Na Ayudthaya and P. Luangpaiboon, *Design and Analysis of Experiments*. Bangkok, Thailand: Top Publishing (in Thai), 2008.
- [7] P. Palaphan, *Statistical Data Analysis and Management with Minitab*. Nonthaburi, Thailand: IDC Premier (in Thai), 2017.
- [8] M. Phipatpaiboon and P. Hongsakomprasert, "Defects reduction in a tractor peripheral equipment manufacturing plant using design of experiments technique," (in Thai), in *Proc. 12th Naresuan Res. Conf.: Res. and Inno. Nat. Develop.*, Phitsanulok, Thailand, Jul. 2016, pp. 318–329.
- [9] P. Homsri and J. Kongthana, "Design of experiments (DOE) to reduce waste in plastic injection process of automotive parts," (in Thai), *Kasem Bundit Eng. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 73–95, Dec. 2013.
- [10] S. Rassamee, P. Srisatyakul, and S. Siwawut, "Optimization of conditions for strength in bagasse-reinforced concrete forming," (in Thai) in *Proc. 3rd Conf. Rajamangala Manuf. and Manag. Technol.*, Krabi, Thailand, May 2018, pp. 314–318.

การพัฒนาแพลตฟอร์มข้อมูลชุมชนเพื่อการวิเคราะห์และวางแผนจัดการ

สุนิสา จุลรัตน์^{1*} จิรศักดิ์ นพรัตน์² มงคล มโนพิรุฬห์พร³ วรรณรัช สันติอมรทัต⁴ สกุนา เจริญปัญญาศักดิ์⁵

^{1*,2,3,4,5} ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : 6210120042@email.psu.ac.th

รับต้นฉบับ : 4 มีนาคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 23 เมษายน 2567; ตอบรับบทความ : 24 เมษายน 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

ข้อมูลแต่ละชุมชนประกอบไปด้วยข้อมูลหลากหลายแขนง ซึ่งแต่ละชุมชนมีข้อมูลที่อาจเหมือนหรือแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพพื้นที่ ภูมิอากาศ วิถีชีวิต วัฒนธรรม อาหารท้องถิ่น แหล่งพืชสมุนไพร ประเภทธุรกิจชุมชน เป็นต้น ข้อมูลโดยส่วนใหญ่ ยังไม่ได้ถูกจัดเก็บเป็นข้อมูลดิจิทัล ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละชุมชน ตำบล จังหวัด หรือระดับประเทศ ยังทำได้ล่าช้าและไม่ครอบคลุม ข้อมูลบางชุมชนซึ่งเคยถูกจัดเก็บลงระบบดิจิทัล ยังคงมีการแยกระบบจัดเก็บกันอย่างกระจัดกระจายและยังไม่เชื่อมโยงกัน ส่งผลให้ไม่สามารถบริหารจัดการข้อมูลร่วมกันได้ งานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการออกแบบและพัฒนาแพลตฟอร์มข้อมูลชุมชนเพื่อการวิเคราะห์และวางแผนจัดการ ซึ่งรองรับการจัดเก็บข้อมูลชนิดข้อความ ตัวเลข ตำแหน่งที่อยู่ วันเวลา รูปภาพ เอกสาร เป็นต้น โดยสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจากระบบต่าง ๆ ที่มีอยู่แล้วผ่าน Application Programming Interface (API) ที่กำหนดได้ โดยระบบดำเนินการจัดเก็บข้อมูลดิบบนระบบ Google Cloud Firestore จัดเก็บไฟล์บนระบบ Google Cloud Storage และจัดเก็บข้อมูลสำหรับการสืบค้นอย่างรวดเร็วบนระบบ Elasticsearch นอกจากนั้นได้ออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับบันทึกข้อมูลความหลากหลายของแต่ละชุมชน ซึ่งรองรับการสร้างโครงสร้างข้อมูลของแต่ละหมวดหมู่โดยอัตโนมัติ เพื่ออำนวยความสะดวกให้ผู้สำรวจข้อมูลชุมชนสามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น การออกแบบและพัฒนาระบบจัดการข้อมูลหลากหลายนี้นี้ จึงช่วยรวบรวมกลุ่มข้อมูลประเภทต่าง ๆ ของแต่ละชุมชนได้อย่างยืดหยุ่น ช่วยให้ผู้ใช้งานข้อมูลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาและพัฒนาเมืองได้ตามต้องการ

คำสำคัญ : การจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ การวิเคราะห์ข้อมูล การเก็บข้อมูล ระบบการจัดการข้อมูล ข้อมูลหลากหลายชนิด

Development of a Community Data Platform for Analytics and Management Planning

Sunisa Junrat^{1*} Jirasak Nopparat² Mongkon Manopiroonporn³ Wannarat Suntiamorntut⁴
Sakuna Charoenpanyasak⁵

^{1*,2,3,4,5}*Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: 6210120042@email.psu.ac.th

Received: 4 March 2024; Revised: 23 April 2024; Accepted: 24 April 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

Data from each community comprises various categories, influenced by factors such as community condition, climate, lifestyle, culture, local cuisine, plant types, and businesses. Most of this data has not been stored digitally. Analyzing data from individual communities, sub-districts, provinces, and on a national scale can be delayed and incomplete. Some of the data that was previously stored digitally are in separate, scattered, and unconnected storage systems. As a result, managing this data collectively is challenging. This study proposes the design and development of a community data platform for analytics and management planning. The platform supports storing diverse data types such as text, numbers, locations, dates, times, images, and documents. It can link data from other existing systems through defined APIs and stores raw data on Google Firebase Firestore, files on Google Cloud Storage, and data for quick retrieval on Elasticsearch. Furthermore, the platform includes the design and development of applications to record various data categories for each community. It supports the automatic creation of data structures for each data category to make data collection by community members more convenient. The design and development of this multi-data management system allow for flexible gathering of different types of data from each community. As a result, it can be used to address problems and develop cities as desired.

Keywords: Big data management, Data analytics, Data collection, Data platform, Diversity data

1) บทนำ

ข้อมูลแต่ละชุมชนประกอบไปด้วยข้อมูลหลากหลายหมวดหมู่ ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลพืชท้องถิ่น อาหารประจำถิ่น ภูมิปัญญาท้องถิ่น แหล่งที่พัก ความเชี่ยวชาญของบุคคลในพื้นที่ สภาพภูมิอากาศและแหล่งน้ำ ข้อมูลเหล่านี้มีจำนวนมากและขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ อีกทั้งข้อมูลส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับการสำรวจและบันทึกลงบนระบบดิจิทัลที่มีการจัดเก็บข้อมูลหลากหลายชนิดอย่างเหมาะสม เพื่อการสืบค้นตามช่วงเวลาที่น่าสนใจ นอกจากนี้ยังมีข้อมูลชุมชนที่ถูกจัดเก็บกระจายอยู่บนระบบดิจิทัลอื่น ๆ ซึ่งยังไม่มีมีการเชื่อมโยงข้อมูลเหล่านั้นเข้าด้วยกัน ทำให้ยังเป็นอุปสรรคต่อการบริหารจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลหลากหลายร่วมกัน

งานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลความหลากหลายสำหรับแต่ละชุมชน โดยรองรับชนิดข้อมูลรูปแบบข้อความ ตัวเลข ตำแหน่งที่อยู่ วันเวลา รูปภาพ เอกสาร เป็นต้น และสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจากระบบต่าง ๆ ที่เคยบันทึกข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลแล้วผ่าน APIs [1] ที่กำหนดโดยดำเนินการจัดเก็บข้อมูลดิบบนระบบ Google Cloud Firestore [2] จัดเก็บไฟล์บนระบบ Google Cloud Storage [3] และข้อมูลสำหรับการสืบค้นอย่างรวดเร็วบนระบบ Elasticsearch [4] นอกจากนี้ยังได้ออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับบันทึกข้อมูลหลากหลายหมวดหมู่ตามความต้องการของแต่ละชุมชน ซึ่งรองรับการสร้างโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลของแต่ละหมวดหมู่โดยอัตโนมัติ เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้ลงสำรวจเก็บข้อมูลในการรวบรวมข้อมูลที่มีลักษณะเฉพาะถิ่น เพื่อนำมาวิเคราะห์และวางแผนบริหารจัดการเมืองต่อไป ข้อมูลที่ผ่านการจัดเก็บลงสู่ระบบจัดเก็บข้อมูลความหลากหลายนี้ ผู้ใช้งานข้อมูล เช่น นักวิทยาศาสตร์ข้อมูล วิศวกรข้อมูล ผู้จัดการข้อมูลของแต่ละเมือง สามารถเลือกชุดข้อมูลที่น่าสนใจ เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจากหลากหลายแหล่งได้ เพื่อนำมาประยุกต์แก้ไขปัญหาและพัฒนาเมืองได้อย่างเหมาะสม ดังเช่นตัวอย่าง การนำข้อมูลมาบริหารจัดการความเสี่ยงและภัยพิบัติ [5] การรวบรวมและสรุปความต้องการและความคาดหวังของประชาชนในเมืองลอนดอน [6] เป็นต้น

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่มีปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ จากหลากหลายแหล่ง มีความจำเป็นอย่างยิ่งและส่งผลกระทบต่อการบริหารชุมชน เมือง และประเทศ นักวิจัยจึงพยายามรวบรวมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการบริหารจัดการเมือง โดย

พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่ยังไม่ถูกแปลงสู่ระบบดิจิทัล และมีการเก็บข้อมูลกระจัดกระจายแยกออกจากกัน แต่ละเมืองจะมีวิธีการจัดเก็บข้อมูลเป็นของตนเอง ทำให้ไม่สามารถเชื่อมโยงและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ หลายภาคส่วนมีการรวบรวมข้อมูลเดียวกันแต่ใช้วิธีการที่ต่างกัน โดยวิธีการจัดเก็บข้อมูลแตกต่างกันออกไปตั้งแต่การจัดเก็บในตาราง เอกสาร คอมพิวเตอร์ ปัญหาที่พบคือข้อมูลมีความซ้ำซ้อนและไม่สอดคล้องกัน ส่งผลให้ยังไม่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลเพื่อสืบค้นและนำมาใช้ในการวางแผนบริหารจัดการเมืองหรือชุมชนได้ จึงยังมีความต้องการเครื่องมือสำหรับเก็บข้อมูลความหลากหลายของแต่ละชุมชน เพื่อสืบค้นร่วมกันและนำมาประยุกต์สำหรับการพัฒนาเมืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลในหลากหลายด้าน เช่น ด้านการเกษตร มีผู้วิจัยออกแบบและพัฒนาระบบเก็บข้อมูลด้านการเกษตรขนาดใหญ่ โดยรวบรวมข้อมูลจากหลายแหล่ง เช่น เซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง เครื่องมือทางการเกษตร ชาวนา และธุรกิจด้านการเกษตร เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้มีหลากหลายชนิดข้อมูล มีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อน มีทั้งข้อมูลที่มีโครงสร้างและไร้โครงสร้าง จึงได้เลือกฐานข้อมูลแบบ NoSQL เป็นเครื่องมือในการจัดการคลังข้อมูล (data warehouse) เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลได้ยืดหยุ่น และอ่านเขียนข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว [8], [9] ช่วยให้สืบค้นข้อมูลและนำมาช่วยบริหารจัดการคลังข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยยังใช้การออกแบบโครงสร้างข้อมูลและการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างกันด้วยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะ ยังไม่มีระบบช่วยอำนวยความสะดวกในการจัดทำโครงสร้างการจัดเก็บฐานข้อมูล และการสืบค้นข้อความจำเป็นต้องป้อนคำหรือข้อความที่มีความหมายจะทำให้สามารถสืบค้นข้อมูลออกมาได้ [10] นอกจากนี้การเก็บข้อมูลสำหรับด้านการแพทย์ได้มีผู้ออกแบบและพัฒนาระบบจัดการข้อมูลเกี่ยวกับโรคมะเร็ง ซึ่งมีข้อมูลหลากหลายชนิดทั้งที่มีโครงสร้างและไม่มีโครงสร้าง โดยได้นำข้อมูลจำนวนมหาศาลจากหลากหลายแหล่งมาจัดเก็บรวมกัน เพื่อนำมาประมวลผลและแสดงรายงานให้บุคลากรผู้เชี่ยวชาญสามารถติดตามและวิเคราะห์ร่วมกันได้ โดยพบปัญหาข้อมูลบางส่วนยังมีความผิดพลาด เนื่องจากยังต้องป้อนเข้ามาด้วยมนุษย์และยังคงใช้เจ้าหน้าที่ในการตรวจสอบความถูกต้องด้วยตนเอง ทำให้เกิดความไม่สะดวกในประการนี้ จึงส่งผลต่อการสืบค้นเพื่อนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ได้ไม่ครอบคลุม [11]

ด้านการเลือกใช้ระบบเก็บข้อมูลหรือเทคนิคที่เหมาะสม ได้มีผู้ออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับวิเคราะห์การบริโภคภายในมหาวิทยาลัย เจอปัญหาความเร็วในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่บนฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (relational database) ซึ่งใช้เวลานานในการประมวลผลและการค้นหาข้อมูล จึงได้นำฐานข้อมูลชนิด NoSQL [9] มาจัดเก็บข้อมูลการบริโภคแทนพบว่า สามารถประมวลผลการค้นหาข้อมูลและตอบสนองได้ไวกว่าฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์เป็นอย่างมาก และรองรับการขยายตัวของข้อมูลเป็นอย่างดี [12] ส่วนเทคนิคการสืบค้นให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องสอดคล้องนั้น มีผู้วิจัยออกแบบระบบสำหรับการค้นหาผลลัพธ์ด้วยภาษาพูดหรือภาษาที่ไม่เป็นทางการ โดยใช้การเก็บข้อมูลคำหรือข้อความ ซึ่งมีทั้งที่สะกดถูกต้องและสะกดผิด เพื่อทดสอบว่าหากใช้ภาษาพูดในการสืบค้นข้อมูลจะได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องตรงกันกับคำค้นหามากน้อยเพียงใด โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบยังไม่ค่อยถูกต้องและไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่ต้องการค้นหา และมีหลายครั้งที่ทำการสืบค้นแล้วไม่ได้ผลลัพธ์ตอบสนองกลับมา [13]

2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. การออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมของระบบจัดเก็บข้อมูลความหลากหลายของแต่ละชุมชน ซึ่งรองรับการค้นหาข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว
2. ผู้ใช้งานข้อมูลสามารถสืบค้นชุดข้อมูลที่สนใจ เพื่อนำข้อมูลความหลากหลายไปวิเคราะห์และวางแผนการบริหารจัดการชุมชนได้ตามวัตถุประสงค์

3) วิธีดำเนินการวิจัย

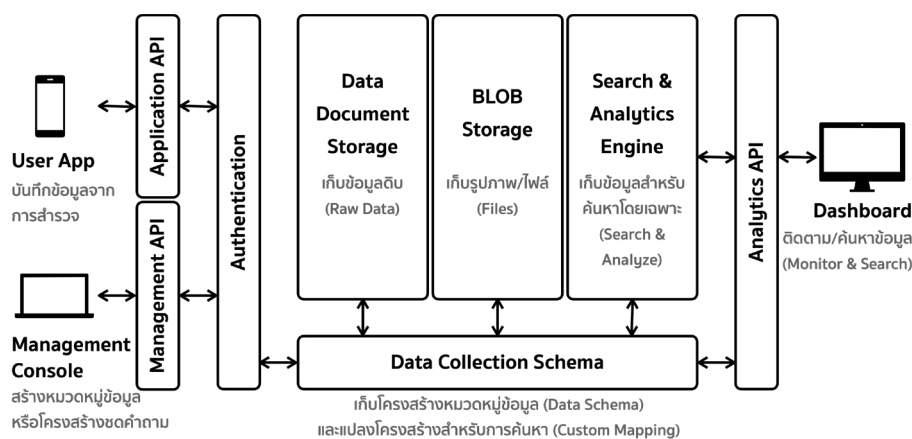
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการออกแบบและวิธีการทดสอบระบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย สถาปัตยกรรมของระบบจัดการข้อมูลความหลากหลาย โครงสร้างการเก็บข้อมูล รูปแบบโครงสร้างการเก็บข้อมูล ความแตกต่างของโครงสร้างข้อมูลแต่ละรูปแบบ และวิธีการทดสอบประสิทธิภาพ

3.1) สถาปัตยกรรมของระบบจัดการข้อมูลความหลากหลาย

การจัดการข้อมูลความหลากหลาย ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นอยู่ตลอดเวลา จำเป็นต้องใช้แพลตฟอร์มสำหรับบริหารจัดการข้อมูลชุมชนขนาดใหญ่ ซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นมาโดยบุคลากรผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน เช่น วิศวกรข้อมูล

การจัดเก็บข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องออกแบบตั้งแต่โครงสร้างการเก็บข้อมูลให้มีความเหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลความหลากหลาย รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน จึงได้ออกแบบโครงสร้างของระบบจัดเก็บข้อมูลความหลากหลายขึ้นมา ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของระบบจัดการข้อมูลความหลากหลาย ซึ่งใช้สำหรับการจัดการข้อมูลแต่ละหมวดหมู่ที่ต้องการจัดเก็บ โดยสามารถสร้างและจัดการโครงสร้างข้อมูลตามหมวดหมู่หรือโครงสร้างของชุดคำถามจากส่วน Management Console ซึ่งแลกเปลี่ยนข้อมูลผ่าน Management API และยืนยันสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลผ่าน Authentication เพื่อเชื่อมต่อกับส่วนของ Data Collection Schema สำหรับบันทึกโครงสร้างข้อมูล ซึ่งส่วนนี้จะเชื่อมโยงกับ Data Document Storage สำหรับเก็บข้อมูลดิบ และ BLOB Storage สำหรับเก็บข้อมูลไฟล์ เช่น รูปภาพ เป็นต้น



รูปที่ 1 : โครงสร้างระบบจัดการข้อมูลความหลากหลาย

เมื่อสร้างหมวดหมู่ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้สำรวจและบันทึกข้อมูลในแต่ละชุมชน สามารถบันทึกและจัดการข้อมูลได้ผ่าน User App ซึ่งแลกเปลี่ยนข้อมูลผ่าน Application API และยืนยันสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลผ่าน Authentication เพื่อเชื่อมต่อกับ Data Collection Schema เพื่อนำโครงสร้างข้อมูลของหมวดหมู่ที่มีการบันทึกมาแสดงผล ซึ่งส่วนนี้เชื่อมต่อกับ Data Document Storage และ BLOB Storage เพื่อนำข้อมูลดิบและไฟล์ที่สัมพันธ์กันนำกลับไปแสดงผลบน User App

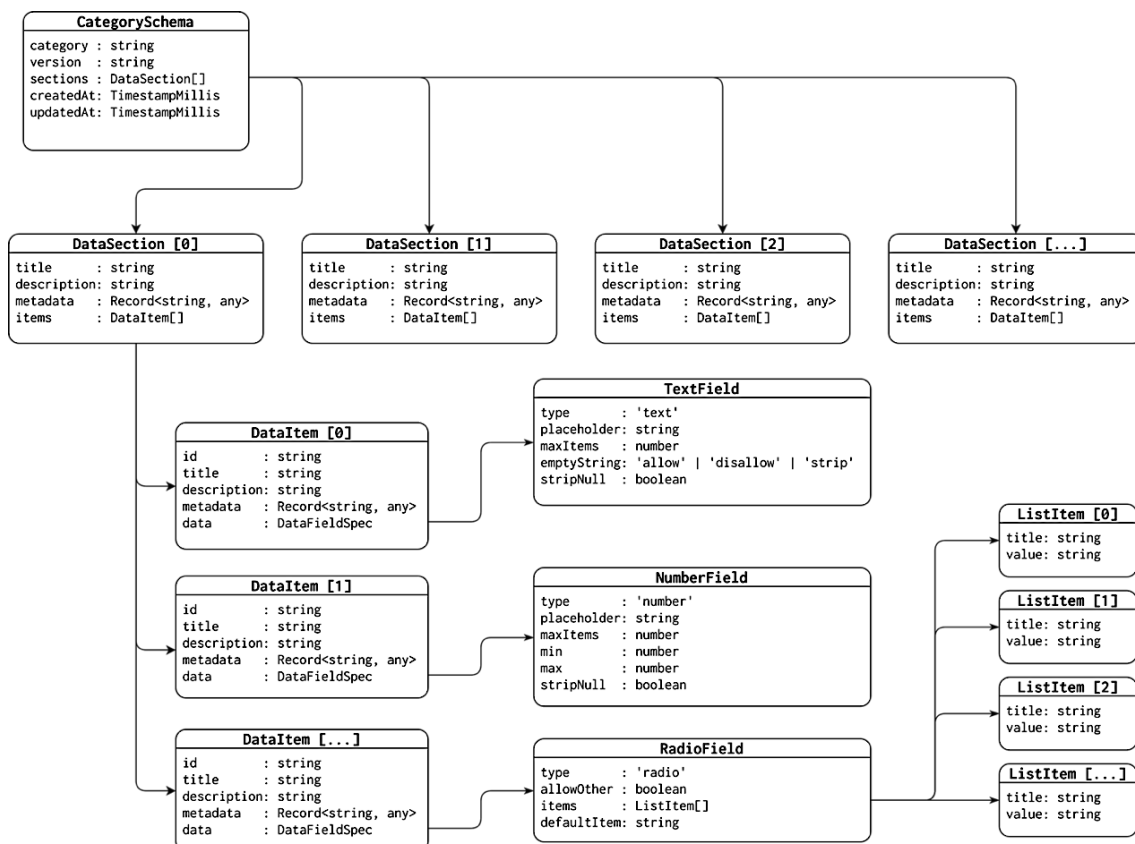
ส่วนของ Data Collection Schema เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เก็บโครงสร้างแต่ละหมวดหมู่ข้อมูล (Data Schema) และเชื่อมโยงการเข้าถึงข้อมูลดิบซึ่งจัดเก็บใน Data Document Storage และเชื่อมโยงการเข้าถึงไฟล์ข้อมูล ซึ่งจัดเก็บใน BLOB Storage นอกจากนั้น ยังทำหน้าที่แปลงโครงสร้างแต่ละหมวดหมู่ข้อมูล เป็นโครงสร้างสำหรับการค้นหา (Custom Mapping) ซึ่งใช้งานในส่วนของ Search & Analytics Engine

เมื่อมีการบันทึกข้อมูลซึ่งได้จากการสำรวจแล้ว สามารถติดตามหรือค้นหาข้อมูลได้ผ่าน Dashboard ซึ่งแลกเปลี่ยน

ข้อมูลผ่าน Analytics API เพื่อเข้าถึงฐานข้อมูลสำหรับการค้นหาหรือส่วนของ Search & Analytics Engine ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลตามข้อกำหนดของ Custom Mapping และนำผลลัพธ์ที่ได้กลับไปแสดงผลยัง Dashboard

3.2) รูปแบบโครงสร้างการเก็บข้อมูล (JSON Schema Definition)

รูปแบบโครงสร้างการเก็บข้อมูลที่สอดคล้องกันและมีความยืดหยุ่นในการปรับเพิ่มหรือลดข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการรองรับกับข้อมูลที่มีความหลากหลายหรือหมวดหมู่ข้อมูลใหม่ ๆ ซึ่งจะถูกเพิ่มเข้ามาในอนาคตอีกมากมาย เพื่อให้สะดวกต่อการจัดการข้อมูลหลากหลายสาขานี้ จึงได้ออกแบบโครงสร้างแต่ละหมวดหมู่ข้อมูล ซึ่งอ้างอิงรูปแบบโครงสร้างตาม JSON Schema Definition ที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 2 โดยโครงสร้างแต่ละหมวดหมู่ข้อมูล จะถูกบันทึกโครงสร้างไว้ใน Data Collection Schema ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ระบุไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 2 : JSON Data Definition

จากรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างข้อมูลในรูปแบบ JSON (JSON Schema Definition) ซึ่งใช้ประกอบการสร้างหมวดหมู่สำหรับการเก็บข้อมูล (CategorySchema) ซึ่งประกอบด้วย 5 หัวข้อ (Fields) คือ

1. category ระบุรหัสของหมวดหมู่ข้อมูล
2. version ระบุเวอร์ชันของหมวดหมู่ข้อมูล
3. createdAt ระบุเวลาที่หมวดหมู่ข้อมูลถูกสร้างขึ้น
4. updatedAt ระบุเวลาที่หมวดหมู่ข้อมูลถูกแก้ไขล่าสุด
5. sections เป็นรายการของ DataSection ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป

DataSection ประกอบไปด้วย 4 Fields ดังนี้

1. title ระบุชื่อของ section
2. description ระบุคำอธิบายของ section
3. metadata สำหรับระบุข้อมูลเพิ่มเติมตามต้องการ
4. items เป็นรายการของ DataItem ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป

DataItem ประกอบไปด้วย 5 Fields ดังนี้

1. id ระบุรหัสของ DataItem
2. title ระบุชื่อของ DataItem
3. description ระบุคำอธิบายของ DataItem
4. metadata สำหรับระบุข้อมูลเพิ่มเติมตามต้องการ
5. data เป็นรายการของ DataFieldSpec ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป

DataFieldSpec คือ ชนิดของข้อมูลที่จัดเก็บ ซึ่งนอกจากจะใช้ในการระบุชนิดของข้อมูลแล้ว ยังใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลด้วย (validation) โดยในปัจจุบันได้ออกแบบให้รองรับข้อมูล 11 ชนิด ชนิดของข้อมูลมีดังนี้

1. Text Field เก็บข้อมูลที่เป็นข้อความ
2. Number Field เก็บข้อมูลเชิงตัวเลข
3. Date Field เก็บข้อมูลวันที่
4. Time Field เก็บข้อมูลเวลา
5. Date and Time Field เก็บข้อมูลวันที่และเวลา
6. Geo Point Field เก็บข้อมูลพิกัด (ละติจูด ลองจิจูด)
7. Address Field เก็บข้อมูลที่อยู่
8. Drop Down Field เก็บข้อมูล 1 รายการ จากตัวเลือกที่กำหนดไว้

9. Radio Field เก็บข้อมูล 1 รายการ จากตัวเลือกที่กำหนดไว้ หรือระบุข้อมูลอื่น ๆ เพิ่มเติม

10. Check Boxes Field เก็บข้อมูลได้หลายตัวเลือกจากที่กำหนดไว้ หรือระบุข้อมูลอื่น ๆ เพิ่มเติม

11. File Field เก็บข้อมูลไฟล์ เช่น รูปภาพ ไฟล์เอกสาร

3.3) ความแตกต่างของโครงสร้างข้อมูลแต่ละรูปแบบ

โครงสร้างข้อมูลแต่ละรูปแบบ ซึ่งมีการเลือกใช้เครื่องมือหรือเทคนิคที่ไม่เหมือนกัน ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจัดเก็บและค้นหาข้อมูล จึงขอเสนอความแตกต่างระหว่างโครงสร้างข้อมูลแต่ละรูปแบบ ดังต่อไปนี้

3.3.1) โครงสร้างข้อมูลซึ่งจัดเก็บลงใน Google Firestore [2] ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ JSON นั้นมีความยืดหยุ่นในการบันทึกหมวดหมู่ข้อมูลที่มีจำนวนข้อมูลไม่เท่ากันได้ โดยหน้าข้อมูลแต่ละหมวดหมู่มีการจัดแบ่งโครงสร้างเป็นสองกลุ่ม ประกอบไปด้วยโครงสร้างข้อมูลสำหรับจัดเก็บคำถาม ซึ่งระบบมีการจัดเก็บข้อมูลตามรูปแบบของ JSON Schema Definition ดังรูปที่ 2 และโครงสร้างข้อมูลสำหรับจัดเก็บคำตอบ ของหมวดหมู่นั้น ๆ โดยการจัดเก็บลงใน Google Firestore [2] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลชนิด NoSQL [9] สามารถช่วยในการเก็บข้อมูลได้อย่างยืดหยุ่นสำหรับข้อมูลหลากหลายสาขา

3.3.2) โครงสร้างข้อมูลรูปแบบ Dynamic Mapping เป็นโครงสร้างข้อมูลที่ Elasticsearch [4] จัดเตรียมและแปลงข้อมูลที่ต้องการจัดเก็บให้แบบอัตโนมัติ ซึ่งผู้จัดการฐานข้อมูลไม่จำเป็นต้องกำหนด Mappings [14] ขณะเริ่มต้นสร้าง Index [15] สำหรับเก็บข้อมูลหมวดหมู่ต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจาก Elasticsearch [4] จัดการประมวลผลให้โดยอัตโนมัติ

3.3.3) โครงสร้างข้อมูลซึ่งใช้งาน Thai Tokenizer [16] เป็นโครงสร้างข้อมูลที่กำหนดวิธีการตัดคำไทยรูปแบบหนึ่งของฐานข้อมูล Elasticsearch [4] ซึ่งสามารถตั้งค่าการใช้งานได้ผ่านการกำหนด Mappings [14] ส่วนของ analyzer เป็น thai เพื่อเปิดใช้คุณสมบัติการตัดคำสำหรับภาษาไทย โดยส่วนที่ไม่ได้ตั้งคำหรือกำหนดคุณสมบัติ (properties) ไว้ Elasticsearch [4] จะจัดการให้โดยอัตโนมัติ

3.3.4) โครงสร้างข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping เป็นโครงสร้างข้อมูลซึ่งได้ออกแบบและพัฒนา สำหรับจัดเก็บลงในฐานข้อมูล Elasticsearch [4] ซึ่งคำนึงถึงประสิทธิภาพให้การสืบค้นให้รวดเร็วและถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยข้อมูลที่ได้ผ่านการแปลงจากส่วน Data Collection Schema ซึ่งมีการกำหนด

วิธีการตัดคำภาษาไทยโดยใช้ N-gram Tokenizer [17] รูปแบบ N-gram2, 3 เพิ่มเติม

3.4) วิธีการทดสอบประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่หัวข้อการสืบค้นด้วยคำหรือข้อความ จึงได้ออกแบบการทดลองสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพการ ค้นหาของแต่ละรูปแบบโครงสร้างข้อมูล จึงแบ่งหัวข้อการ ทดสอบออกเป็นสามการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.4.1) การทดลองที่ 1 ออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบความ ถูกต้องสอดคล้องกันระหว่างโครงสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Mapping การใช้งาน Thai Tokenizer [16] และโครงสร้าง ข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping โดยพิจารณาจากผลลัพธ์จาก การค้นหาด้วยคำหรือข้อความใน 1 ลำดับ 5 ลำดับ และ 10 ลำดับแรก โดยข้อมูลที่น่าสนใจใช้ทดลองมาจากหมวดหมู่พืชใน ท้องถิ่น 1,952,571 รายการ ซึ่งเป็นหมวดหมู่ข้อมูลที่ได้มาจากการสำรวจ 7,431 ตำบล ในประเทศไทย โดยคำค้นหาที่จะใช้ ทดสอบประกอบไปด้วย สัก ต้นสัก สักทอง ฟ้าทะลายโจร ฟ้า ทะลาย ทะลายโจร ถั่วฝักยาว ถั่วฝัก และฝักยาว

3.4.2) การทดลองที่ 2 ออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบความเร็ว ในการค้นหาข้อมูลระหว่างโครงสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Mapping การใช้งาน Thai Tokenizer [16] และโครงสร้าง ข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping โดยข้อมูลที่น่าสนใจใช้ทดลอง มาจากหมวดหมู่พืชในท้องถิ่น 1,952,571 รายการ ซึ่งเป็นชุด ข้อมูลเดียวกันกับการทดลองที่ 1 โดยคำค้นหาที่จะใช้ทดสอบ ประกอบไปด้วย สับประรดกล้วย กะเพรา สะตอ ฝักเหลียง เห็ด เผาะ บอระเพ็ด ว่านหางจระเข้ ถั่วแระ มะเขือเทศสีดา ข้าวหอม มะลิ

3.4.3) การทดลองที่ 3 ออกแบบมาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ การใช้งาน Autocomplete [18] ซึ่งเป็นการระบุคำที่ต้องการ ค้นหาที่ละตัวอักษร โดยต้องการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง โครงสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Mapping การใช้งาน Thai Tokenizer [16] และโครงสร้างข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping โดยข้อมูลที่น่าสนใจใช้ทดลองมาจากหมวดหมู่พืชใน ท้องถิ่น 1,952,571 รายการ ซึ่งเป็นชุดข้อมูลเดียวกันกับการ ทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 โดยคำค้นหาที่จะใช้ทดสอบ ประกอบไปด้วย ไม ไมยร ไมยรา ไมยราบ มะ มะเข มะเขี เมเขือ กร กระ กระถ กระถิ กระถิน

4) ผลการทดลอง

ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงสถิติการใช้ งานระบบเก็บข้อมูลความหลากหลาย จำนวนผู้ใช้งานและการ รองรับของระบบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

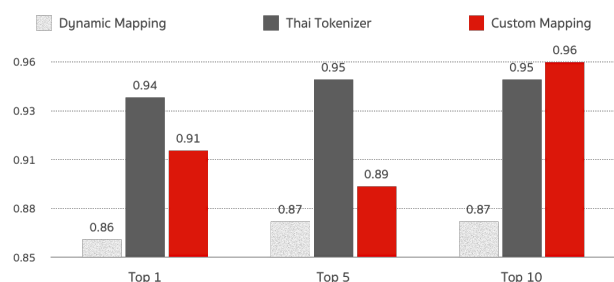
4.1) ผลการวิเคราะห์จากการทดลอง

4.1.1) ผลการวิเคราะห์จากการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นการ ทดสอบความถูกต้องสอดคล้องกันหรือความแม่นยำของผลลัพธ์ ที่ได้จากการค้นหาคำระหว่างโครงสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Mapping การใช้งาน Thai Tokenizer [16] และโครงสร้าง ข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping โดยผลการทดลองแสดงดัง ตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และรูปที่ 3

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และกราฟ เปรียบเทียบดังรูปที่ 3 สรุปได้ว่าโครงสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Mapping มีความแม่นยำต่ำที่สุด ส่วนโครงสร้างที่ใช้งาน Thai Tokenizer [16] และโครงสร้างแบบ Custom Mapping มีความแม่นยำใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาร่วมกันจำนวนผลลัพธ์ ที่ค้นหาได้แล้ว โครงสร้างแบบ Custom Mapping สามารถ สืบค้นข้อมูลได้ครอบคลุมมากกว่าอีกสองรูปแบบอย่างเห็นได้ ชัดเจน

ตารางที่ 1 : ความแม่นยำในการค้นหาคำจากการทดลองที่ 1

รูปแบบโครงสร้างข้อมูล	ค่าความแม่นยำในการค้นหาคำเฉลี่ย		
	Top 1	Top 5	Top 10
Dynamic Mapping	0.86	0.87	0.87
Thai Tokenizer	0.94	0.95	0.95
Custom Mapping	0.91	0.89	0.96



รูปที่ 3 : กราฟเปรียบเทียบความแม่นยำในการค้นหาคำจากการทดลองที่ 1

ตารางที่ 2 : จำนวนผลลัพธ์ที่ค้นหาได้จากการทดลองที่ 1

คำค้นหา	จำนวนผลลัพธ์ที่ค้นหาได้ (รายการ)		
	Dynamic Mapping	Thai Tokenizer	Custom Mapping
สัก	969	8,620	192,700
ต้นสัก	4,025	977,624	1,162,212
สักทอง	408	29,162	292,896
ฟ้าทะลายโจร	5,256	18,965	343,422
ฟ้าทะลาย	11	18,919	328,679
ทะลายโจร	0	9,601	147,294
ถั่วฝักยาว	4,569	6,920	453,400
ถั่วฝัก	2	9,734	267,326
ฝักยาว	2	270	372,256

4.1.2) ผลการวิเคราะห์จากการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบความเร็วในการค้นหาด้วยคำระหว่างโครงสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Mapping การใช้งาน Thai Tokenizer [16] และโครงสร้างข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping โดยได้พิจารณาผลลัพธ์จากการค้นหาเป็น 1 ลำดับแรก (Top 1) 5 ลำดับแรก (Top 5) และ 10 ลำดับแรก (Top 10) ซึ่งค่าความแม่นยำจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 สามารถดูผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 5 โดยเกณฑ์การคำนวณคะแนนความแม่นยำ กำหนดตามรายละเอียดดังนี้

- กรณีผลลัพธ์ตรงกับคำค้นหาทุกตัวอักษร จะได้คะแนนเท่ากับ 1.00
- กรณีพบคำซ้ำหรือคำเกินมาจากคำค้นหา และสะกดคำถูกต้อง โดยสามารถสื่อสารถึงชื่อชนิดพืชได้ตามคำค้นหา จะได้คะแนนเท่ากับ 0.90
- กรณีพบคำซ้ำหรือคำเกินมาจากคำค้นหา แต่สะกดคำผิด ซึ่งส่งผลให้สื่อสารถึงชื่อชนิดพืชผิดเพี้ยน จะได้คะแนนเท่ากับ 0.50
- กรณีผลลัพธ์ไม่สอดคล้องหรือไม่พบผลลัพธ์ จะได้คะแนนเท่ากับ 0

จากตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำและจำนวนผลลัพธ์ที่ได้จากโครงสร้างข้อมูลทั้งสามรูปแบบแล้ว สรุปได้ว่าโครงสร้างข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping สามารถค้นหาคำได้รวดเร็วที่สุดและครอบคลุมมากที่สุดโดยใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยต่อรายการเป็น 0.12 μ s ลำดับถัดมาคือโครงสร้างแบบ Thai Tokenizer [16] โดยใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยต่อรายการเป็น 0.51 μ s และโครงสร้างที่ค้นหาได้ช้ามาก

ที่สุดคือโครงสร้างแบบ Dynamic Mapping โดยใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยต่อรายการเป็น 14.22 μ s

ตารางที่ 3 : ความเร็วในการค้นหาด้วยคำ (ms) จากการทดลองที่ 2

คำค้นหา	เวลาที่ใช้ในการค้นหา (ms)		
	Dynamic Mapping	Thai Tokenizer	Custom Mapping
สับปะรดภูเก็ต	1	3	20
กะเพรา	3	2	31
สะตอ	1	1	9
ผักเหลียง	2	5	30
เห็ดเผาะ	11	3	11
บอระเพ็ด	2	1	22
ว่านหางจระเข้	2	5	93
ถั่วแระ	1	1	12
มะเขือเทศสีดา	2	7	55
ข้าวหอมมะลิ	1	5	36

ตารางที่ 4 : จำนวนผลลัพธ์ที่ค้นหาได้จากการทดลองที่ 2

คำค้นหา	จำนวนผลลัพธ์ที่ค้นหาได้ (รายการ)		
	Dynamic Mapping	Thai Tokenizer	Custom Mapping
สับปะรดภูเก็ต	14	5,323	85,733
กะเพรา	3,525	9,263	279,099
สะตอ	883	2,239	32,571
ผักเหลียง	831	62,312	365,397
เห็ดเผาะ	232	5,889	93,345
บอระเพ็ด	890	1,643	305,789
ว่านหางจระเข้	5,707	29,751	616,189
ถั่วแระ	218	429	265,675
มะเขือเทศสีดา	181	52,527	558,283
ข้าวหอมมะลิ	1,366	46,679	668,452

ตารางที่ 5 : เวลาที่ใช้ในการค้นหาต่อรายการ (μ s) จากการทดลองที่ 2

คำค้นหา	เวลาที่ใช้ในการค้นหา / 1 รายการ (μ s)		
	Dynamic Mapping	Thai Tokenizer	Custom Mapping
สับปะรดภูเก็ต	71.43	0.56	0.23
กะเพรา	0.85	0.22	0.11
สะตอ	1.13	0.45	0.28
ผักเหลียง	2.41	0.08	0.08
เห็ดเผาะ	47.41	0.51	0.12
บอระเพ็ด	2.25	0.61	0.07

ตารางที่ 5 : เวลาที่ใช้ในการค้นหาต่อรายการ (μ s) จากการทดลองที่ 2 (ต่อ)

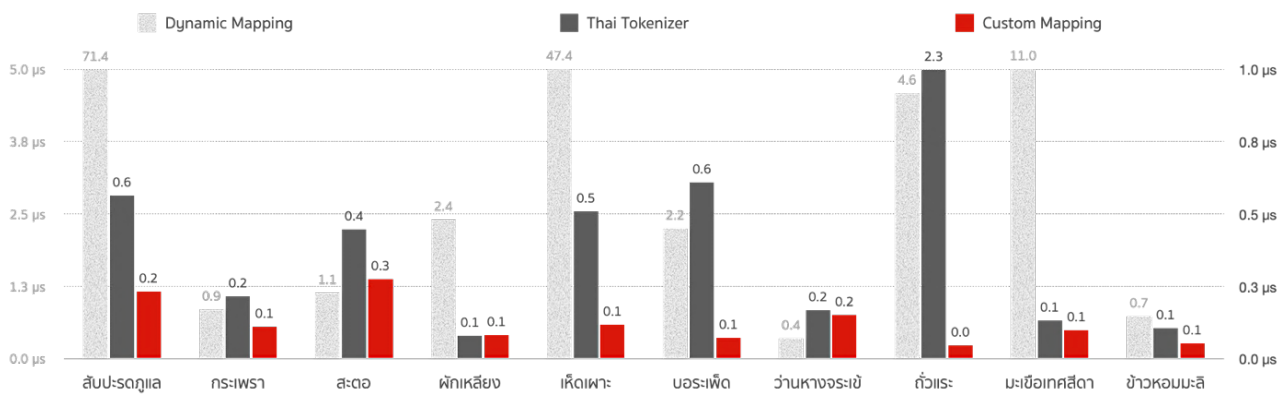
คำค้นหา	เวลาที่ใช้ในการค้นหา / 1 รายการ (μ s)		
	Dynamic Mapping	Thai Tokenizer	Custom Mapping
ว่านหางจระเข้	0.35	0.17	0.15
ถั่วแระ	4.59	2.33	0.05
มะเขือเทศสีดา	11.05	0.13	0.10
ข้าวหอมมะลิ	0.73	0.11	0.05
เฉลี่ย	14.22	0.51	0.12

4.1.3) ผลการวิเคราะห์จากการทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นการทดสอบการค้นหาผ่านการใช้งาน autocomplete [18] ระหว่างโครงสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Mapping การใช้งาน Thai Tokenizer [16] และโครงสร้างข้อมูลรูปแบบ Custom Mapping โดยได้พิจารณาผลลัพธ์จากการค้นหาเป็น 1 ลำดับแรก (Top 1) 5 ลำดับแรก

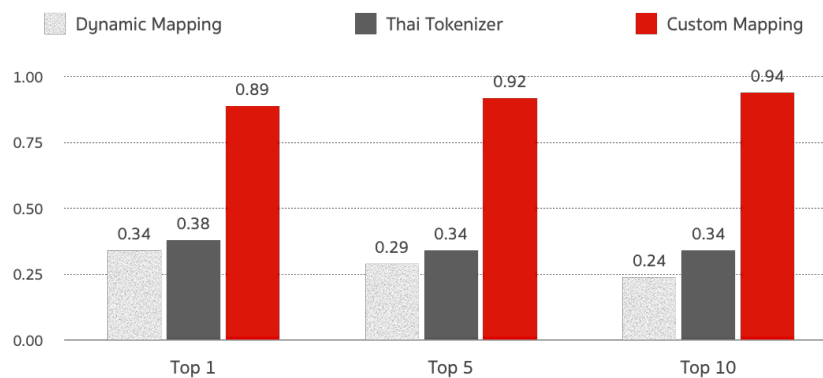
(Top 5) และ 10 ลำดับแรก (Top 10) ซึ่งค่าความแม่นยำจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 สามารถดูผลการทดลองดังรูปที่ 4 รูปที่ 5

ตารางที่ 7 และตารางที่ 8 โดยเกณฑ์การคำนวณคะแนนความแม่นยำ กำหนดตามรายละเอียดดังนี้

- กรณีผลลัพธ์ตรงกับคำค้นหาทุกตัวอักษร จะได้คะแนนเท่ากับ 1.00
- กรณีพบคำซ้ำหรือคำเกินมาจากคำค้นหา และสะกดคำถูกต้อง โดยสามารถสื่อสารถึงชื่อชนิดพืชได้ตามคำค้นหา จะได้คะแนนเท่ากับ 0.90
- กรณีพบคำซ้ำหรือคำเกินมาจากคำค้นหา แต่สะกดคำผิด ซึ่งส่งผลให้สื่อสารถึงชื่อชนิดพืชผิดเพี้ยน จะได้คะแนนเท่ากับ 0.50
- กรณีผลลัพธ์ไม่สอดคล้องหรือไม่พบผลลัพธ์ จะได้คะแนนเท่ากับ 0



รูปที่ 4 : กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการค้นหาต่อรายการ (μ s) จากการทดลองที่ 2



รูปที่ 5 : กราฟเปรียบเทียบความแม่นยำในการค้นหาคำจากการทดลองที่

ตารางที่ 6 : ความแม่นยำในการค้นหาจากการทดลองที่ 3

รูปแบบโครงสร้างข้อมูล	ค่าความแม่นยำในการค้นหาคำเฉลี่ย		
	Top 1	Top 5	Top 10
Dynamic Mapping	0.34	0.29	0.24
Thai Tokenizer	0.38	0.34	0.34
Custom Mapping	0.89	0.92	0.94

ตารางที่ 7 : จำนวนผลลัพธ์ที่ค้นหาได้จากการทดลองที่ 3

คำค้นหา	จำนวนผลลัพธ์ที่ค้นหาได้ (รายการ)		
	Dynamic Mapping	Thai Tokenizer	Custom Mapping
ไม่	1	1	33,188
ไมย	0	0	34,472
ไมयर	0	0	37,982
ไมยรา	0	0	110,914
ไมยราบ	731	2,451	130,904
มะ	5	11,478	319,361
มะเ	0	0	394,875
มะเข	0	11,605	425,610
มะเขี	0	0	425,639
มะเขือ	4,045	25,038	486,504
กร	0	179	148,417
กระ	2	16,676	200,307
กระถ	0	16,852	201,343
กระถิ	0	0	203,042
กระถิน	4,335	13,513	243,198

จากรูปที่ 5 ตารางที่ 6 และตารางที่ 7 สรุปได้ว่าโครงสร้างข้อมูลแบบ Custom Mapping สามารถค้นหาในลักษณะการใช้งาน autocomplete [18] ซึ่งมีการค้นหาโดยเพิ่มไปที่ละตัวอักษรนั้น ได้อย่างถูกต้องสอดคล้องและครอบคลุมมากที่สุดมากที่สุด ซึ่งมีข้อแตกต่างจากโครงสร้างรูปแบบ Dynamic Mapping และรูปแบบการใช้งาน Thai Tokenizer [16] ที่พบว่ายังไม่เหมาะสมสำหรับการค้นหาด้วย autocomplete [18] เนื่องจากไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้จากการพิมพ์ทีละตัวอักษรซึ่งยังไม่เป็นคำ จึงไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแนะนำคำที่สอดคล้อง

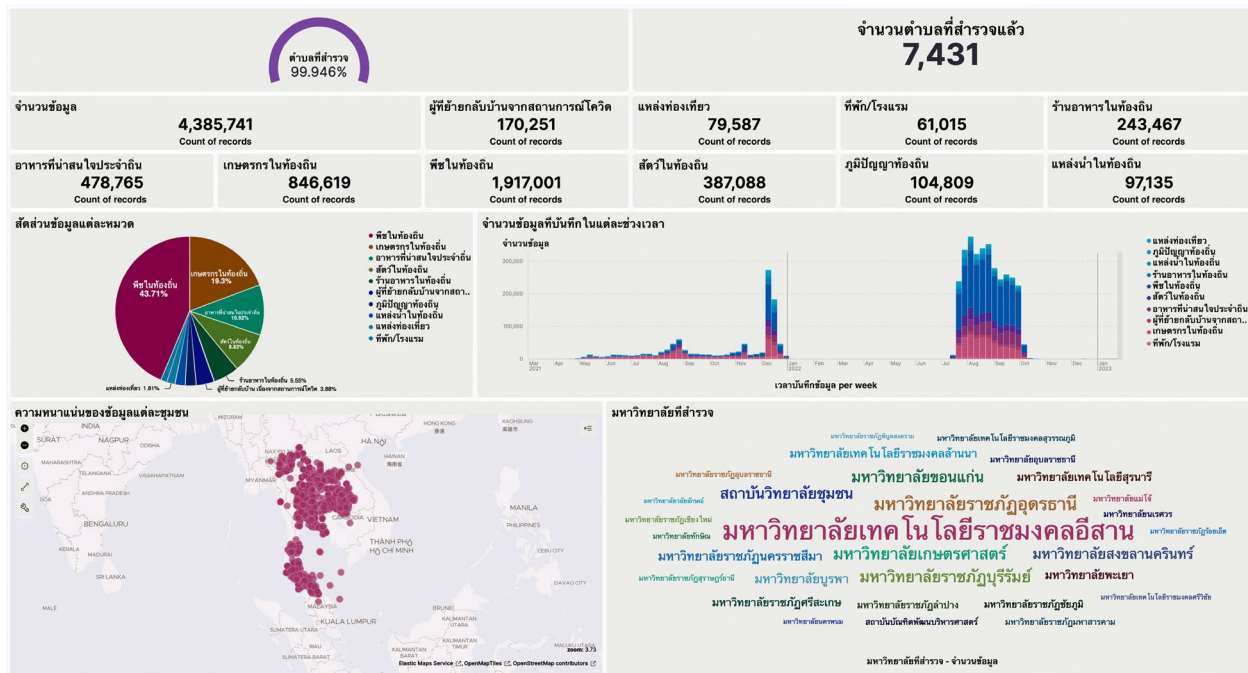
4.2) ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้งานระบบ

ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บในระบบจัดการข้อมูลหลากหลายนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ (data visualization tools) ตามความถนัดของผู้วิเคราะห์ เช่น Kibana [19], Power BI [20] เป็นต้น บทความวิจัยฉบับนี้ได้นำข้อมูลไปวิเคราะห์และจัดเรียงเป็นกระดานสรุปผล

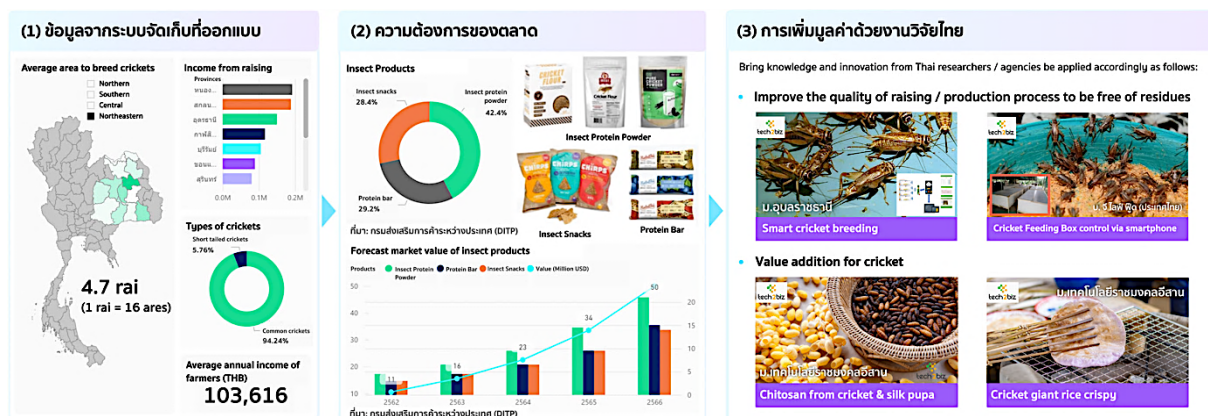
การติดตามข้อมูลสถิติหรือข้อมูลสรุปสำหรับผู้บริหารจัดการพื้นที่หรือชุมชนระดับต่าง ๆ ได้ในรูปแบบหลากหลาย เนื่องด้วยระบบจัดการข้อมูลความหลากหลายซึ่งได้ออกแบบมีการจัดเก็บข้อมูลสำหรับการสืบค้นลงใน Elasticsearch [4] ซึ่งสามารถเชื่อมโยงกับ Kibana [19] เพื่อแสดงผลข้อมูลสถิติในหลากหลายมุมมอง สามารถเลือกกรองเฉพาะชุดข้อมูลที่สนใจ และระบุวันเวลาที่ต้องการค้นหาข้อมูลได้ จึงได้จัดทำ Dashboard ด้วย Kibana เพื่อช่วยในการตัดสินใจวางแผนบริหารจัดการพัฒนาชุมชนต่อไปดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 แสดงข้อมูลสถิติภาพรวมซึ่งได้จากระบบจัดการข้อมูลความหลากหลายที่ออกแบบตั้งแต่ มีนาคม 2564 ถึง สิงหาคม 2565 ซึ่งจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการสำรวจและบันทึกเข้าสู่ระบบ คือ 4,385,741 รายการ จาก 7,431 ตำบลในประเทศไทย ซึ่งคิดเป็น 99.95% ของตำบลทั้งหมดในประเทศไทยซึ่งมีจำนวน 7,435 ตำบล โดยมีการเก็บข้อมูลในหลายด้านจำนวน 10 หมวดหมู่ข้อมูล โดยหมวดหมู่ที่มีการบันทึกข้อมูลมากที่สุด 3 ลำดับแรก ประกอบด้วย พืชในท้องถิ่น 43.71% (1,917,001 รายการ) เกษตรกรในท้องถิ่น 19.3% (846,619 รายการ) และอาหารที่น่าสนใจประจำวัน 10.92% (478,765 รายการ)

ข้อมูลซึ่งถูกวิเคราะห์และแสดงผลในหลากหลายรูปแบบนี้สามารถนำไปประกอบการตัดสินใจและใช้สำหรับการวางแผนบริหารจัดการชุมชนของผู้บริหารในระดับประเทศ โดยสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปต่อยอดเพื่อใช้งานในหลายหลายด้าน เช่น การพัฒนาโปรตีนทางเลือก การพัฒนาองค์ความรู้การเลี้ยงโคนม การวิเคราะห์สัดส่วนการผลิตเส้นใยธรรมชาติภายในประเทศเพื่อการต่อเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่า เป็นต้น โดยตัวอย่าง ซึ่งได้จัดทำเป็นข้อมูลสรุป เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ดังแสดงรูปที่ 7



รูปที่ 6 : การนำข้อมูลจากระบบเก็บข้อมูลความหลากหลายที่ออกแบบและพัฒนามาวิเคราะห์ร่วมกับแหล่งข้อมูลอื่น ๆ



รูปที่ 7 : Dashboard แสดงข้อมูลสถิติภาพรวมทั้งหมด

จากรูปที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Power BI [20] ซึ่งสามารถนำเข้าสู่ชุดข้อมูลที่สนใจเข้ามาแสดงผลร่วมกับรูปภาพ หรือสร้างรูปแบบเฉพาะสำหรับการแสดงผล โดยได้นำข้อมูลที่เกี่ยวกับจังหวัดในประเทศไทย แนวโน้มความต้องการของตลาดจากสหรัฐอเมริกา และข้อมูลงานวิจัยของไทยมาวิเคราะห์ร่วมกัน โดยสรุปข้อมูลเป็น 3 ส่วนด้วยกันประกอบไปด้วย

1. ข้อมูลการเลี้ยงจิ้งหรีดในประเทศไทย ซึ่งมาจากการสำรวจและเก็บบันทึกลงในระบบจัดการข้อมูลความหลากหลายซึ่งได้ออกแบบนี้ พบว่ามีการเลี้ยงจิ้งหรีดเป็นจำนวนมากบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีพื้นที่การเลี้ยงประมาณ 4.7 ไร่ โดยจังหวัดที่มีการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดมากที่สุดสามลำดับแรก คือ

หนองคาย สกลนคร และอุดรธานี ซึ่งรายได้เฉลี่ยของเกษตรกรที่
เพาะเลี้ยงจิ้งหรีดต่อปีอยู่ที่ 103,616 บาท

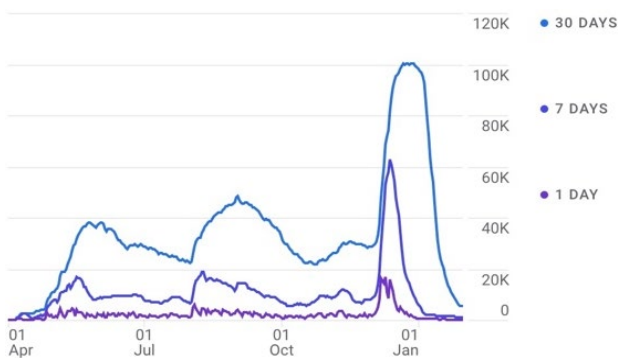
2. ข้อมูลความต้องการของตลาด ซึ่งนำมาจากกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ โดยได้นำข้อมูลแนวโน้มความต้องการสินค้าเกี่ยวกับแมลงจากสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562 ถึง 2566 มาวิเคราะห์ร่วมด้วย พบว่าแนวโน้มสัดส่วนประเภทของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากแมลงสามลำดับประกอบด้วย การนำมาทำขนมขบเคี้ยว (snacks) ประมาณร้อยละ 28.40 นำมาทำโปรตีนบาร์ (protein bar) ร้อยละ 29.20 และนำมาทำแป้งจากแมลง (insect protein powder) ประมาณร้อยละ 42.40 โดยมูลค่าทางการตลาดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับ คาดว่าในปี พ.ศ. 2565

มูลค่าผลิตภัณฑ์จากแมลงจะสูงถึง 34 ล้านเหรียญสหรัฐ และในปี พ.ศ. 2566 จะสูงขึ้นไปอีกอยู่ที่ประมาณ 50 ล้านเหรียญสหรัฐ จะเห็นได้ว่าข้อมูลความต้องการของตลาดสามารถช่วยในการตัดสินใจวางแผนการสนับสนุนอุตสาหกรรมการเพิ่มมูลค่าและการแปรรูปแมลงของประเทศไทยเพื่อไปสู่ตลาดโลก

3. การเพิ่มมูลค่าด้วยงานวิจัยไทย จากข้อมูลเกี่ยวกับจังหวัดในประเทศไทย ข้อมูลความต้องการของตลาดของสหรัฐอเมริกา ช่วยให้เห็นแนวโน้มความต้องการต่ออุตสาหกรรมการบินและอวกาศ แมลง จึงได้นำข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยของประเทศไทยจาก tech2biz [21] มาวิเคราะห์ร่วมกัน เพื่อนำองค์ความรู้หรือนวัตกรรมจากงานวิจัยทั้งจากหน่วยงานรัฐและเอกชนมาประยุกต์ เพื่อส่งเสริมการทำฟาร์มจิ้งหรีดให้ทันสมัยและได้มาตรฐาน รวมถึงสนับสนุนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เพื่อเข้าถึงผู้บริโภคได้อย่างกว้างขวาง ช่วยสร้างรายได้ให้กับเกษตรกร ชุมชน ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ

4.3) จำนวนผู้ใช้งานและการรองรับของระบบ

เนื่องจากมีการบันทึกข้อมูลจากการสำรวจชุมชนทั่วประเทศ ซึ่งในบางช่วงเวลาจะพบการเข้าใช้งานระบบบันทึกข้อมูลพร้อมกันดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 : จำนวนผู้ให้บริการระบบจัดเก็บข้อมูลความหลากหลาย

จากรูปที่ 8 แสดงจำนวนผู้ใช้งานที่บันทึกข้อมูลจากการสำรวจของแต่ละพื้นที่ในประเทศไทย ช่วงเวลาประมาณ เมษายน 2564 ถึง มกราคม 2565 พบว่ามีผู้ใช้งานสูงสุดมากกว่า 100,000 คนต่อเดือน โดยระบบจัดการข้อมูลความหลากหลายสามารถให้บริการการจัดเก็บข้อมูล การแสดงผลข้อมูล การ

สืบค้นข้อมูลได้ตามปกติแม้จะเผชิญกับผู้ใช้งานจำนวนมากในเวลาเดียวกัน

5) สรุปผล

การรวมกลุ่มข้อมูลซึ่งมีความหลากหลายของแต่ละชุมชน และจัดเก็บลงระบบดิจิทัลหรือระบบจัดการข้อมูลหลากหลาย ซึ่งรองรับการขยายตัวของข้อมูลซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และสามารถช่วยประมวลผล ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และจัดเก็บข้อมูลอย่างถูกต้อง ส่งผลให้สามารถสืบค้นและนำข้อมูลกลับมาใช้งานได้อย่างครอบคลุม ซึ่งบทความวิจัยฉบับนี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบจัดการข้อมูลหลากหลาย เพื่อจัดเก็บข้อมูลการลงสำรวจชุมชนต่าง ๆ ในประเทศไทย โดยได้บริหารจัดการการจัดเก็บข้อมูลดิบ ข้อมูลชนิดไฟล์ ข้อมูลสำหรับการสืบค้นอย่างรวดเร็ว และได้พัฒนาระบบสำหรับอำนวยความสะดวกในการสร้างโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลตามหมวดหมู่ ระบบสำหรับอำนวยความสะดวกในการบันทึกข้อมูลจากการลงพื้นที่สำรวจ รวมถึงนำเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลมาช่วยในการติดตามข้อมูลสถิติหรือข้อมูลสรุปสำหรับผู้บริหารจัดการพื้นที่หรือชุมชนในระดับต่าง ๆ ในรูปแบบหลากหลาย

ระบบจัดการข้อมูลความหลากหลายนี้ จึงสามารถช่วยให้ผู้ใช้งานข้อมูล เช่น นักวิจัย นักพัฒนาโปรแกรม นักวิทยาศาสตร์ ข้อมูล วิศวกรข้อมูล ผู้บริหารจัดการเมือง สามารถเรียกใช้กลุ่มข้อมูลเหล่านี้ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์และช่วยในการตัดสินใจในการแก้ไขปัญหาของเมืองหรือวางแผนพัฒนาทั้งในระดับชุมชน ตำบล อำเภอ จังหวัด และระดับประเทศ อย่างไรก็ตามระบบจัดการข้อมูลความหลากหลายขนาดใหญ่ ถือเป็นรากฐานสำคัญในการบริหารจัดการประเทศในยุคดิจิทัล จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาต่อยอดให้ระบบจัดการข้อมูลนี้ มีความยืดหยุ่นในการจัดเก็บข้อมูล สามารถขยายฐานการเก็บข้อมูลได้อย่างไม่จำกัด โดยสามารถสืบค้นกลุ่มข้อมูลที่น่าสนใจได้อย่างถูกต้อง ครอบคลุมและมีความรวดเร็วในการประมวลผลมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากหน่วยงานบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ภายใต้โครงการ “Quality data platform and Tambol-ERP” คณะวิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนจาก บพข. เป็นอย่างยิ่ง

REFERENCES

- [1] D. Jacobson, G. Brail, and D. Woods, *APIs: A Strategy Guide*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2012.
- [2] *Cloud Firestore*. (2023). Firebase. Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://firebase.google.com/docs/firestore>
- [3] *Cloud Storage documentation*. (2023). Google Cloud. Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/storage/docs>
- [4] *Elasticsearch Platform — Find real-time answers at scale | Elastic*. (2023). Elasticsearch. Accessed: Dec. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.elastic.co>
- [5] H. S. Munawar, S. Qayyum, F. Ullah, and S. Sepasgozar, "Big data and its applications in smart real estate and the disaster management life cycle: A systematic analysis," *Big Data Cogn. Comput.*, vol. 4, no. 2, 2020, Art. no. 4, doi: 10.3390/bdcc4020004.
- [6] J. Vodák, D. Šuljová, and M. Kubina, "Advanced technologies and their use in smart city management," *Sustainability*, vol. 13, no. 10, Jan. 2021, Art. no. 10, doi: 10.3390/su13105746.
- [7] M. Ku and J. R. Gil-Garcia, "Ready for data analytics?: Data collection and creation in local governments," in *Proc. 19th Annu. Int. Conf. Digit. Government Res.: Governance in Data Age*, Delft, Netherlands, May 2018, pp. 1–10.
- [8] U. Aftab and G. F. Siddiqui, "Big data augmentation with data warehouse: A survey," in *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. Big Data*, Seattle, WA, USA, Dec. 2018, pp. 2775–2784.
- [9] A. Meier and M. Kaufmann, "NoSQL Databases," in *SQL & NoSQL Databases: Models, Languages, Consistency Options and Architectures for Big Data Management*. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2019, pp. 201–218.
- [10] V. M. Ngo, N.-A. Le-Khac, and M.-T. Kechadi, "Designing and implementing data warehouse for agricultural big data," in *Proc. 8th Int. Congr., Held as Part of the Services Conf. Federation*, San Diego, CA, USA, Jun. 2019, pp. 1–17, doi: 10.1007/978-3-030-23551-2_1.
- [11] H. S. Cha et al., "The Korea cancer big data platform (K-CBP) for cancer research," *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 16, no. 13, Jun. 2019, Art. no. 2290, doi: 10.3390/ijerph16132290.
- [12] H. Zheng and X. Jiang, "Design and implementation of college consumption analysis system based on NoSQL database," in *Proc. 13th Int. Conf. Comput. Sci. Educ. (ICCSE)*, Colombo, Sri Lanka, Aug. 2018, pp. 1–5.
- [13] H. Ganu and P. Viswa Datha, "Fast query expansion on an accounting corpus using sub-word embeddings," in *Proc. 2nd Workshop Subword/Character LElvel Models*, New Orleans, LA, USA, Jun. 2018, pp. 61–65.
- [14] Elasticsearch. *Mapping | Elasticsearch Guide [8.12] | Elastic*. (2024). Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.elastic.co/guide/en/elasticsearch/reference/current/mapping.html>
- [15] D. Brimley. "What is an Elasticsearch index?." ELASTIC.co. <https://www.elastic.co/blog/what-is-an-elasticsearch-index> (accessed Feb. 26, 2024).
- [16] Elasticsearch. *Thai tokenizer | Elasticsearch Guide [8.11] | Elastic*. (2024). Accessed: Jan. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.elastic.co/guide/en/elasticsearch/reference/current/analysis-thai-tokenizer.html>
- [17] Elasticsearch. *N-gram tokenizer | Elasticsearch Guide [8.11] | Elastic*. (2024). Accessed: Jan. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.elastic.co/guide/en/elasticsearch/reference/current/analysis-ngram-tokenizer.html>
- [18] Elasticsearch. *Autocomplete | Documentation*. (2024). Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: <https://docs.elastic.co/search-ui/solutions/ecommerce/autocomplete>
- [19] *Kibana: Explore, Visualize, Discover Data*. (2020). Elasticsearch. Accessed: Dec. 13, 2020. [Online]. Available: <https://www.elastic.co/kibana>
- [20] *Power BI - Data Visualization | Microsoft Power Platform*. (2024). Microsoft. Accessed: Jan. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi>
- [21] Tech2Biz. "TechPropose." TECH2BIZ.net. <https://www.tech2biz.net/content/inventor> (accessed Feb. 27, 2024).

การพัฒนาล้างข้อมูลด้วยเทคนิคการบูรณาการข้อมูลเพื่อลดความซ้ำซ้อน ของข้อมูลสำหรับระบบประเมินภาระงานบุคลากรสายวิชาการ

จิรพันธ์ รองในเมือง^{1*} จงกล จันทร์เรือง² สนั่น การคำ³

^{1*,2,3}คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : jirapan.ro@rmu.ac.th

รับต้นฉบับ : 20 พฤษภาคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 14 สิงหาคม 2567; ตอรับบทความ : 5 กันยายน 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

ในยุคข้อมูลขนาดใหญ่ การบูรณาการข้อมูลเพื่อสร้างคลังข้อมูลมีความสำคัญต่อการพัฒนาองค์กรที่มีความหลากหลายของข้อมูล และข้อมูลมีความซ้ำซ้อนจำนวนมาก อันส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินงานด้านการตัดสินใจหรือการขับเคลื่อนองค์กรด้วยข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาล้างข้อมูลด้วยเทคนิคการบูรณาการข้อมูลเพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล 2) วิเคราะห์ข้อมูลด้านการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล โดยมีกระบวนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างข้อมูลของระบบ KIMS และ WE ผ่านการใช้โปรแกรม SQLyog 2) ขั้นตอนการบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการ ETL ผ่านแพลตฟอร์ม SSIS 3) ขั้นตอนการพัฒนาล้างข้อมูลใช้โปรแกรม SSMS สำหรับสร้างฐานข้อมูลใหม่เพื่อเก็บข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์จากการบูรณาการ 4) ขั้นตอนการทดสอบคลังข้อมูลด้วยการพัฒนาระบบรายงานข้อมูลสำหรับใช้ประโยชน์ข้อมูลด้วยภาษา SQL และภาษา PHP 5) ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลซ้ำซ้อนเป็นขั้นตอนสำคัญที่แสดงถึงอัตราการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล การดำเนินงานวิจัยนี้ใช้ฐานข้อมูลจากระบบประเมินภาระงาน (WE) และระบบการจัดการความรู้และนวัตกรรม (KIMS) จำนวน 8,505 รายการ ซึ่งแบ่งเป็นข้อมูลงานวิจัย จำนวน 5,490 รายการ และข้อมูลงานบริการวิชาการ จำนวน 3,015 รายการ ผลการดำเนินงานวิจัย พบว่า จำนวนข้อมูลซ้ำซ้อนของงานวิจัยจากสองระบบลดลง จำนวน 1,381 แถว คิดเป็นร้อยละ 74.84 และงานบริการวิชาการลดลงจำนวน 468 แถว คิดเป็นร้อยละ 84.47 จากผลการวิจัยสรุปว่าการสร้างคลังข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูลผ่านกระบวนการ ETL ช่วยลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลภายในองค์กร และช่วยแก้ปัญหาด้านเวลาการทำงานสำหรับการตัดสินใจหรือการขับเคลื่อนองค์กรด้วยข้อมูล

คำสำคัญ : เทคนิคการบูรณาการข้อมูล การลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล คลังข้อมูล กระบวนการ ETL

Development of Data Warehouse Using Data Integration Techniques to Reduced Data Redundancy for Workload Evaluation System Based on Academic Staff

Jirapan Rongnaimuang^{1*} Jongkol Janruang² Sanun Karnka³

^{1*,2,3}*Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand*

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

Received: 20 May 2024; Revised: 14 August 2024; Accepted: 5 September 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

In the era of big data, data integration to create data warehouses is vital to the development of organizations with a variety of data. There are a lot of redundancies. This redundancy affects the duration of decision-making and the overall efficiency of an information-driven organization. The objectives of the research were to: 1) develop a data warehouse using data integration techniques to reduce data redundancy; and 2) analyze data about redundancy reduction. This paper proposes the data warehouse development, which has five steps. Firstly, the process of data structure study, which uses the SQLyog program as a tool to understand the data structures of KIMs and WE Systems. Secondly, data integration is performed based on the ETL process via the SSIS platform. Thirdly, the data warehouse development process uses the SSMS program to create a new database that consolidates the integrated data. Fourthly, the process of testing on the data warehouse is done using SQL and PHP as tools to create the report systems for decision-making. Finally, the data redundancy analysis process is conducted to determine the rate of data redundancy reduction. This research uses raw data from the WE and KIMs databases, compressing 8,505 entries. The data sets are classified into two groups, which are the research group (5,490 entries) and the academic service group (3,015 entries). According to experimental results, the reduction in data redundancy for the research group between the two systems is 1,381 entries, which is equal to 74.84%. Similarly, the reduction in data redundancy for the academic services group between the two systems is 468 entries, which is equal to 84.47%. The research demonstrates that the development of data warehouses using data integration based on the ETL process can effectively reduce data redundancy within organizations. As a result, the performance of the data warehouse development process can improve the efficiency of decision-making and enhance data-driven operations within the organization.

Keywords: Data integration, Data redundancy, Data warehouse, ETL process

1) บทนำ

การบูรณาการข้อมูล (data integration) เป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์ในการรวมข้อมูลที่มาจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการทำงานภายในองค์กรให้มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์และมีคุณค่าต่อการวิเคราะห์ รวมถึงการช่วยสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารหรือบุคลากรภายในหน่วยงาน [1] ทั้งนี้ข้อมูลภายในหน่วยงานมีความสำคัญอย่างมาก ความต้องการใช้ประโยชน์จากข้อมูลเหล่านี้ในการประกอบการตัดสินใจ หรือการวางกลยุทธ์ภายในหน่วยงาน การบูรณาการข้อมูลในหน่วยงานเพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการสนับสนุนการบริหารจัดการองค์กร อีกทั้งยังเสริมสร้างศักยภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการและมีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหา หรือการวางกลยุทธ์ใหม่ในองค์กร [2], [3] ดังนั้นการบูรณาการเป็นพื้นฐานที่สำคัญของการขับเคลื่อนองค์กรที่มีข้อมูลที่หลากหลายแหล่งที่มา ช่วยเพิ่มความได้เปรียบในด้านการแข่งขัน เนื่องจากข้อมูลมีการเติบโตและมากขึ้น การบูรณาการข้อมูลยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อองค์กรที่ใช้ประโยชน์จากข้อมูล ทั้งนี้การบูรณาการข้อมูลส่งผลให้เกิดชุดข้อมูลใหม่ที่ถูกกรองและปรับแต่งจากหลากหลายแหล่งที่มาจนเกิดเป็นคลังข้อมูล (data warehouse)

การบูรณาการข้อมูลส่งผลให้เกิดการพัฒนาคลังข้อมูล ชุดข้อมูล ที่ผ่านการบูรณาการภายในคลังข้อมูลสามารถเข้าถึงได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว ปัจจุบันคลังข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการนำไปใช้ประโยชน์ หรือส่งเสริมให้การทำงานในองค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดขั้นตอนในการดำเนินการนำเข้าข้อมูล ลดความผิดพลาดจากการปฏิบัติงานของบุคลากรในหน่วยงานเนื่องจากคลังข้อมูลเป็นศูนย์กลางในการรวบรวมข้อมูลจำนวนมากจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลายแหล่ง นอกจากนั้นยังสามารถสืบค้นข้อมูล และรวบรวมข้อมูลจำนวนมาก รวมถึงการสร้างรายงานข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ และประกอบการตัดสินใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานมีระบบการจัดการความรู้และนวัตกรรม (KIMs) และระบบประเมินผลการปฏิบัติงานของบุคลากรสายวิชาการ (WE) ซึ่งระบบ KIMs เป็นแพลตฟอร์มดิจิทัลในการบริหารและจัดการความรู้หรือนวัตกรรมผ่านแพลตฟอร์มเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากของประเทศ ผู้บริหารสามารถนำความรู้และนวัตกรรมรวมถึงทีมผู้วิจัยต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการหน่วยงาน [4] ระบบ KIMs นั้น เก็บข้อมูลด้านงานวิจัย และงานบริการวิชาการ นอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลในด้านอื่น ๆ เช่น ข้อมูลผลิตภัณฑ์ นวัตกรรม

ทรัพย์สินทางปัญญา ข้อมูลชุมชน เครือข่ายความร่วมมือในภาครัฐและเอกชน เป็นต้น ระบบประเมินผลการปฏิบัติราชการของบุคลากรสายวิชาการ (WE) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้บุคลากรสายวิชาการนำข้อมูลที่ได้ปฏิบัติราชการตลอดทั้งปีหรือภาคการศึกษานั้น ๆ นำข้อมูลเข้าสู่ระบบเพื่อประเมินศักยภาพของตนเอง โดยผู้บริหารภายในสังกัดของบุคลากรผู้กรอกข้อมูลสามารถดูข้อมูลผ่านระบบสามารถแสดงถึงศักยภาพในการทำงานของบุคลากรภายในสังกัด ซึ่งระบบประเมินนั้นนอกจากใช้เพื่อประเมินศักยภาพของบุคลากรผ่านระบบแล้วยังสามารถใช้ประกอบการเลื่อนขั้นเงินเดือนหรือค่าตอบแทนได้ [5]

ข้อมูลจากทั้ง 2 ระบบนั้นเกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ข้อมูลภายในมหาวิทยาลัยมีความหลากหลายและมีจำนวนมาก ทำให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการนำเข้าข้อมูลเสียเวลาในการกรอกข้อมูลลงระบบออนไลน์เป็นอย่างมาก [6] โดยเฉพาะข้อมูลด้านงานวิจัยและงานบริการวิชาการ เพราะต้องกรอกข้อมูลชุดเดียวกันลงทั้งระบบ KIMs และระบบ WE เนื่องจากทั้ง 2 ระบบไม่มีการเชื่อมโยงข้อมูลกัน ในขณะที่ปัจจุบันมีเทคโนโลยีในด้านการบูรณาการข้อมูลโดยการใช้กระบวนการของ Extract Transform Load (ETL) โดยนำเอาข้อมูลจากระบบต้นทาง มาปรับแต่งให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม จากนั้นนำไปจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูล [2]

ด้วยความสำคัญของข้อมูลที่มีความหลากหลายและกระจายอยู่ในที่ต่าง ๆ ขององค์กร ร่วมกับประโยชน์จากการพัฒนาคลังข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูล ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาคลังข้อมูลด้วยเทคนิคการบูรณาการข้อมูลแบบ ETL เพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลด้านการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล [7]–[9] ซึ่งคลังข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งด้านการออกรายงานและสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหาร [10] รวมถึงลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานด้านการจัดเก็บข้อมูล เมื่อจำนวนข้อมูลที่บุคลากรต้องนำเข้าระบบดิจิทัลน้อยลงแต่ผลการดำเนินงานมีมากขึ้น

2) ทบทวนวรรณกรรม

2.1) การบูรณาการข้อมูล (Data Integration)

เป็นกระบวนการสำคัญในการจัดการข้อมูลในหน่วยงานที่มีแหล่งข้อมูลหลายแหล่ง หรือมาจากแหล่งต่าง ๆ ซึ่งการบูรณาการข้อมูลนี้เกิดขึ้นโดยการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ แล้วดำเนินการแปลงหรือปรับแต่งข้อมูลให้สอดคล้องกับโครงสร้างข้อมูลที่เหมาะสมกัน หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาจัดเก็บไว้ใน

คลังข้อมูลปลายทางเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือการตัดสินใจต่อไป [1], [3] ประโยชน์ของการบูรณาการข้อมูลมีหลายด้าน เช่น ช่วยเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ ช่วยในการตัดสินใจของผู้บริหาร เป็นต้นการบูรณาการข้อมูลสามารถทำได้โดยใช้เทคโนโลยีและเครื่องมือต่าง ๆ เช่น กระบวนการ ETL ซึ่งเป็นกระบวนการหลักที่ใช้สำหรับการดึงข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ และปรับแต่งข้อมูลให้เหมาะสมกับโครงสร้างข้อมูลและการแปลงข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลสามารถใช้งานร่วมกันได้ จากนั้นนำไปจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูล [7] ดังนั้นการบูรณาการข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญและมีประโยชน์ ด้านความถูกต้อง ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย รวมถึงสามารถสร้างมุมมองในภาพรวม ช่วยให้ผู้บริหารสามารถเห็นภาพรวมของข้อมูลได้

2.2) กระบวนการการบูรณาการข้อมูล

กระบวนการการบูรณาการข้อมูลแบบ ETL ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

2.2.1) การรวบรวมข้อมูล (Extract) นำข้อมูลจากแหล่งต้นทางที่หลากหลาย ทั้งในรูปแบบ ไฟล์ Excel, ฐานข้อมูล หรือแหล่งอื่น ๆ

2.2.2) การปรับแต่งข้อมูล (Transform) เป็นการปรับแต่งข้อมูลโดยผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้ข้อมูลจากหลายแหล่งที่มาที่มีรูปแบบที่เหมาะสม เช่น การลบข้อมูลซ้ำซ้อน, การปรับเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูล เป็นต้น

2.2.3) การจัดเก็บข้อมูล (Load) นำข้อมูลที่ถูกปรับแต่งในรูปแบบที่เหมาะสมไปจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูล เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การรายงานข้อมูล หรือการวิเคราะห์ข้อมูล เป็นต้น

ทั้งนี้ ETL มีความสำคัญด้านลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล ลดเวลาการทำงานและความยุ่งยากในการเตรียมข้อมูล มีความยืดหยุ่นง่ายต่อการรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย โดยสามารถแปลงข้อมูลที่แตกต่างให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม เพื่อความถูกต้องในการจัดเก็บและตรวจสอบได้จากตารางข้อมูล อันส่งผลให้เกิดคลังข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ [10] ใช้กระบวนการ ETL ในการดำเนินการสร้างคลังข้อมูล เพื่อรายงานข้อมูลด้านภัยพิบัติแก่ผู้บริหารในจังหวัดภูเก็ต โดย ETL สามารถจัดระเบียบข้อมูลจากหลายแหล่งและสามารถนำไปวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็ว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลจึงเลือกกระบวนการ ETL ในการบูรณาการข้อมูล

2.3) คลังข้อมูล (Data Warehouse)

เป็นระบบฐานข้อมูลที่ออกแบบและถูกสร้างขึ้นเพื่อจัดเก็บข้อมูลจากแหล่งของข้อมูลที่มีความหลากหลายทั้งภายในและภายนอกหน่วยงาน โดยข้อมูลที่ถูกจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูลนั้นจะอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลหรือการรายงานข้อมูล [9], [10] คลังข้อมูลส่วนใหญ่มักถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและประกอบการตัดสินใจของผู้บริหาร ดังนั้นคลังข้อมูลมีความสำคัญอย่างมากในหน่วยงาน [11] โดยคลังข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 4 คุณลักษณะ ดังนี้ 1) คลังข้อมูลที่ดีกลุ่มให้เหมาะสมในการสืบค้นข้อมูล 2) การรวบรวมข้อมูลเข้าด้วยกันจากแหล่งที่หลากหลาย 3) คลังข้อมูลที่เก็บข้อมูลย้อนหลังสามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูลได้ 4) คลังข้อมูลที่ไม่เปลี่ยนแปลงข้อมูลจากฐานข้อมูลต้นทาง คลังข้อมูลแบ่งส่วนของข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ข้อมูลเพื่อการทำงาน เป็นข้อมูลที่นำไปใช้งานผ่านกระบวนการหรือการประมวลผล 2) ข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ เป็นข้อมูลที่ผ่านการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ เพื่อให้ข้อมูลเกิดประโยชน์อยู่ในรูปแบบพร้อมใช้งานด้านการวิเคราะห์ [10] ตัวอย่างการใช้ประโยชน์คลังข้อมูล เช่น การรวบรวมข้อมูลทุกภัยในจังหวัดภูเก็ตจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูลและนำมาสร้างระบบรายงานข้อมูลเพื่อให้ผู้บริหารใช้วิเคราะห์และตัดสินใจระดับความรุนแรงของพื้นที่เสี่ยงอุทกภัย [10] และการสร้างรายงานทางการเงินแบบรายวัน รายเดือน รายไตรมาส สำหรับธนาคารจากคลังข้อมูลเพื่อวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลสถานการณ์ทางการเงินของธนาคาร [12]

2.4) ระบบการจัดการความรู้และนวัตกรรม (Knowledge and Innovation Management System: KIMs)

ระบบ KIMs เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการจัดการความรู้และนวัตกรรม เน้นการนำความรู้จากบุคคล นักวิจัย เครือข่าย มาแบ่งปันผ่านแพลตฟอร์มเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากของประเทศ ซึ่งผู้บริหารหรือบุคคลสามารถนำความรู้ นวัตกรรม รวมถึงเครือข่ายวิจัยนั้น ไปใช้ประโยชน์เพื่อการทำงาน หรือบริหารหน่วยงาน ทั้งนี้ระบบ KIMs เก็บข้อมูลที่สำคัญในด้านของงานวิชาการ งานวิจัย งานบริการวิชาการ ทรัพย์สินทางปัญญา งานตีพิมพ์ นวัตกรรม ผลิตภัณฑ์ วารสาร ประชุมวิชาการ หนังสือ หรือคู่มือ

เป็นต้น นอกจากนี้ระบบ KIMs ยังนำแนวคิดของ SECI โมเดลมา ใช้สำหรับการออกแบบแพลตฟอร์มดิจิทัล โดยนำความคิดสร้างสรรค์มามีส่วนร่วมในการจัดการความรู้ ส่งผลให้เห็นถึงผลผลิต ด้านงานวิชาการที่ชัดเจนยิ่งขึ้น [4]

2.5) ระบบประเมินภาระงานบุคลากร (Workload Evaluation System: WE)

ระบบ WE ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้บุคลากรสายวิชาการของ มหาวิทยาลัย สำหรับการประเมินภาระงานผ่านระบบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการทำงาน อีกทั้งยังใช้สำหรับให้ผู้บริหาร ตรวจสอบการทำงานของบุคลากร รวมถึงนำมาใช้ประกอบการ เลื่อนขั้นเงินเดือนของบุคลากรสายวิชาการ ซึ่งการประเมินภาระ งานถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนภาระงานคิดเป็น ร้อยละ 60 ส่วนคุณภาพและผลผลิตคิดเป็น ร้อยละ 20 และส่วนสมรรถนะ คิดเป็นร้อยละ 20 ตามประกาศมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เรื่อง ภาระงานบุคลากรสายวิชาการ [5]

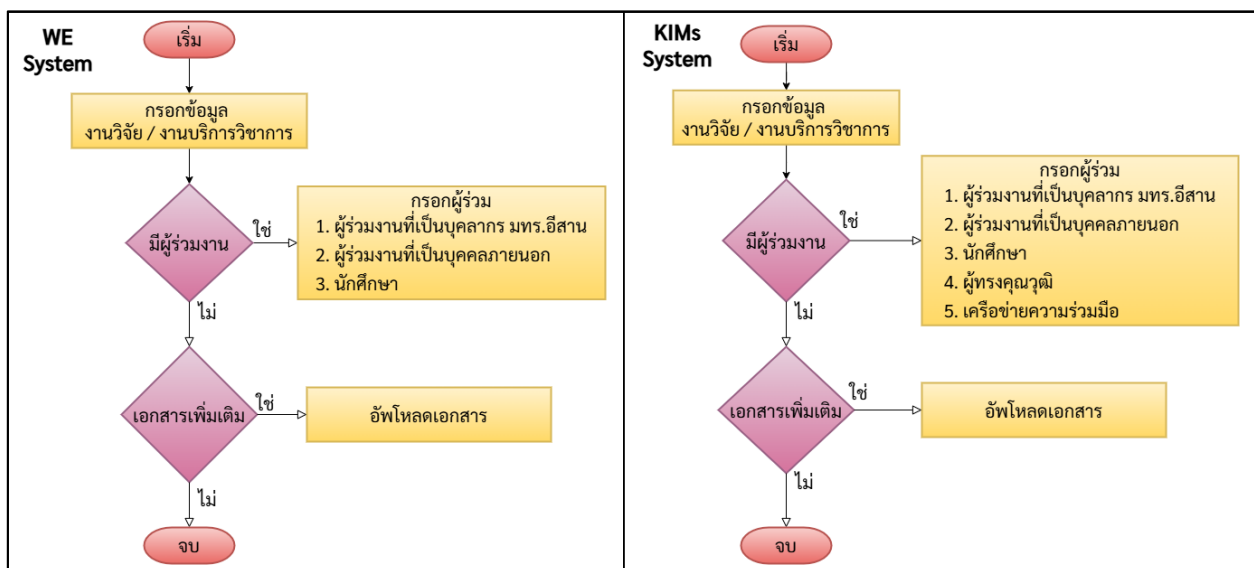
3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) กรอบแนวคิด

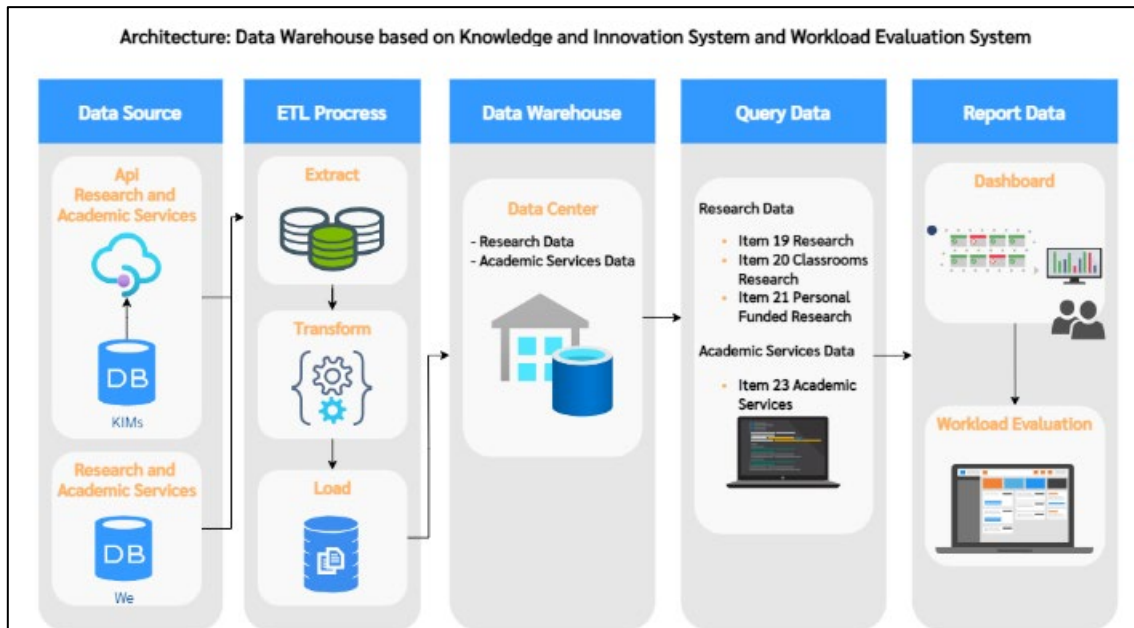
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ทั้ง 5 วิทยาเขต มี บุคลากรสายวิชาการมากกว่า 1,200 ราย โดยมหาวิทยาลัยมีการ ดำเนินงานด้านการจัดเก็บข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ

ผ่าน 2 ระบบ คือระบบ KIMs กับระบบ WE โดยทั้ง 2 ระบบมี กระบวนการและขั้นตอนการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบที่สอดคล้องกัน แต่แตกต่างกันในส่วนของประเภทข้อมูลและฐานข้อมูล การ ดำเนินการดังกล่าวก่อให้เกิดข้อมูลงานวิจัยและข้อมูลบริการ วิชาการมีความซ้ำซ้อน ส่งผลต่อความความถูกต้องและเวลาใน การดำเนินงาน กระบวนการนำเข้าสู่ข้อมูลงานวิจัยและงานบริการ วิชาการของระบบ KIMs กับระบบ WE สามารถแสดงเป็นแผนภาพ ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 กระบวนการนำเข้าสู่ข้อมูลของระบบ WE และ KIMs มีความสอดคล้องกัน แตกต่างกันเพียง ระบบ KIMs มีการ นำเข้าสู่ข้อมูลผู้ร่วมงานงานวิจัยและงานบริการวิชาการในรูปแบบ ผู้ทรงคุณวุฒิและเครือข่ายความร่วมมือ ด้วยความสอดคล้องกัน ของข้อมูล งานวิจัยนี้มีแนวคิดเชื่อมโยงข้อมูลของทั้งสองเข้า ด้วยกัน เพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล และเพิ่มความสะดวกใน การนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ หรือการพัฒนากระบวนงานข้อมูล สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจของผู้บริหาร หรือผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง [5] ดังนั้นเพื่อให้แนวคิดถูกพัฒนาอย่างเป็น รูปธรรม ทดสอบได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนา คลังข้อมูลด้วยเทคนิคการบูรณาการข้อมูลเพื่อลดความซ้ำซ้อน ของข้อมูล 2) วิเคราะห์ข้อมูลด้านการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล โดยกรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 : กระบวนการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 2 : กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 2 กรอบแนวคิดงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาคลังข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของสองระบบ ผ่านกระบวนการ ETL โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานด้านการพัฒนาคลังข้อมูล ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ 1) แหล่งข้อมูล (data source) ศึกษาโครงสร้างข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการจากสองระบบ 2) กระบวนการ รวบรวม ปรับแต่ง และจัดเก็บ (ETL process) สำหรับบูรณาการข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของทั้งสองระบบเข้าด้วยกัน 3) คลังข้อมูล (data warehouse) สร้างคลังข้อมูลเพื่อจัดเก็บข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการที่ผ่านการบูรณาการของทั้งสองระบบ 4) การดึงข้อมูล (query data) ดึงข้อมูลโดยจำแนกประเภทของข้อมูลตามกรอบภาระงานของบุคลากรสายวิชาการตามที่มหาวิทยาลัยกำหนด และ 5) ระบบรายงาน (report data) พัฒนาระบบรายงานข้อมูลในรูปแบบของตารางข้อมูล

นอกจากกรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาคลังข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูลตามกระบวนการของ ETL และทำการทดสอบการใช้ประโยชน์ข้อมูลจากคลังข้อมูล งานวิจัยนี้ยังมีการทดสอบการดำเนินงานวิจัยด้วยค่าสถิติในรูปแบบของอัตราการลดลงของข้อมูลที่ซ้ำซ้อนในรูปแบบของค่าร้อยละ และค่าเฉลี่ยร่วมกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการประเมินระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ

3.2) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย/รวบรวมข้อมูล

3.2.1) การจัดเก็บข้อมูล ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยด้านการจัดเก็บข้อมูล ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) ส่วนของข้อมูลระเบียบการประเมินภาระงานของบุคลากรสายวิชาการที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบประเมินภาระงานบุคลากรสายวิชาการ และข้อมูลรูปแบบงานวิจัยและงานบริการวิชาการของมหาวิทยาลัยฯ จากบทความวิจัยของโครงการวิจัยเรื่องเพิ่มศักยภาพการจัดการความรู้และนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากด้วยดิจิทัลแพลตฟอร์ม ซึ่งเป็นโครงการวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2564 [4]

2) ส่วนของข้อมูลจากการศึกษาระบบ KIMs และ ระบบ WE มีการศึกษาข้อมูลโครงสร้างและลักษณะของข้อมูล ทั้งโครงสร้างข้อมูลและลักษณะของข้อมูลจะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบและพัฒนาคลังข้อมูลจากการบูรณาการข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของสองระบบด้วยกระบวนการ ETL

3.2.2) ชุดข้อมูล ชุดข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการที่ใช้ในการทดสอบมีการจัดเก็บระหว่างวันที่ 1 กันยายน 2563 ถึง 31 มีนาคม 2566 จำนวน 8,505 รายการ ซึ่งแบ่งเป็นข้อมูลงานวิจัย จำนวน 5,490 รายการ และข้อมูลงานบริการวิชาการ จำนวน 3,015 รายการ

3.2.3) *เครื่องมือวิจัย* การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน การดำเนินงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.3.1) การพัฒนาลังข้อมูลจากการบูรณาการข้อมูลงานวิจัย และงานบริการวิชาการจากระบบ KIMs กับระบบ WE ด้วย กระบวนการ ETL มีการดำเนินการโดยใช้โปรแกรมดังต่อไปนี้

1) โปรแกรม SQLyog เป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการฐานข้อมูล เช่น เรียกดูข้อมูล เป็นต้น

2) โปรแกรม Visual Studio ผ่านเครื่องมือ SQL Server Integration Services (SSIS) เป็นเครื่องมือสำหรับการบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการ ETL

3) โปรแกรม SQL Server Management Studio (SSMS) เป็นระบบจัดการฐานข้อมูลที่มีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับการนำมาใช้สร้างคลังข้อมูล

3.2.3.2) การพัฒนาระบบรายงานงานวิจัยและงานบริการวิชาการจากคลังข้อมูลที่ถูกพัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ ดำเนินการเพื่อทดสอบการใช้ประโยชน์ข้อมูลจากคลังข้อมูลที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ โดยมีเครื่องมือในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1) ภาษา PHP มีโครงสร้างและลักษณะของภาษาที่ไม่ยาก เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการสร้างเว็บสำหรับโต้ตอบกับผู้ใช้งานที่มีประสิทธิภาพรวมถึงมีความรวดเร็ว และภาษา SQL เป็นภาษามาตรฐานที่มีการยอมรับและใช้งานอย่างกว้างขวางสามารถใช้ในการจัดการข้อมูล เช่น เพิ่ม แก้ไข ลบ ค้นหา เป็นต้น รวมถึงสามารถใช้ SQL ในการรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของฐานข้อมูล จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ เพื่อให้ผู้บริหารและบุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้อง สามารถตรวจสอบข้อมูลหรือนำไปวิเคราะห์และประกอบการตัดสินใจ

2) CodeIgniter Framework ถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา PHP เหมาะสำหรับพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันและมีโครงสร้างการพัฒนาโปรแกรมอย่างเป็นระบบ

3.2.3.3) การทดสอบและประเมินผลการพัฒนาลังข้อมูล และระบบรายงานงานวิจัยและงานบริการวิชาการ

1) แบบประเมินประสิทธิภาพระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ ประกอบด้วยการประเมินผลรายด้าน จำนวน 5 ด้าน คือ ด้านความสามารถตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน ด้านความถูกต้องในการทำงานของระบบ ด้านความสะดวกในการใช้งานระบบ ด้านความเร็วในการทำงาน และด้านการรักษาความปลอดภัย

2) แบบบันทึกผลการบูรณาการข้อมูลเพื่อพัฒนาลังข้อมูล ประกอบด้วย จำนวนรายการข้อมูลข้อมูลงานวิจัย และงานบริการวิชาการของสองระบบ จำนวนรายการข้อมูลที่ได้จากการบูรณาการ จำนวนรายการข้อมูลซ้ำซ้อน จำนวนร้อยละ โดยข้อมูลทั้งหมดถูกเก็บอยู่ในรูปแบบของตาราง Excel

3.3) การประเมินและวิเคราะห์ผลการวิจัย

3.3.1) *ส่วนการบูรณาการข้อมูล* การประเมินผลการวิจัยส่วนงานบูรณาการดำเนินการโดยใช้การจดบันทึกผ่านแบบบันทึกผลการบูรณาการข้อมูลเพื่อพัฒนาลังข้อมูล โดยมีการนำรายการข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมาใช้ในการคำนวณค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลที่ลดลงหลังการดำเนินการบูรณาการข้อมูล โดยคำนวณเป็นอัตราร้อยละ ดังสมการที่ 1

$$\text{Reduced Rate} = (A / B) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ Reduced Rate = อัตราร้อยละการลดลงของข้อมูลซ้ำซ้อน

A = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการบูรณาการจาก 2 ระบบ

B = จำนวนข้อมูลทั้งหมดจากระบบ KIMs กับระบบ WE

3.3.2) *การประเมินประสิทธิภาพของระบบรายงานงานวิจัยและงานบริการวิชาการ* มีการประเมินแบบประมาณค่า (rating scale) 5 ระดับ ตามแนวคิดของลิเคิร์ท [10] โดยถือเกณฑ์การประเมินเป็นคะแนน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : เกณฑ์ค่าคะแนนประเมิน

ลำดับ	คำอธิบาย
1	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับดีมาก
2	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับดี
3	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับปานกลาง
4	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับน้อย
5	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับต้องปรับปรุง

การแปลผลค่าคะแนนประเมิน ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

คะแนนเฉลี่ย	4.51–5.00	หมายถึง	ระดับดีมาก
คะแนนเฉลี่ย	3.51–4.50	หมายถึง	ระดับดี
คะแนนเฉลี่ย	2.51–3.50	หมายถึง	ระดับปานกลาง
คะแนนเฉลี่ย	1.51–2.50	หมายถึง	ระดับน้อย
คะแนนเฉลี่ย	1.00–1.50	หมายถึง	ระดับน้อยที่สุด

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1) ผลการวิจัย

4.1.1) การศึกษาข้อมูลและโครงสร้างข้อมูลเพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการพัฒนาคลังข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูลแบบ ETL ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน คือ

1) ศึกษาโครงสร้างข้อมูลงานวิจัยจากระบบ KIMs ผลการศึกษาพบว่า KIMs จัดเก็บข้อมูล 13 รายการ ประกอบด้วย ชื่อโครงการภาษาไทย, ชื่อโครงการภาษาอังกฤษ, ประเภทงานวิจัย, ประเภทแหล่งทุน, งบประมาณ, ปีงบประมาณ, หน่วยงานเจ้าของโครงการ, พื้นที่วิจัย, สถานะโครงการ, เอกสารหลักฐาน, ผู้ร่วมงานวิจัยและร้อยละการมีส่วนร่วม มีตารางสำหรับจัดเก็บงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จำนวน 4 ตาราง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ตารางเก็บข้อมูลงานวิจัยภายในระบบ KIMs

ลำดับ	ชื่อตาราง	คำอธิบาย
1	project	งานวิจัย
2	SourecFunds	ประเภทแหล่งทุน
3	SourceFundsInstitution	หน่วยงานผู้ให้ทุน
4	ResearchTeam	ผู้ร่วมงานวิจัย

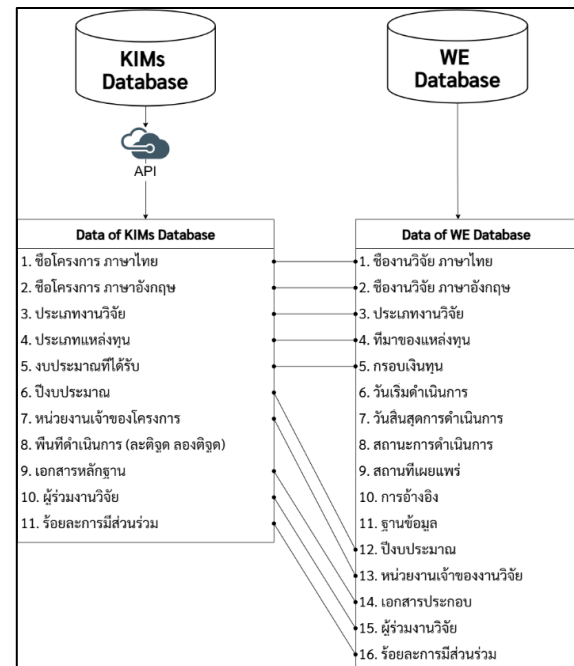
2) ศึกษาโครงสร้างข้อมูลงานวิจัยจากระบบ WE ผลการศึกษาพบว่า ระบบ WE จัดเก็บข้อมูล 16 รายการ ประกอบด้วย ชื่องานวิจัยภาษาไทย, ชื่องานวิจัยภาษาอังกฤษ, ประเภทงานวิจัย, แหล่งทุน, กรอบเงินทุน, วันเริ่มดำเนินการ, วันสิ้นสุดการดำเนินการ, สถานะดำเนินการ, สถานที่เผยแพร่, การอ้างอิง, ฐานข้อมูล, ปีงบประมาณ, หน่วยงานเจ้าของงานวิจัย, เอกสารประกอบ, ผู้ร่วมงานวิจัย, และร้อยละการมีส่วนร่วม ซึ่งมีตารางสำหรับจัดเก็บงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จำนวน 5 ตาราง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : ตารางเก็บข้อมูลงานวิจัยภายในระบบ WE

ลำดับ	ชื่อตาราง	คำอธิบาย
1	research	งานวิจัย
2	ResearchType	ประเภทงานวิจัย
3	ResourceType	ประเภทแหล่งทุน
4	StatusWork	สถานะการดำเนินการ
5	ResearchMember	นักวิจัยร่วม

3) ศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างข้อมูลงานวิจัยจากระบบ KIMs กับระบบ WE ผลการศึกษา พบว่า ข้อมูลของสองระบบมีความสอดคล้องกันสามารถนำมาบูรณาการเพื่อสร้างคลังข้อมูล

โดยความสอดคล้องของข้อมูล จำนวน 11 รายการ ประกอบด้วย ชื่องานวิจัยภาษาไทย, ชื่องานวิจัยภาษาอังกฤษ, ประเภทงานวิจัย, ประเภทแหล่งทุน, จำนวนเงินทุน, ปีงบประมาณ, หน่วยงานเจ้าของโครงการ, สถานะการดำเนินงาน, เอกสารหลักฐานเพิ่มเติม, ผู้ร่วมงานวิจัย และร้อยละการมีส่วนร่วม ข้อมูลที่สอดคล้องกันสามารถนำมาจำลองดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 : ข้อมูลงานวิจัยของสองระบบที่มีความสอดคล้อง

4) ศึกษาโครงสร้างข้อมูลงานบริการวิชาการจากระบบ KIMs ผลการศึกษาพบว่า ระบบ KIMs จัดเก็บข้อมูล 13 รายการ ประกอบด้วย ชื่อโครงการภาษาไทย, ชื่อโครงการภาษาอังกฤษ, ประเภทงานบริการวิชาการ, ประเภทแหล่งทุน, งบประมาณที่ได้รับ, ปีงบประมาณ, หน่วยงาน, พื้นที่ดำเนินงาน, สถานะโครงการ, เอกสารหลักฐาน, ผู้ร่วมงานวิจัย และร้อยละการมีส่วนร่วม ทั้งนี้ ระบบ KIMs มีตารางสำหรับจัดเก็บงานบริการวิชาการ จำนวน 4 ตาราง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 : ตารางเก็บข้อมูลงานบริการวิชาการภายในระบบ KIMs

ลำดับ	ชื่อตาราง	คำอธิบาย
1	project	งานบริการวิชาการ
2	SourecFunds	ประเภทแหล่งทุน
3	SourceFundsInstitution	หน่วยงานผู้ให้ทุน
4	AcademicTeam	ผู้ร่วมงานบริการวิชาการ

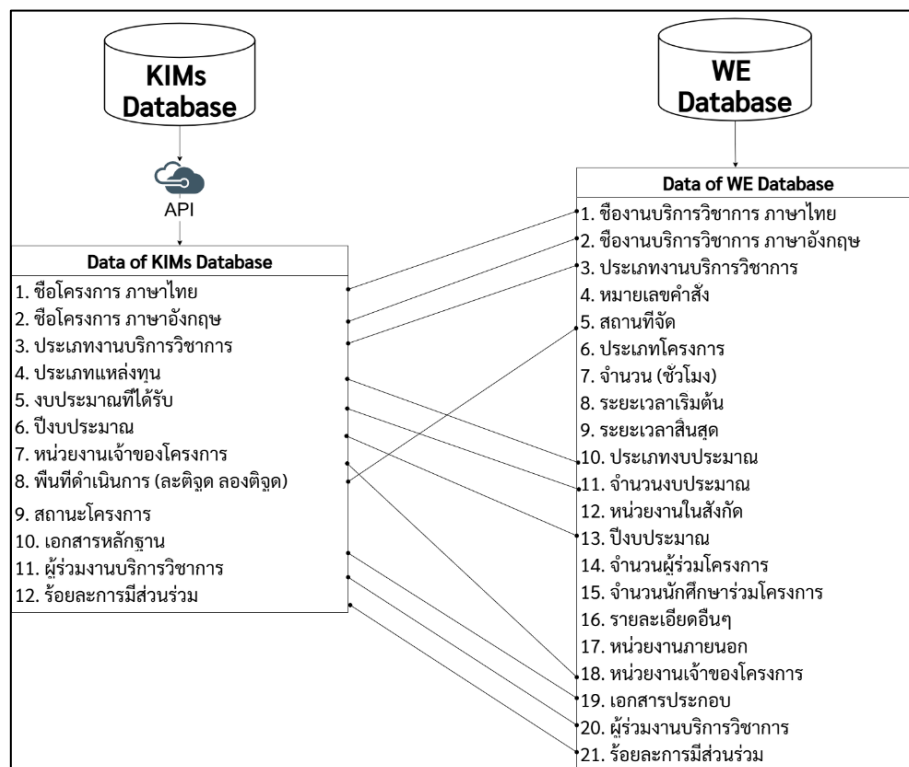
5) ศึกษาโครงสร้างข้อมูลงานบริการวิชาการจากระบบ WE พบว่า ระบบ WE จัดเก็บข้อมูล 21 รายการ ประกอบด้วย ชื่องาน บริการวิชาการภาษาไทย, ชื่องานบริการวิชาการภาษาอังกฤษ, ระดับงานบริการวิชาการ, หมายเลขคำสั่ง, สถานที่จัด, ประเภท, จำนวนชั่วโมง, วันเริ่มต้น, วันสิ้นสุด, ประเภทงบประมาณ, งบประมาณ, หน่วยงานในสังกัด, ปีงบประมาณ, จำนวนผู้ร่วม, นักศึกษาร่วม, รายละเอียดอื่น ๆ, หน่วยงานภายนอก, หน่วยงาน, เอกสารหลักฐาน, ผู้ร่วมงานและร้อยละของการมีส่วนร่วม ทั้งนี้ ตารางสำหรับจัดเก็บงานบริการวิชาการมีจำนวน 6 ตาราง ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 : ตารางเก็บข้อมูลงานบริการวิชาการภายในระบบ WE

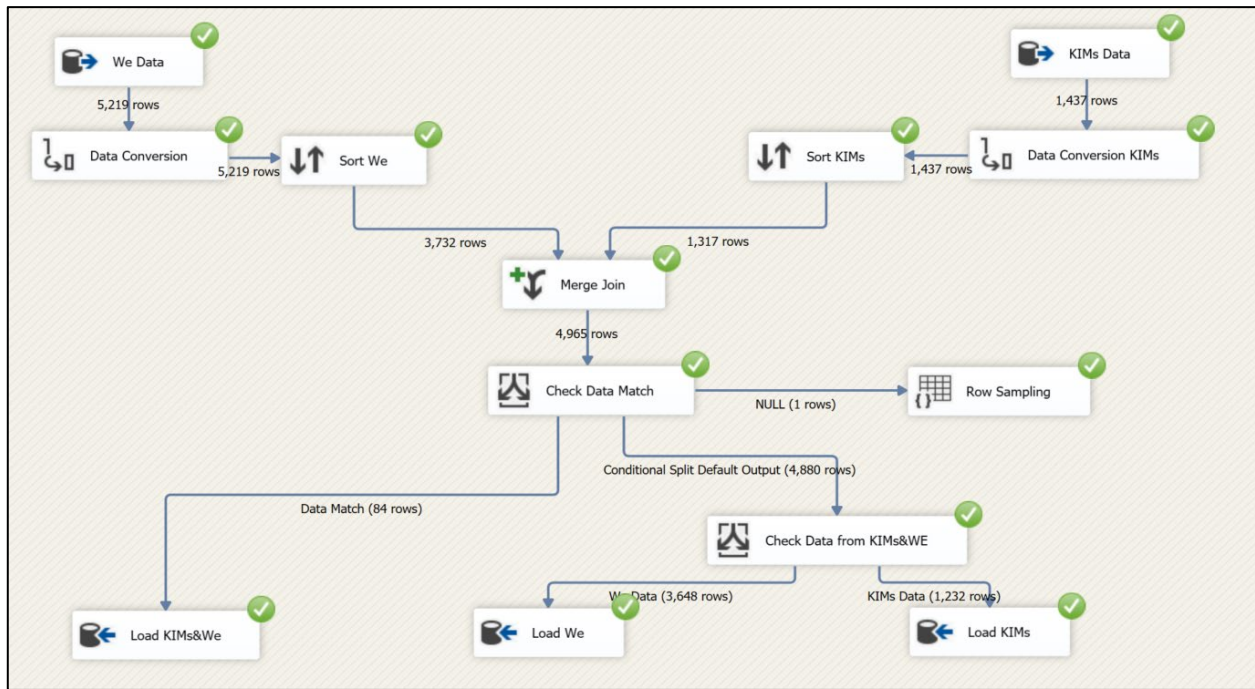
ลำดับ	ชื่อตาราง	คำอธิบาย
1	academic	งานบริการวิชาการ
2	academicLevel	ระดับของงาน
3	academicProjectType	ประเภทโครงการ
4	academicType	ประเภทงานรายชื่อ
5	academicMember	ผู้ร่วมงานบริการวิชาการ
6	CostType	ประเภทงบประมาณ

6) ศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างข้อมูลงานบริการวิชาการจาก 2 ระบบ ผลการศึกษาเปรียบเทียบพบว่า โครงสร้างข้อมูลงาน บริการวิชาการที่มาจากระบบ KIMs และระบบ WE มีความ สอดคล้องกัน สามารถนำมาบูรณาการเพื่อสร้างคลังข้อมูลร่วมกัน ความสอดคล้องกันของข้อมูลทั้ง 2 ระบบ มีจำนวน 13 รายการ ประกอบด้วย ชื่องานบริการวิชาการภาษาไทย, ชื่องานบริการ วิชาการภาษาอังกฤษ, ประเภทงานบริการวิชาการ, พื้นที่ดำเนินการ, ประเภทแหล่งทุน, จำนวนเงินทุน, ปีงบประมาณ, วันเริ่ม, วันสิ้นสุด, หน่วยงานเจ้าของโครงการ, เอกสารหลักฐานเพิ่มเติม, ผู้ร่วมงาน บริการวิชาการ และร้อยละการมีส่วนร่วม ข้อมูลที่สอดคล้องกัน สามารถนำมาจำลองดังแสดงในรูปที่ 4

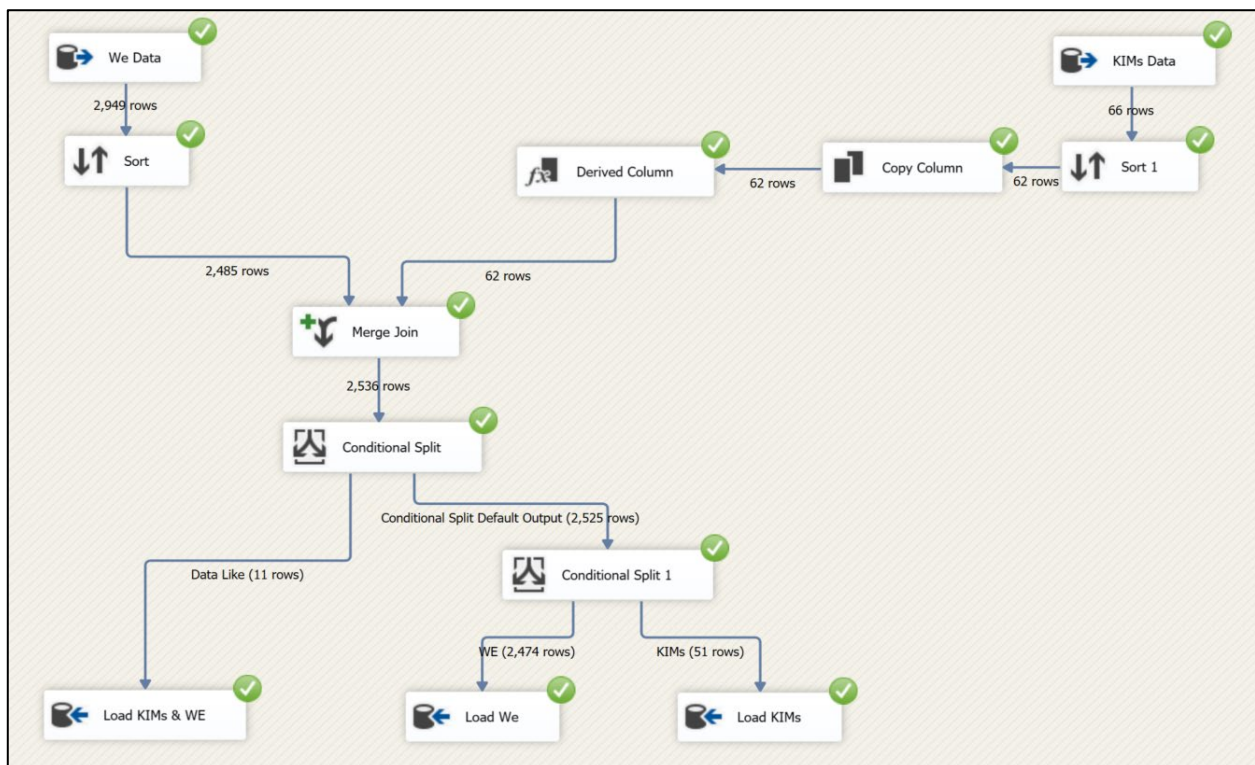
4.1.2) พัฒนาค้างข้อมูลด้วยเทคนิคการบูรณาการข้อมูลแบบ ETL เพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล กระบวนการพัฒนา คลังข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของระบบ KIMs กับ ระบบ WE ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน สามารถ แสดงถึงขั้นตอนการดำเนินงานบูรณาการข้อมูลงานวิจัยและงาน บริการวิชาการของระบบ KIMs กับระบบ WE เข้าด้วยกันผ่าน กระบวนการ ETL ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 4 : ข้อมูลงานบริการวิชาการของสองระบบที่มีความสอดคล้อง



รูปที่ 5 : ขั้นตอนการบูรณาการข้อมูลงานวิจัยของสองระบบ



รูปที่ 6 : ขั้นตอนการบูรณาการข้อมูลงานบริการวิชาการของสองระบบ

จากรูปที่ 5 และ 6 รายละเอียดการดำเนินงานเพื่อการพัฒนาคลังข้อมูล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การรวบรวมข้อมูล จากการนำข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของสองระบบมาจัดเตรียมไว้ตามกระบวนการของการรวบรวมข้อมูล ดังที่เขียนเป็นอัลกอริทึม ในรูปที่ 7 โดยผลลัพธ์การทำงานของอัลกอริทึมคือชุดข้อมูลพร้อมกับโครงสร้างข้อมูลด้านงานวิจัยและงานบริการวิชาการของสองระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วย ชื่อข้อมูล ชนิดข้อมูล ของทั้งสองฐานข้อมูล ส่งผลให้ทำงานได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

```

Algorithm 1: ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล (Data Source)
1  START (Data Source)
2
3  // งานวิจัย
4
5  SELECT * FROM [WEDB].[dbo].[research]
6  SELECT * FROM [KIMsDB].[dbo].[project] WHERE project_type_id IN ('1','4')
7
8  // งานบริการวิชาการ
9
10 SELECT * FROM [WEDB].[dbo].[academic]
11 SELECT * FROM [KIMsDB].[dbo].[project] WHERE project_type_id ('2','3','5','7');
12
13 END of Data Source
    
```

รูปที่ 7 : อัลกอริทึมการรวบรวมข้อมูล

2) การปรับแต่งข้อมูล (Transform) ขั้นตอนการนำข้อมูลด้านงานวิจัยและงานบริการวิชาการของสองระบบมาทำการปรับแต่งข้อมูล ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ 1) การปรับแต่งข้อมูล 2) การเรียงข้อมูล 3) การเชื่อมข้อมูลของสองระบบ และ 4) การตรวจสอบข้อมูล ดังที่เขียนเป็นอัลกอริทึม ในรูปที่ 8–11

```

Algorithm 2: ขั้นตอนปรับแต่งข้อมูล (Data Conversion)
1  START (Data Conversion)
2
3  Transform WE(Column) {
4      researched, WE_ID, int;
5      title_th, WE_title_th, string;
6      title_en, WE_title_en, string;
7      status_work, WE_Status_Word id, string;
8      research_type, WE_Research_type id, string;
9      resource_type, WE_Resource_type id, int;
10     resource_detail, WE_Resource_Detail, string;
11     budget, WE_Budget, string;
12     year, WE_Year, string;
13     files_upload, WE_Files, string;
14     adding, WE_Adding, string;
15 }
16
17 Transform KIMs(Column) {
18     project_id, KIMs_id, int;
19     project_name_th, KIMs_name_th, string;
20     project_name_en, KIMs_name_en, string;
21     project_status, KIMs_Project_Status string;
22     project_type_id, KIMs_Project_Type id, string;
23     source_name_type_id, KIMs_Source_Name_type id, int;
24     project_agency, KIMs_Project_Agency, string;
25     project_budget, KIMs_Project_Budget, string;
26     project_star, KIMs_Project_Year, string;
27     project_upload, KIMs_Upload_Files, files_upload, string;
28     user_idcard, KIMs_User_Idcard, string;
29 }
30
31 END (Data Conversion)
    
```

รูปที่ 8 : การปรับแต่งข้อมูล (Data Conversion)

จากรูปที่ 8 การปรับแต่งข้อมูล (data conversion) ดำเนินการปรับแต่งประเภทของข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน เช่น string, date เป็นต้น และทำการกำหนดชื่อของคอลัมน์ให้แสดงถึงแหล่งที่มาของข้อมูลต้นทาง เช่น WE_title_th, KIMs_name_th เป็นต้น ส่งผลให้ข้อมูลมีมาตรฐานเดียวกันสำหรับนำมาใช้ในการบูรณาการข้อมูล รวมถึงสามารถช่วยในการตรวจสอบแหล่งที่มาของข้อมูลได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

```

Algorithm 3: ขั้นตอนเรียงลำดับข้อมูล (Sort)
1  START (Sort)
2
3  // Sort WE
4  ทำการเรียงลำดับของข้อมูล เช่น Input Column = WE_title_th
5  Sort Type = ascending คือ จากน้อยไปหามาก
6
7  // Sort KIMs
8  ทำการเรียงลำดับของข้อมูล เช่น Input Column = KIMs_project_name_th
9  Sort Type = ascending คือ จากน้อยไปหามาก
10
11     เลือก Remove rows with duplicate sort values เป็นการลบข้อมูลที่เหมือนกันออก
12
13
14  END (Sort)
    
```

รูปที่ 9 : ขั้นตอนการเรียงลำดับ (Sort)

จากรูปที่ 9 ขั้นตอนการเรียงลำดับข้อมูล (Sort) เป็นการเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้ชื่องานภาษาไทย ซึ่งเรียงจากตัวอักษร ก ถึง ฮ และลบข้อมูลซ้ำซ้อนของงานวิจัยและบริการวิชาการ โดยกำหนดข้อมูลที่เหมือนกันแบบร้อยละ 100 ส่งผลให้ข้อมูลซ้ำซ้อนจากระบบต้นทางลดลง แต่มีจุดข้อควรพัฒนาในส่วนงานการกำหนดความเหมือนแบบร้อยละ 100 อาจส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดของการตรวจสอบข้อมูล เมื่อข้อมูลเดียวกันแต่เขียนไม่เหมือนกัน เช่น ตัวพิมพ์เล็ก ตัวพิมพ์ใหญ่ เป็น

```

Algorithm 4: ขั้นตอนเชื่อมข้อมูลของสองระบบ (Merge Join)
1  START (Merge Join)
2
3  Merge join(KIMs name_th, WE_title_th) {
4      KIMs_ID, WE_ID;
5      KIMs_name_th, WE_title_th;
6      KIMs_name_en, WE_title_en;
7      KIMs_Project_Status, WE_Status_Word id;
8      KIMs_Project_Type id, WE_Research_type id;
9      KIMs_Source_Name_type id, WE_Resource_type id;
10     KIMs_Project_Agency, WE_Resource_Detail;
11     KIMs_Project_Budget, WE_Budget;
12     KIMs_Upload_Files, WE_Files;
13     KIMs_Project_Year, WE_Year;
14     KIMs_User_Idcard, WE_Adding;
15 }
16
17 END (Merge Join)
    
```

รูปที่ 10 : ขั้นตอนเชื่อมข้อมูลของสองระบบ (Merge Join)

จากรูปที่ 10 ขั้นตอนเชื่อมข้อมูลของสองระบบ (Merge Join) ผ่านรูปแบบ full join โดยใช้ชื่องานภาษาไทยเป็นตัวเชื่อมข้อมูล โดยกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อให้มีข้อมูลที่เหมือนกัน

แบบร้อยละ 100 ส่งผลให้ชุดข้อมูลด้านงานวิจัยและงานบริการวิชาการระหว่างสองระบบที่เข้าซ้อนกันลดลง แต่มีจุดข้อควรพัฒนาในส่วนงานการกำหนดความเหมือนแบบร้อยละ 100 อาจส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดของการตรวจสอบข้อมูล เมื่อข้อมูลเดียวกันแต่เขียนไม่เหมือนกัน เช่น ตัวพิมพ์เล็ก ตัวพิมพ์ใหญ่

```

Algorithm 5: ขั้นตอนการตรวจสอบข้อมูล (Check Data)
1  START (Check Data Match)
2
3  CASE // Check Data Match
4    WHEN !ISNULL(KIMs Name TH) && !ISNULL(We Title TH) THEN 'Data Match'
5    WHEN !ISNULL(KIMs Name TH) && !ISNULL(We Title TH) THEN 'NULL'
6    ELSE 'Conditional Split Default output'
7  END
8
9  CASE // Check Data from KIMs&WE
10   WHEN !ISNULL(KIMs ID) THEN 'KIMs Data'
11   WHEN !ISNULL(We Research Id) THEN 'WE Data'
12   ELSE 'Conditional Split Default output'
13 END
14
15 END (Check Data)
  
```

รูปที่ 11 : ขั้นตอนการตรวจสอบข้อมูล (Check Data)

จากรูปที่ 11 ขั้นตอนการตรวจสอบข้อมูล (Check Data) เป็นการนำข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของสองระบบที่ผ่านการเชื่อมข้อมูล (merge join) เข้าสู่เงื่อนไขการตรวจสอบข้อมูล เพื่อนำข้อมูลที่ผ่านเงื่อนไขไปจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูลเงื่อนไขในการตรวจสอบข้อมูล ประกอบด้วย 1) เงื่อนไขการตรวจสอบข้อมูลที่เหมือนกัน (check data match) และ 2) เงื่อนไขการตรวจสอบข้อมูลที่ไม่เหมือนกัน (Check Data from KIMs&WE) กระบวนการดังกล่าวช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการรวมข้อมูล รวมถึงสามารถตรวจสอบแหล่งที่มาต้นทางของข้อมูลของสองระบบ เนื่องจากการจัดเก็บรหัสที่มาของข้อมูล ตัวอย่างการจัดเก็บรหัสที่มาของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 12 บรรทัดที่ 17 และ 18

3) ขั้นตอนการจัดเก็บข้อมูล เป็นการนำข้อมูลจากทั้งสองระบบที่ผ่านการบูรณาการด้วยเงื่อนไขการตรวจสอบข้อมูลจากอัลกอริทึมในรูปที่ 11 มาจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูล กระบวนการการจัดเก็บข้อมูล สามารถเขียนเป็นอัลกอริทึม ดังแสดงในรูปที่ 12

ขั้นตอนการจัดเก็บตามอัลกอริทึมในรูปที่ 12 ดำเนินการโดยนำข้อมูลที่ผ่านการปรับแต่งและผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบข้อมูลมาจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูล โดยแยกการจัดเก็บออกเป็น 3 ส่วนตามเงื่อนไข ดังนี้

1) จัดเก็บข้อมูลที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 12 บรรทัดที่ 6 ถึงบรรทัดที่ 19 มีการเก็บรหัสที่มาของข้อมูลทั้งสองระบบ ส่งผลให้พบว่า มีการกรอกข้อมูลซ้ำซ้อนจากสองระบบ ดังนั้น ผู้พัฒนา

สามารถนำข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการใช้ระบบมาวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้งานระบบสารสนเทศ เพื่อสร้างความเข้าใจร่วมกันระหว่างผู้ใช้และระบบงาน

2) จัดเก็บข้อมูลจากระบบ KIMs ดังแสดงในรูปที่ 12 บรรทัดที่ 21 ถึง บรรทัดที่ 33

3) จัดเก็บข้อมูลจากระบบ WE ดังแสดงในรูปที่ 12 บรรทัดที่ 35 ถึง บรรทัดที่ 47

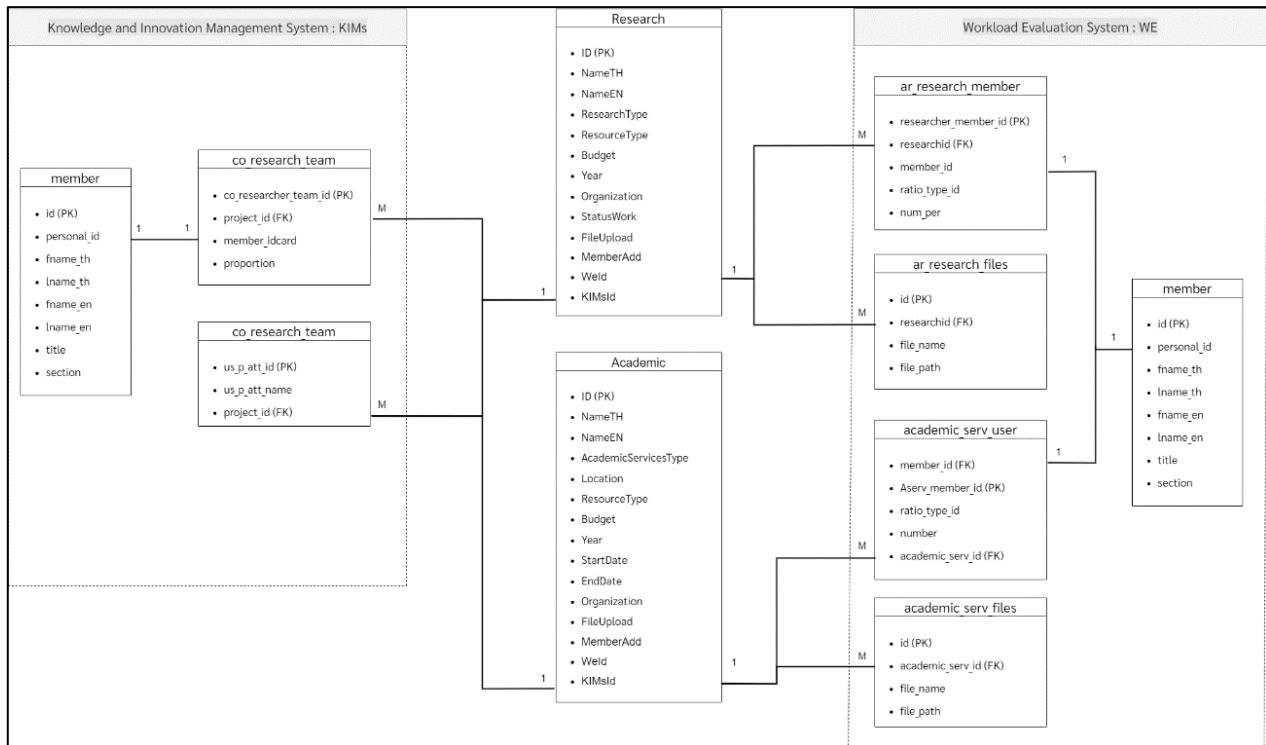
จากการดำเนินงานตามกระบวนการการจัดเก็บข้อมูล ส่งผลให้เกิดคลังข้อมูลด้านงานวิจัยและงานบริการวิชาการ ที่ถูกจัดเก็บอย่างเป็นระเบียบ สามารถนำไปสร้างระบบรายงานหรือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงสามารถลดระยะเวลาและขั้นตอนในการดำเนินงานด้านการนำเข้าข้อมูล

นอกจากนี้การบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการของ ETL ทำให้เกิดโครงสร้างข้อมูล (data structure) และคลังข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลด้านงานวิจัยและงานบริการวิชาการที่ ซึ่งชุดข้อมูลถูกจัดเก็บในลักษณะของข้อมูลแบบมีโครงสร้าง คือ ตารางงานวิจัย จำนวน 13 รายการ และตารางงานบริการวิชาการจำนวน 15 รายการ

```

Algorithm 6: ขั้นตอนการจัดเก็บ (Load)
1  Start (Load KIMs&WE)
2
3  Connection Manager - เลือกฐานข้อมูล และตารางที่ใช้สำหรับจัดเก็บ
4  Mappings
5
6  KIMs WE Mappings() {
7    WE title th, name th;
8    WE title en, name en;
9    WE Status Word id, status work;
10   WE Research type id, research type;
11   WE Resource type id, resource type;
12   WE Resource Detail, resource_detail;
13   WE Budget, budget;
14   WE Year, year;
15   WE Files, files upload;
16   WE Adding, member_add;
17   WE ID, weid;
18   KIMs ID, kimsid;
19 } // End of WE_KIMs Mappings
20
21 KIMs Mappings() {
22   KIMs_name th, name th;
23   KIMs_name en, name en;
24   KIMs Project Status status work;
25   KIMs Project Type Id, research type;
26   KIMs Source Name type id, resource type;
27   KIMs Project Agency, resource_detail;
28   KIMs Project Budget, budget;
29   KIMs Project Year, year;
30   KIMs Upload Files, files upload;
31   KIMs User Idcard, member_add;
32   KIMs ID, kimsid;
33 } // End of KIMs_Mappings
34
35 WE_Mappings() {
36   WE title th, name th;
37   WE title en, name en;
38   WE Status Word id, status work;
39   WE Research type id, research type;
40   WE Resource type id, resource type;
41   WE Resource Detail, resource_detail;
42   WE Budget, budget;
43   WE Year, year;
44   WE Files, files upload;
45   WE Adding, member_add;
46   WE ID, weid;
47 } // End of WE_Mappings
48
49 END (Load KIMs&WE)
  
```

รูปที่ 12: ขั้นตอนการจัดเก็บ (Load)



รูปที่ 13 : โครงสร้างคลังข้อมูล

4.1.3) วิเคราะห์ข้อมูลด้านการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล จากข้อมูลที่ถูกบันทึกโดยแบบบันทึกผลการบูรณาการข้อมูลเพื่อการพัฒนาคลังข้อมูล ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาอัตราการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล รายละเอียดการวิเคราะห์ผลการศึกษา สามารถแบ่งเป็นผลการศึกษา จำนวน 4 ส่วน คือ

4.1.3.1) ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล (Extract) จากข้อมูลหลัก (raw data) ดำเนินการบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการของ ETL เพื่อสร้างคลังข้อมูลจากฐานข้อมูลของสองระบบ จำนวน 8,505 รายการ ซึ่งแบ่งเป็นข้อมูลงานวิจัย จำนวน 5,490 รายการ และข้อมูลงานบริการวิชาการ จำนวน 3,015 รายการ ซึ่งข้อมูลทั้งหมดถูกใช้เป็นข้อมูลหลักในการทดลอง ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 : ตารางข้อมูลงานวิจัยจากสองระบบ

รายการ	KIMs	WE
ข้อมูล ระหว่าง 1 ก.ย. 63 – 1 มี.ค. 65	1,213	4,277
ข้อมูลซ้ำโดยการตรวจสอบ String Matching	119	1,262
ข้อมูลคงเหลือ	1,094	3,015
ร้อยละความซ้ำซ้อนของข้อมูล	9.81	29.51

ตารางที่ 7 : ตารางข้อมูลงานบริการวิชาการจากสองระบบ

รายการ	KIMs	WE
ข้อมูล ระหว่าง 1 ก.ย. 63 – 1 มี.ค. 65	66	2,949
ข้อมูลซ้ำโดยการตรวจสอบ String Matching	4	464
ข้อมูลคงเหลือ	62	2,485
ร้อยละความซ้ำซ้อนของข้อมูล	6.06	15.73

จากตารางที่ 6 และ 7 พบข้อมูลจากระบบ WE นั้นมีความซ้ำซ้อนมากกว่าระบบ KIMs เนื่องจากกระบวนการทำงานของสองระบบนั้นมีความแตกต่างกัน โดยระบบ WE นั้นจะสามารถนำเข้าข้อมูลแบบรายบุคคล โดยบุคลากรเจ้าของผลงาน หรือผู้ร่วมนั้นสามารถนำเข้าข้อมูลด้วยตนเองได้ ในขณะที่ระบบ KIMs จะสามารถนำเข้าข้อมูลงานวิจัยและบริการวิชาการภายในระบบได้ผ่านเจ้าของโครงการเท่านั้น อีกทั้งระบบ WE ทำการเก็บข้อมูลแบบรอบการประเมิน ซึ่งหากเกณฑ์การประเมินให้คะแนนในงานที่บุคลากรได้จัดทำสามารถใช้สำหรับเคลมผลงานได้มากกว่า 1 รอบการประเมิน บุคลากรหรือผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องจะดำเนินการกรอกข้อมูลชุดเดิมของรอบการประเมินที่ผ่านมาเข้าสู่ระบบอีกครั้ง เพื่อใช้สำหรับประเมินตนเองผ่านระบบออนไลน์ ในขณะที่ระบบ KIMs นั้นจะนำเข้าข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการเข้าสู่ระบบออนไลน์เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

4.1.3.2) ข้อมูลที่ลดลงจากขั้นตอนปรับแต่งข้อมูล (Transform) ดำเนินการปรับแต่งข้อมูลของสองระบบเข้าด้วยกันผ่านรูปแบบ Merge Join ใน 3 รูปแบบเพื่อหาวิธีในการเชื่อมโยงข้อมูลที่ดีที่สุดก่อนเข้าสู่กระบวนการสุดท้ายคือจัดเก็บ ดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 : ตารางเปรียบเทียบการเชื่อมข้อมูลงานวิจัย

รายการ	Marge Join		
	Inner	Left	Full
ข้อมูล (คงเหลือจาก KIMs + WE)	4,109	4,109	4,109
ข้อมูลที่ไม่นำไปบูรณาการ	4,076	3,015	33
ข้อมูลคงเหลือจากการบูรณาการ	33	1,094	4,076
ร้อยละของข้อมูลที่บูรณาการ	0.80	26.62	99.20

ตารางที่ 9 : ตารางเปรียบเทียบการเชื่อมข้อมูลงานบริการ

รายการ	Marge Join		
	Inner	Left	Full
ข้อมูล (คงเหลือจาก KIMs + WE)	2,547	2,547	2,547
ข้อมูลที่ไม่นำไปบูรณาการ	2,536	2,485	11
ข้อมูลคงเหลือจากการบูรณาการ	11	62	2,536
ร้อยละของข้อมูลที่บูรณาการ	0.43	2.43	99.57

จากตารางที่ 8 และ 9 การเชื่อมข้อมูลแบบ Inner Join เป็นการเชื่อมข้อมูลของทั้งสองระบบผ่านการตรวจสอบจากชื่องานภาษาไทยที่เหมือนกัน โดยงานวิจัยมีข้อมูลที่เหมือนกันจำนวน 33 แถว คิดเป็นร้อยละ 0.80 งานบริการวิชาการมีข้อมูลที่เหมือนกันจำนวน 11 แถว คิดเป็นร้อยละ 0.43 ในขณะที่การเชื่อมข้อมูลแบบ Full Join เป็นการนำข้อมูลทั้งหมดจากสองระบบมาเชื่อมโยงกัน พบข้อมูลงานวิจัยจำนวน 4,076 แถว คิดเป็นร้อยละ 99.20 และงานบริการวิชาการ จำนวน 2,536 แถว คิดเป็นร้อยละ 99.57 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกรูปแบบ Full Join มาใช้ในการบูรณาการข้อมูล

4.1.3.3) ข้อมูลที่ลดลงจากขั้นตอนการจัดเก็บข้อมูล นำข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการที่เชื่อมข้อมูลผ่านรูปแบบ Full Join มาเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขผ่าน เครื่องมือ Conditional Split เป็นการตรวจสอบข้อมูลที่เหมือนกันแตกต่างกันแต่สามารถบูรณาการได้ และไม่สามารถใช้บูรณาการได้ ผ่านการใช้เงื่อนไขจากชื่องานภาษาไทยในการตรวจสอบก่อนนำไปจัดเก็บยังคลังข้อมูล ดังรายละเอียดตารางที่ 10 และ 11

ตารางที่ 10 : ตารางตรวจสอบงานวิจัยเพื่อนำไปจัดเก็บ

รายการ	Conditional Split Data		
	Null	Match	Other
ข้อมูลที่ถูกรับรอง	4,076	4,076	4,076
ข้อมูลที่ไม่ถูกรับรอง	4,075	4,043	34
ข้อมูลที่ได้รับการรับรอง	1	33	4,042
ร้อยละของข้อมูลที่รับรอง	0.02	0.81	99.17

ตารางที่ 11 : ตารางตรวจสอบงานบริการวิชาการเพื่อนำไปจัดเก็บ

รายการ	Conditional Split Data		
	Null	Match	Other
ข้อมูลที่ถูกรับรอง	2,536	2,536	2,536
ข้อมูลที่ไม่ถูกรับรอง	2,536	2,525	11
ข้อมูลที่ได้รับการรับรอง	0	11	2,525
ร้อยละของข้อมูลที่รับรอง	0.00	0.43	99.57

จากตารางที่ 10 และ 11 การใช้เครื่องมือ Condition Split ในการแยกงานวิจัยและงานบริการวิชาการจากรูปแบบ Full Join เพื่อนำไปจัดเก็บไว้ยังคลังข้อมูลที่เตรียมไว้โดยในส่วนของงานวิจัย พบข้อมูลที่เป็นค่าว่างจำนวน 1 แถว คิดเป็นร้อยละ 0.02 งานวิจัยที่เหมือนกันจำนวน 33 แถว คิดเป็นร้อยละ 0.81 และงานวิจัยที่ไม่ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดจำนวน 4,042 แถว คิดเป็นร้อยละ 99.17 ในส่วนของงานบริการวิชาการ พบข้อมูลที่เหมือนกันจำนวน 11 แถว คิดเป็นร้อยละ 0.43 และงานบริการวิชาการไม่ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดจำนวน 2,525 คิดเป็นร้อยละ 99.57

4.1.3.4) สรุปผลข้อมูลที่ลดลงจากการพัฒนาล้างข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูลผ่านกระบวนการ ETL จากผลการศึกษาโครงสร้างข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของระบบ KIMs กับระบบ WE พบว่า

1. โครงสร้างข้อมูลงานวิจัยของทั้งสองระบบนั้นมีความสอดคล้องกัน ประกอบด้วย ชื่องานวิจัยภาษาไทย, ชื่องานวิจัยภาษาอังกฤษ, ประเภทงานวิจัย, ประเภทแหล่งทุน, จำนวนเงินทุน, ปีงบประมาณ, หน่วยงานเจ้าของโครงการ, สถานะการดำเนินงาน, เอกสารหลักฐานเพิ่มเติม, ผู้ร่วมงานวิจัย และร้อยละการมีส่วนร่วม

2. โครงสร้างข้อมูลงานบริการวิชาการของทั้งสองระบบมีโครงสร้างข้อมูลที่สอดคล้องกัน ประกอบด้วย ชื่องานบริการวิชาการภาษาไทย, ชื่องานบริการวิชาการภาษาอังกฤษ, ประเภทงานบริการวิชาการ, พื้นที่ดำเนินงาน, ประเภทแหล่งทุน,

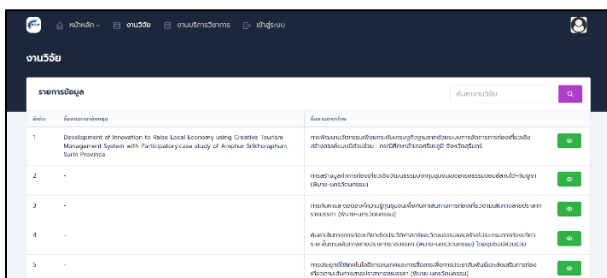
งบประมาณที่ได้รับ, งบประมาณ, วันเริ่มโครงการ, วันสิ้นสุดโครงการ, หน่วยงานเจ้าของโครงการ, เอกสารประกอบ, ผู้ร่วมงาน, และ ร้อยละการมีส่วนร่วม

3. อัตราการลดลงของข้อมูล จากการบูรณาการข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของระบบ KIMs กับระบบ WE ผ่านการบวนการ ETL พบว่า ข้อมูลงานวิจัยของสองระบบมีจำนวน 5,490 รายการ เมื่อดำเนินการข้อมูลผ่านการบูรณาการข้อมูลแล้วคงเหลืองานวิจัยจำนวน 4,109 รายการ สามารถลดข้อมูลซ้ำซ้อนได้จำนวน 1,381 รายการ คิดเป็นร้อยละ 74.84 ในขณะที่ข้อมูลงานบริการวิชาการของสองระบบมีจำนวน 3,015 รายการ ดำเนินการบูรณาการข้อมูลแล้วคงเหลืองานบริการวิชาการจำนวน 2,547 รายการ สามารถลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลได้จำนวน 468 รายการ คิดเป็นร้อยละ 84.47 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 12

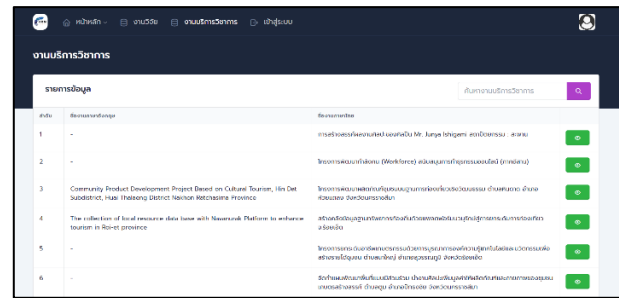
ตารางที่ 12 : ตารางเปรียบเทียบข้อมูลซ้ำซ้อน

รายการ	จำนวนข้อมูล			คิดเป็น
	ทั้งหมด	คงเหลือ	ซ้ำซ้อน	
งานวิจัย	5,490	4,109	1,381	74.84%
งานบริการวิชาการ	3,015	2,547	468	84.47%

4.1.4) พัฒนาระบบรายงานข้อมูลจากคลังข้อมูล การพัฒนาระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการที่ผ่านการประยุกต์ใช้เทคนิคการบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการ ETL ของระบบ KIMs กับระบบ WE ที่ถูกจัดเก็บไว้ในคลังข้อมูลเป็นขั้นตอนการทดสอบการใช้ประโยชน์ของข้อมูลจากคลังข้อมูลเพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการวิเคราะห์ข้อมูล ตัวอย่างระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ ดังแสดงในรูปที่ 14 ถึง 16



รูปที่ 14 : ตัวอย่างงานวิจัย



รูปที่ 15 : ตัวอย่างงานบริการวิชาการ



รูปที่ 16 : ตัวอย่างสรุปรายงานข้อมูล

จากการพัฒนาระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ ซึ่งเป็นการนำคลังข้อมูลมาใช้ประโยชน์ มีการทดสอบประสิทธิภาพการนำคลังข้อมูลไปใช้ประโยชน์ โดยแบ่งหัวข้อการประเมินออกเป็น 5 ด้าน ผ่านการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีจำนวน 3 ท่าน พบว่า อยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.89 ด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ด้านความถูกต้องในการทำงานของระบบ และด้านการสะดวกในการใช้งานระบบ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.93 มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับ 60 ดีมาก ด้านที่มีค่าเฉลี่ยต่ำสุด คือ ด้านการรักษาความปลอดภัย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.78 สามารถสรุปได้ว่า การนำมาใช้ประโยชน์ จากการบูรณาการข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของสองระบบนั้น มีประสิทธิภาพในระดับดีมาก ทั้ง 5 ด้าน ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 : ผลประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยี

รายการประเมิน	$\bar{x}$	SD	ระดับคุณภาพ
ด้านตรงตามความต้องการของผู้ใช้	4.87	0.35	ดีมาก
ด้านความถูกต้องของระบบ	4.93	0.26	ดีมาก
ด้านการสะดวกในการใช้งานระบบ	4.93	0.26	ดีมาก
ด้านความเร็วในการทำงาน	4.92	0.29	ดีมาก
ด้านการรักษาความปลอดภัย	4.78	0.44	ดีมาก
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	4.89	0.31	ดีมาก

4.2) ส่วนการอภิปรายผล

การอภิปรายผลการวิจัยมีการดำเนินงานศึกษางานวิจัยที่สอดคล้องกับผลการวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1) ผลวิจัยการพัฒนาคลังข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูลผ่านกระบวนการ ETL ส่งผลให้สามารถลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล สามารถลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบรายงาน ซึ่งประสิทธิภาพของกระบวนการ ETL ด้านการลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลและลดเวลาในการสร้างหรือเปลี่ยนฐานข้อมูลใหม่ มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [13], [14] นอกจากนี้ การพัฒนาคลังข้อมูลยังช่วยระยะเวลาในการดึงข้อมูล (data retrieval) จากชุดข้อมูลขนาดใหญ่ซึ่งมาจากแหล่งข้อมูลที่แตกต่างกัน [15]

4.2.2) ผลการนำคลังข้อมูล มาใช้ประโยชน์ด้วยงานวิจัยและงานบริการวิชาการที่ผ่านการบูรณาการจากสองระบบ ด้วยกระบวนการ ETL นำมาสู่การพัฒนาระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการนำไปนำไปวิเคราะห์ผล สามารถช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [10], [12] ซึ่งมีการดำเนินงานด้านการพัฒนาระบบรายงานข้อมูลเพื่อการเฝ้าสังเกตข้อมูล (data monitoring) และวิเคราะห์ข้อมูล

5) สรุปผล

จากการศึกษาโครงสร้างข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการของทั้งสองระบบ พบว่าทั้งสองระบบมีโครงสร้างข้อมูลที่สอดคล้องกัน โดยข้อมูลที่สอดคล้องกันประกอบด้วยข้อมูลงานวิจัย (งานวิจัย, ผู้ร่วมงานวิจัย, เอกสารประกอบ) และข้อมูลงานบริการวิชาการ (งานบริการวิชาการ, ผู้ร่วมงาน, และเอกสารประกอบ) ดังนั้น ข้อมูลของทั้ง 2 ระบบสามารถนำมาบูรณาการด้วยกระบวนการของ ETL โดยผลการบูรณาการข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการจากทั้ง 2 ระบบสามารถลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการของ ETL ช่วยลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลด้านงานวิจัยร้อยละ 74.84 และงานบริการวิชาการสามารถลดความซ้ำซ้อนร้อยละ 84.47 โดยงานวิจัยนี้ใช้หลักการในการเชื่อมโยงข้อมูลของสองระบบแบบร้อยละ 100 อาจส่งผลให้เกิดการบูรณาการที่ไม่ครบถ้วน เนื่องจากข้อมูลข้อผิดพลาดในการนำเข้าข้อมูล เช่น การใส่สระไม่ครบ การพิมพ์ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ พิมพ์เล็ก ที่มีลักษณะการพิมพ์แตกต่างกัน เป็นต้น

นอกจากนี้ การบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการของ ETL ยังสามารถสร้างคลังข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ ซึ่งคลังข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนาระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการ ทั้งนี้ ผลการประเมินระบบรายงานข้อมูลงานวิจัยและงานบริการวิชาการมีค่าระดับคะแนนประสิทธิภาพการทำงานของระบบในระดับดีมาก ($\bar{x} = 4.89$; S.D. = 0.31)

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีแสดงให้เห็นว่า ระบบรายงานงานวิจัยและงานบริการวิชาการที่ถูกพัฒนาจากการเรียกใช้ข้อมูลจากคลังข้อมูลที่ถูกสร้างจากการบูรณาการข้อมูลด้วยกระบวนการของ ETL มีความถูกต้อง ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ ดังนั้น ระบบรายงานดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการรายงานผลหรือใช้เป็นข้อมูลเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์และตัดสินใจของผู้บริหาร

6) ข้อเสนอแนะ

จากผลการพัฒนาคลังข้อมูลด้วยการบูรณาการข้อมูลแบบ ETL โดยแสดงให้เห็นถึงความซ้ำซ้อนของข้อมูล ร่วมกับคลังข้อมูลที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนาระบบรายงานที่เป็นประโยชน์ทั้งด้านการลดเวลาและช่วยสนับสนุนการตัดสินใจ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์เชิงนโยบายดังต่อไปนี้

1. หน่วยงานสามารถประกาศนโยบายการพัฒนาคลังข้อมูลและนำเข้าข้อมูลเฉพาะผ่านระบบกลางแต่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถดึงข้อมูลจากคลังข้อมูลไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อลดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานด้านข้อมูล รวมถึงลดความเสียหายจากการนำเข้าข้อมูลซ้ำซ้อน
2. หน่วยงานสามารถนำข้อมูลจากคลังข้อมูลที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้โดยมีการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลายไปใช้ในการเพิ่มศักยภาพการทำงานด้วยการต่อยอดการดำเนินงานในรูปแบบของข้อมูลขนาดใหญ่ (big data) หรือการนำปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) มาช่วยสกัดหาความรู้ที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น กลุ่มงานวิจัยหรืองานบริการวิชาการที่เป็นความเชี่ยวชาญของบุคลากรในมหาวิทยาลัย การค้นหางานวิจัยหรืองานบริการวิชาการ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยนี้มีการขยายผลและใช้ประโยชน์งานวิจัยจากโครงการวิจัยเรื่องเพิ่มศักยภาพการจัดการความรู้และนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากด้วยดิจิทัลแพลตฟอร์ม ซึ่งเป็นโครงการวิจัยที่ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2564

REFERENCES

- [1] ADPT. "DPT Explains – Data Integration: Data management that businesses in the digital age must know." (in Thai), ADPT.news. <https://www.adpt.news/2021/11/04/adpt-explains-data-integration> (accessed Feb. 19, 2024).
- [2] J. Awiti, A. A. Vaisman, and E. Zimanyi, "Design and implementation of ETL processes using BPMN and relational algebra," *Data Knowl. Eng.*, vol. 129, Sep. 2020, Art. no. 101837, doi: 10.1016/j.datak.2020.101837.
- [3] T. Thammanavasoros. "What is Data Integration?." (in Thai), MEDIUM.com. <https://totdatacom.medium.com/data-integration-คืออะไร-d51605639a86> (accessed Feb. 19, 2024).
- [4] J. Janruang *et al.*, "Adding Potential of knowledge management and innovation to local economic development through digital platform for Rajamangala University of Technology Isan," (in Thai), *EAU Heritage J. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 172–185, 2022.
- [5] J. Ronanaimuang, J. Janruang, and S. Karnka, "Applying data integration techniques for data of research load within Rajamangala University of Technology Isan," (in Thai), in *Proc. 13th Rajamangala Surin Nat. Conf.*, Surin, Thailand, Nov. 2022, pp. B582–B596.
- [6] K. Jetinai, "Semantic data integration of heterogeneous information systems using ontology mapping," (in Thai), *Inf. Technol. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 29–38, 2017.
- [7] P. Chaiyabud. "What is the difference between ETL and ELT? Why do modern data warehouses use ELT?." (in Thai), BLOG.DATATH.com. <https://blog.datath.com/etl-vs-elt> (accessed Apr. 25, 2024).
- [8] S. Dusadeeviroj. "Review ETL process." (in Thai), FUSIONSOL.com. <https://www.fusionsol.com/blog/review-etl-process/> (accessed Apr. 25, 2024).
- [9] N. Fatima. "What is data warehouse architecture." (in Thai), ASTERA.com. <https://astera.com/type/blog/data-warehouse-architecture> (accessed Apr. 26, 2024).
- [10] E. Sangiamkul and T. Panrungsri, "Development of decision support system in impact and severity from flood in Phuket," (in Thai), *Inf. Technol. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 60–70, 2019.
- [11] R. Sherman, "Data integration design and development," in *Business Intelligence Guidebook: From Data Integration to Analytics*. Boston, MA, USA: Elsevier, 2015, ch. 11, pp. 275–299.
- [12] M. Hendayun, E. Yulianto, J. F. Rusdi, A. Setiawan, and B. Ilman, "Extract transform load process in banking reporting system," *MethodsX*, vol. 8, 2021, Art. no. 101260, doi: 10.1016/j.mex.2021.101260.
- [13] J. Sreemathy, K. Naveen Durai, E. Lakshmi Priya, R. Deebika, K. Suganthi, and P. Aisshwarya, "Data integration and ETL: A theoretical perspective," in *Proc. 7th Int. Conf. Adv. Comput. and Commun. Syst. (ICACCS)*, Coimbatore, India, Mar. 2021, pp. 1655–1660.
- [14] D. Cho, M. Lee, and J. Shin, "Development of cost and schedule data integration algorithm based on big data technology," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 24, Dec. 2020, Art. no. 8917.
- [15] B. Silva, J. Moreira, and R. L. de C. Costa, "Logical big data integration and near real-time data analytics," *Data Knowl. Eng.*, vol. 146, Jul. 2023, Art. no. 102185, doi: 10.1016/j.datak.2023.102185.

Providing QoS for Multi-Class Traffic in IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window

Warakorn Srichavengsup¹ Kanticha Kittipeerachon^{2*}

^{1,2*}*Advanced Computation Systems Laboratory: ACS, Faculty of Engineering,
Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: kanticha@tni.ac.th

Received: 13 May 2024; Revised: 11 August 2024; Accepted: 14 August 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

This paper presents two Medium Access Control algorithms named Limiting Accessible Slots (LAS) and Splitting Accessible Slots (SAS), which enable the IEEE 802.11 distributed coordination function (DCF) with Constant Contention Window protocol to support traffic with different quality of service requirements. LAS algorithm restricts slot access to group 1 users while group 2 users can access all slots. While SAS algorithm restricts slot access to both groups of users. Each group of users can only access the slots allocated to them. There are no slots that are shared by both groups of users. From the results, we found that each group of users has different average delay time for accessing the channel, so these algorithms can be used to provide different Quality of Service (QoS) for multi-class traffic. In conclusion, appropriately setting the accessible slots for group 1 and group 2 users is crucial for achieving the desired QoS levels, highlighting the importance of tailoring these parameters to the specific user distribution.

Keywords: IEEE 802.11 DCF with constant contention window, Multi-class traffic, QoS



I. INTRODUCTION

Nowadays, wireless communication technology has developed greatly and can transmit data much faster than before, resulting in a large number of users in the system. When there are many users who want to send data simultaneously, there is a chance of data collisions. This causes the efficiency of data transmission to decrease. For this reason, there is a need for a protocol that can control access to the channel for data transmission. This protocol is named Medium Access Control (MAC) protocols. Examples of this protocol include TDMA [1], [2], FDMA [3], [4], and CDMA [5], [6]. These three types of protocols clearly divide the channel for each user according to the time, frequency, and code assigned to each user. This causes no data collisions to occur. However, if some users do not have data to send on the channels allocated to them, this results in wasted resources. Therefore, contention based protocols [7], [8] have been developed. Contention based protocols allow each user to compete for the use of the channel, thus being able to support a large number of users. Examples of this type of protocol include Pure ALOHA [9], Slotted-ALOHA [10], [11], and IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window [12]. The IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window protocol is different from Pure ALOHA and Slotted-ALOHA in that the IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window protocol uses a frame structure with a fixed number of slots. In Each frame, the user can choose only one slot to send data, preventing each user from sending data consecutively. This causes fairness in the use of each frame. However, the IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window protocol is not designed to support traffic with varying quality of service requirements. Each type of data requires different quality of service. For example, audio data is more sensitive and delay than general data. This leads to subpar performance for high-priority traffic because IEEE 802.11 DCF's current MAC algorithms are

unable to deliver differentiated QoS. The needs of various traffic kinds are not sufficiently satisfied by current techniques. Numerous strategies to improve QoS in wireless networks have been investigated in earlier research. For example, the traffic prioritization performance of EDCA has been well investigated, however it is not always effective in contexts with highly varied traffic kinds. Other strategies, including adjusting the dynamic contention window, have showed promise but still need to be improved for scalability and fairness reasons. For the above reasons, there is a need to develop channel access protocols for wireless communications that can support different service quality requirements.

This paper aims to improve the IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window protocol by presenting channel access algorithms named Limiting Accessible Slots (LAS) and Splitting Accessible Slots (SAS) to be able to support traffic with different quality of service requirements. The following questions are intended to be addressed by this study: For what user groups, what is the effect of the SAS and LAS algorithms on average delay times? Can these algorithms distinguish between QoS for multiple classes in an efficient manner?. Successfully addressing these challenges will not only enhance user experience in wireless networks but also pave the way for more reliable and efficient communication systems, which are crucial for the growth of IoT, smart cities, and other emerging technologies. To evaluate the effectiveness of the proposed algorithms, this study is based on simulation. Under diverse traffic scenarios, key parameter like average delay time will be monitored

The paper is presented in the following order: In section II, we describe the details of the Limited Accessible Slots (LAS) and Separation of Accessible Slots (SAS) algorithms. In section III, results and discussion

are presented. Finally, conclusions are presented in section IV.

II. PROPOSED ALGORITHMS

This paper presents 2 algorithms that can support traffic with different priority requirements, which are Limiting Accessible Slots (LAS) and Splitting Accessible Slots (SAS) algorithms. The details of all proposed algorithms are as follows.

A. Limiting Accessible Slots (LAS)

This algorithm restricts slot access to group 1 users, while group 2 users can access all slots. An example channel access of this algorithm is shown in Fig.1. In this example, user A is only group 1 user and the slot that user A can access is the first slot only. While the remaining 5 users, which are users B, C, D, E, F, can access all slots. From the figure, it can be seen that User A successfully accessed the channel from the first slot in the first frame. In this example, User A has a delay of 1 slot. While users B and C access the same slot in the first frame this causes a collision. Users B and C are unsuccessful in accessing the first frame. They then continue to access the channel in frame 2. It can be seen that user B successfully accesses slot 3 in frame 2. Therefore, user B has a delay of 8 (number of slots in the first frame) + 3 = 11 slots.

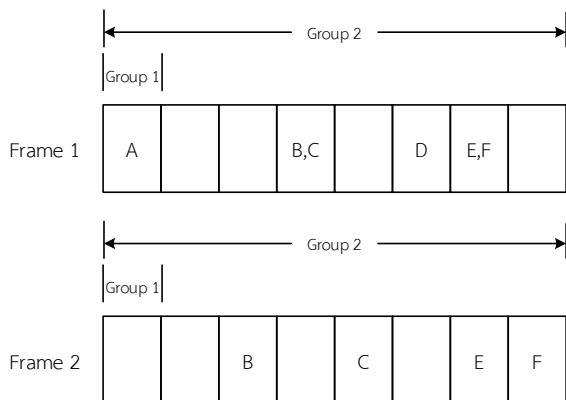


Figure 1: Collision resolution mechanism of LAS algorithm when both accessible slots and number of group 1 users are equal to 1.

In Fig. 2, users A and B are group 1 users, which can access the first 3 slots, while the remaining 4 users, which are C, D, E, F, are group 2 users and can access all slots. From the figure, we can see that each group of user has different channel access characteristics. As a result, each group of user has different average delay time in accessing the channel.

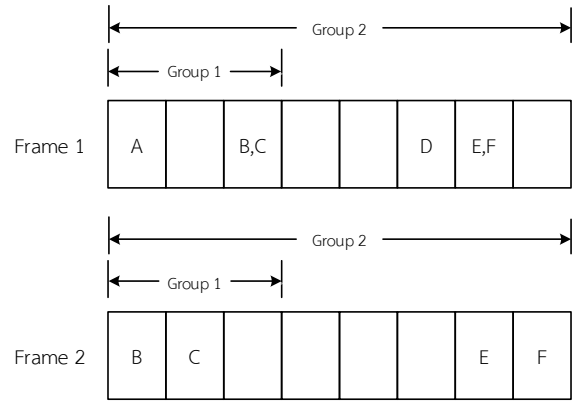


Figure 2: Collision resolution mechanism of LAS algorithm when accessible slots and number of group 1 users are equal to 3 and 2, respectively.

B. Splitting Accessible Slots (SAS)

The SAS algorithm allocates specific slots to each group of users, ensuring that no slots are shared between groups. An example of channel access using this algorithm is shown in Fig. 3. In this example, user A is only group 1 user and the slot that user A can access is the first slot only. Meanwhile, the remaining 5 users, namely users B, C, D, E, F can access the remaining slots later, which are slots 2 – 8. In Fig. 4, users A and B are group 1 users, which can access the first 3 slots, while the remaining 4 users, which are C, D, E, F, are group 2 users and can access the remaining slots later, which are slots 4 – 8. From the different characteristics of channel access, each group of user has different average delay time in accessing the channel.

LAS algorithm restricts slot access to group 1 users only, while group 2 users are able to access all slots.

By assigning unique slots to every group, the SAS method, in contrast, prevents shared access."

We can therefore apply these 2 proposed algorithms to systems that need to support traffic that requires different Quality of Service.

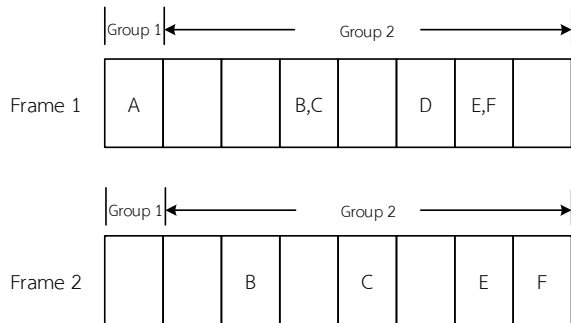


Figure 3: Collision resolution mechanism of SAS algorithm when both accessible slots and number of group 1 users are equal to 1.

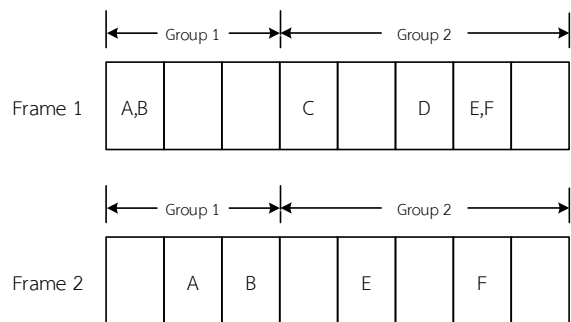


Figure 4: Collision resolution mechanism of SAS algorithm when accessible slots and number of group 1 users are equal to 3 and 2, respectively.

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we investigate the performance of the 2 proposed algorithms using MATLAB. This study is predicated on the use of a set number of users and unchanging traffic patterns. The details of the investigation are as follows.

A. Performance of Limiting Accessible Slots (LAS)

We set the total number of slots and the total number of users to be equal to 8. Users are divided into 2 groups. Group 1 users access the first few slots. While group 2 users can access all slots.

As seen in Fig. 5, when the accessible slots of group 1 users are equal to 1 and the number of users in group 1 and group 2 are equal to 1 and 7, respectively. The average delay time of group 1 users is below than the average delay time of group 2 users. The reason why the performance of group 1 users is better than group 2 users is because group 1 user has only one user and this user has access only to the first slot. Meanwhile, there are 7 users in group 2, and these 7 users have access to slots 1 to 8, giving group 1 user a chance to succeed before group 2 users. It can be noticed that the average delay time of group 1 users increases with accessible slot of group 1 users because the more accessible slot of group 1 users is, the greater the chance that group 1 users will be successful in later slots. When accessible slot of group 1 users is equal to 8, the average delay time of group 1 users and group 2 users are the same. Because in this situation group 1 users and group 2 users can access all slots. Therefore, there are no differences between the two groups of users.

When increasing the number of users of group 1 users to 2, 4, 6, and 7 respectively while maintaining the total number of users equal to 8 users, as shown in Figs. 6-9. It is found that the average delay time of group 1 users is low while the accessible slot of group 1 users is high. This is because when the accessible slots of group 1 users increase, it can help reduce the chance of collisions among group 1 users. Moreover, the average delay time of group 1 users and group 2 users are the same when the accessible slot of group 1 users is equal to 8. As described earlier, in this scenario there is no difference between two groups of users.

It will be noted that some values of average delay time of group 1 and group 2 users are not displayed, such as when setting accessible slot of group 1 users to be equal to 1 and setting the number of group 1 users to be equal to 2. This is because in this situation 2 users

select the first slot. This definitely causes collisions and will continue to collide every frame, making the average delay time of group 1 users equal to infinity. This value is therefore not plotted on the graph.

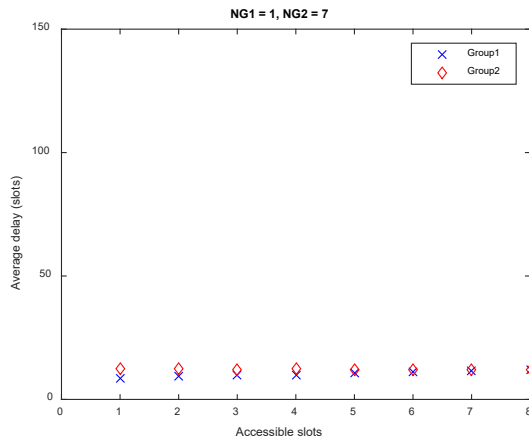


Figure 5: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the LAS algorithm when NG1=1, NG2=7.

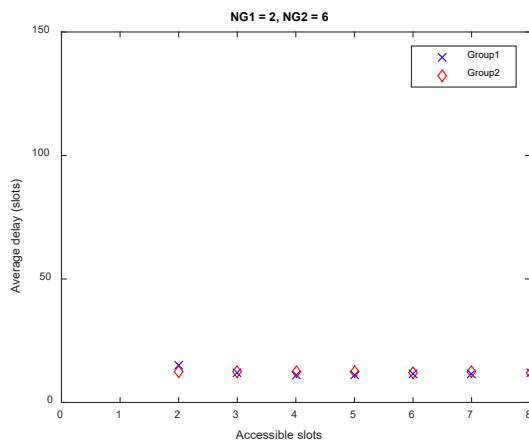


Figure 6: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the LAS algorithm when NG1=2, NG2=6.

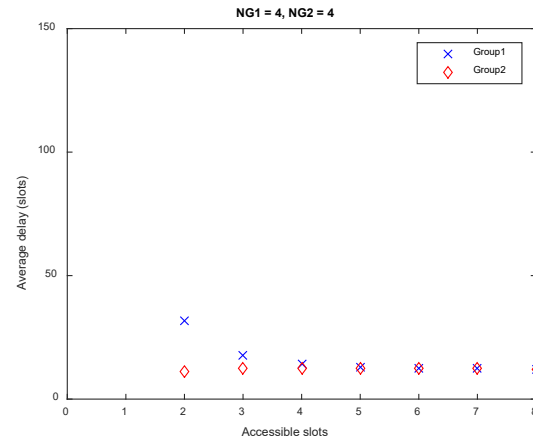


Figure 7: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the LAS algorithm when NG1=4, NG2=4.

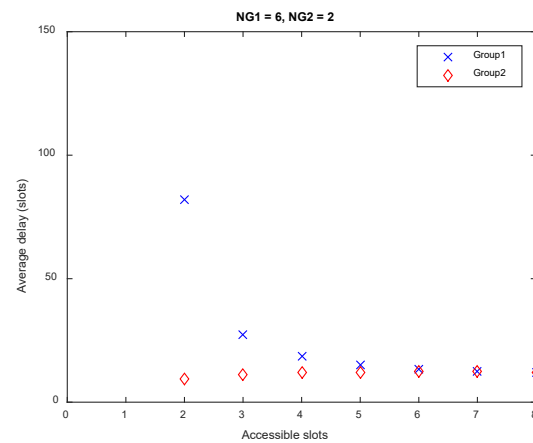


Figure 8: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the LAS algorithm when NG1=6, NG2=2.

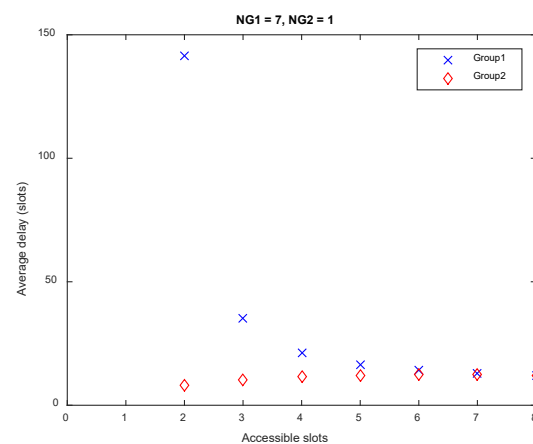


Figure 9: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the LAS algorithm when NG1=7, NG2=1.

To determine how many times the average delay time is different between group 1 users and group 2 users. Ratio value is defined by setting this value to be equal to the ratio of the average delay time of group 2 users divided by the average delay time of group 1 users. If the Ratio value is greater than 1, it means that group 2 users spend more time on average than group 1 users, that is, group 1 users have better service quality than group 2 users. On the other hand, if the Ratio value is less than 1, it means that group 2 users spend less time on average than group 1 users, that is, group 2 users have better service quality than group 1 users. To understand clearly, let's give an example as follows. If the Ratio value is equal to 1.4, it means that in accessing the channel, group 2 users take more time on average than group 1 users, with an average delay time equal to 1.4 times that of group 1 users.

When considering Fig.10, it can be found that when group 1 users is equal to 1, the Ratio value will be greater than 1 at low accessible slot of group 1 users. That is, in this situation, group 1 users have a chance of being successful in accessing the channel. higher than group 2 users. When the number of accessible slots of group 1 users is equal to 8, the Ratio value is equal to 1, that is, both groups of users have the same chance of success in accessing the channel. When the number of group 1 users is equal to 2, the Ratio value is lower than 1 at the accessible slot of group 1 users equal to 2. This is because there are only 2 slots for group 1 users and in these 2 slots group 2 users can compete with group 1 users. While 6 group 2 users can access any of the 8 slots, the last 6 slots are competition among group 2 users, making group 1 users' chances of success in using the channel lower than group 2 users. However, when the number of group 1 users is greater than 2, the Ratio tends to increase to more than 1 because group 1 users have more slots that can be accessed. This causes collisions between group 1 users

to decrease and results in better channel access performance for group 1 users.

When the number of group 1 users is greater than 2, the Ratio value is lower than 1 at low accessible slot of group 1 users. This is because there are a large number of group 1 users, while the number of slots that group 1 users can access is limited. While the number of group 2 users is decreasing and group 2 users can access all slots. As a result, group 2 users have a higher chance of success in accessing the channel than group 1 users, resulting in the Ratio being lower than 1.

In addition, when increasing the number of accessible slots of group 1, the Ratio value increases. Because increasing the number of accessible slots of group 1 can reduce the chance of collisions among group 1 users and cause the average delay time of group 1 users to be lower. When the number of accessible slots of group 1 users is equal to 8, the Ratio value is equal to 1. It is found that the Ratio values in Fig. 10 are mostly lower than 1, so we plot the Inverse ratio, which is equal to the average delay time of group 1 users divided by the average delay time of group 2 users. As shown in Fig. 11, it is found that most of the Inverse Ratio values are greater than 1. That is, in many situations group 2 users have better performance than group 1 users.

From Fig. 10, it can be found that the accessible slot of group 1 users and the number of group 1 users affect the system performance. In some cases, it is found that group 1 users have better service quality than group 2 users. While in other cases, group 2 users have better service quality than group 1 users. We can apply this algorithm to traffic that requires different quality of service requires adjusting the accessible slot of group 1 users value to suit the number of group 1 users, number of group 2 users, and the desired Ratio value. According to the findings, as compared to the DCF

protocol's baseline, the LAS algorithm dramatically lowers the average delay time for high-priority traffic.

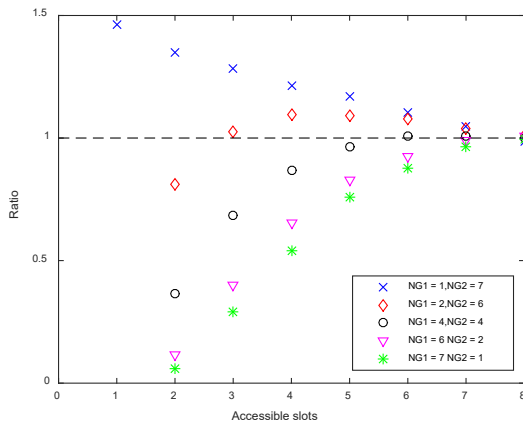


Figure 10: The Ratio vs the number of accessible slot of group 1 users for the LAS algorithm for various number of group 1 users and group 2 users.

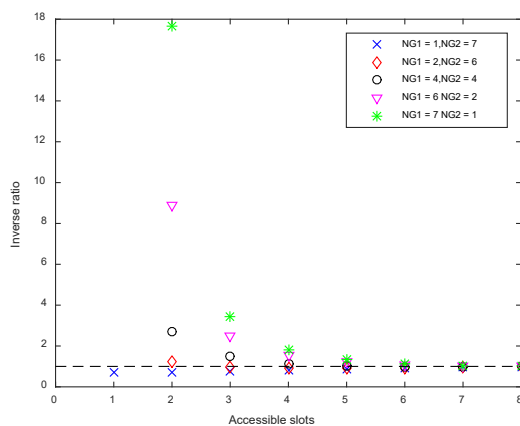


Figure 11: The Inverse ratio vs the number of accessible slot of group 1 users for the LAS algorithm for various number of group 1 users and group 2 users.

B. Performance of Splitting Accessible Slots (SAS)

Here, we set the number of slots and the total number of users to be equal to 8. Users are divided into 2 groups, with group 1 users accessing the early slots while group 2 users accessing the remaining later slots.

As can be seen in Fig. 12, when the accessible slot of group 1 users is equal to 1 and the number of group 1 users and group 2 users are equal to 1 and 7,

respectively, the average delay time of group 1 users is below than the average delay time of group 2 users. The reason why the performance of group 1 users is better than group 2 users is because there is only one user in group 1 users and this user only accesses the first slot, making him definitely successful in accessing the slot. While group 2 users access the remaining slots in the latter, causing group 1 users succeed before group 2 users.

It is found that the average delay time of group 2 users increased with accessible slot of group 1 users and become very high when accessible slot of group 1 users is large. For example, where the accessible slots of group 1 users are equal to 6. Because in this situation, group 2 users have only 2 slots left to access, which are slots 7 and 8, but there are up to 7 group 2 users, causing a high chance of collisions.

When increasing the number of users of group 1 users to 2, 4, 6, and 7 respectively while maintaining the total number of users equal to 8 users, as shown in Figs. 13-16. It can be noticed that the average delay time of group 1 users is high at low accessible slot of group 1 users. This is because when the number of group 1 users is high while the accessible slot of group 1 users is low, there will be a higher chance of collisions between group 1 users. When increasing the accessible slot of group 1 users, it is found that the average delay time of group 1 users decreased because increasing the number of slots accessible to group 1 users can reduce the chance of collisions between group 1 users.

While the average delay time of group 2 users increases with accessible slot of group 1 users because when increasing the accessible slot of group 1 users, group 2 users are left with only fewer slots to access. Therefore, there is a higher chance of collision between group 2 users, causing the average delay time of group 2 users to increase accordingly.

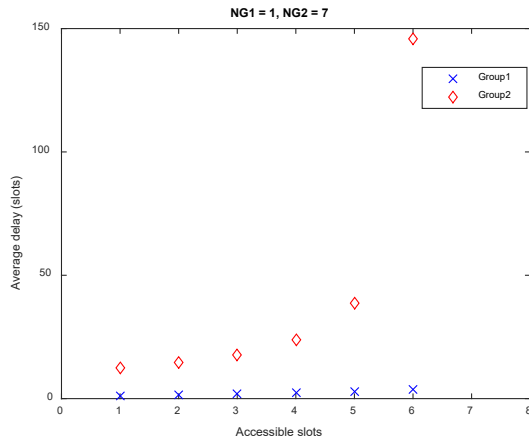


Figure 12: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the SAS algorithm when NG1=1, NG2=7.

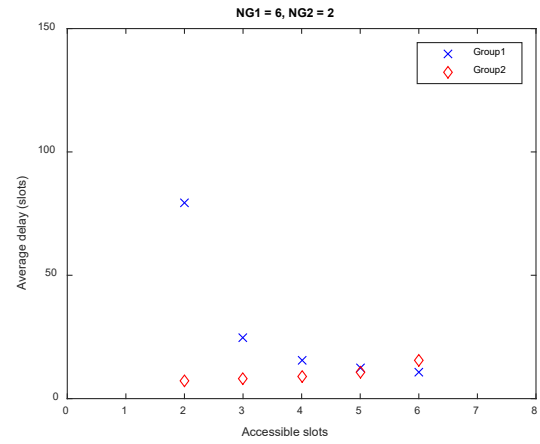


Figure 15: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the SAS algorithm when NG1=6, NG2=2.

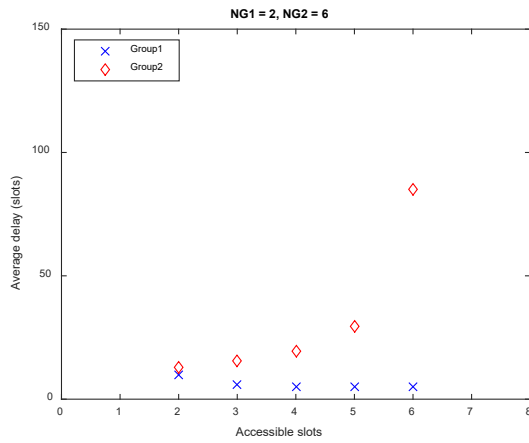


Figure 13: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the SAS algorithm when NG1=2, NG2=6.

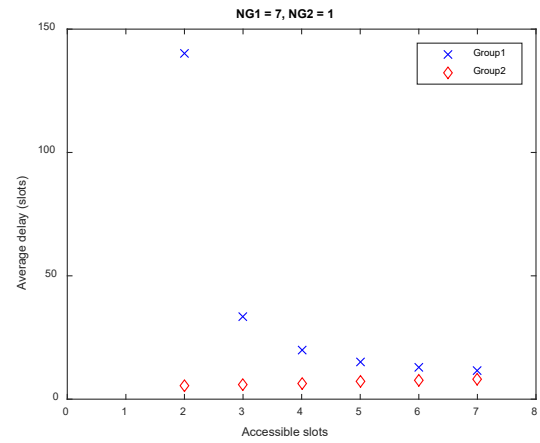


Figure 16: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the SAS algorithm when NG1=7, NG2=1.

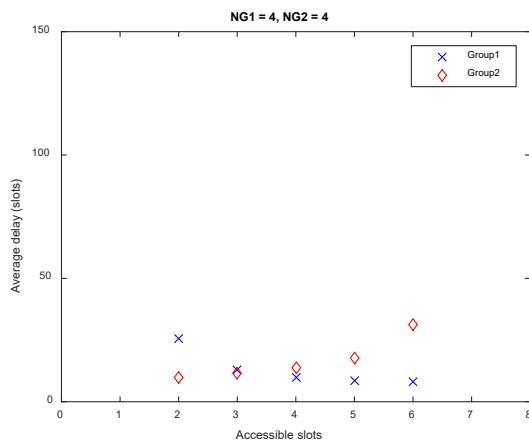


Figure 14: Average delay time vs the number of accessible slot of group 1 users for the SAS algorithm when NG1=4, NG2=4.

We see an increase in delay for low-priority traffic using the SAS algorithm in certain scenarios. This is related to high traffic condition. When considering the Ratio value, which is the ratio of the average delay time of users in group 2 to the average delay time of users in group 1, as shown in Fig. 17. It is found that when group 1 users is equal to 1, the Ratio value is greater than 1 because there is only one group 1 user and this user has definitely successfully accessed the slot. Meanwhile, the second group of 7 users must compete for access to the remaining slots. As a results, the average delay time of group 2 users is higher than the average delay time of group 1 users.

When the number of group 1 users is 2, 4, 6, and 7, the Ratio value is higher than 1 when the accessible slot of group 1 users value is higher than or equal to the number of group 1 users. Because in this case the number of slots is sufficient compared to the number of group 1 users, there is little chance of collision. Increasing accessible slot of group 1 users will cause group 2 users to have fewer accessible slots later. This causes a high chance of collision. As a result, the average delay time of group 2 users is higher than the average delay time of group 1 users.

In addition, it can be observed that the Ratio value is lower than 1 when the accessible slot of group 1 users is less than the number of group 1 users. Because in this case the number of slots is too small compared to the number of group 1 users, there is a high chance of collision. When accessible slots of group 1 users are small, this means that group 2 users have more accessible slots. This reduces the chance of a collision between group 2 users. As a result, the average delay time of group 2 users is lower than the average delay time of group 1 users and causes the Ratio to be lower than 1.

It is found that some Ratio values in Fig. 17 are lower than 1, so we plot the Inverse ratio, which is equal to the ratio of the average delay time of group 1 users divided by the average delay time of group 2 users. 2 As shown in Fig. 18, some Inverse ratio values are greater than 1. That is, in some situations, group 2 users have better performance than group 1 users, such as when the number of group 1 users is greater than the accessible slot of group 1 users. We can apply this algorithm to traffic that requires different quality of service by adjusting the accessible slot of group 1 users to suit the number of group 1 users, number of group 2 users and the desired Ratio value.

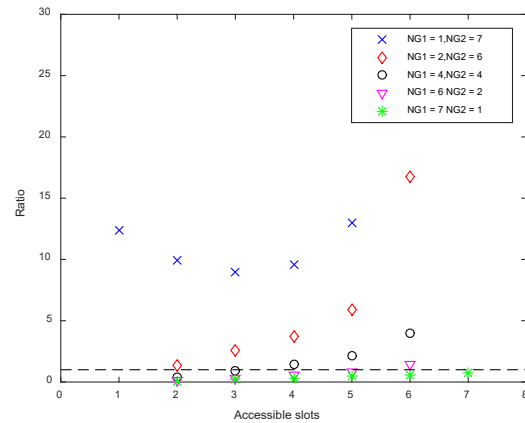


Figure 17: The Ratio vs the number of accessible slot of group 1 users for the SAS algorithm for various number of group 1 users and group 2 users.

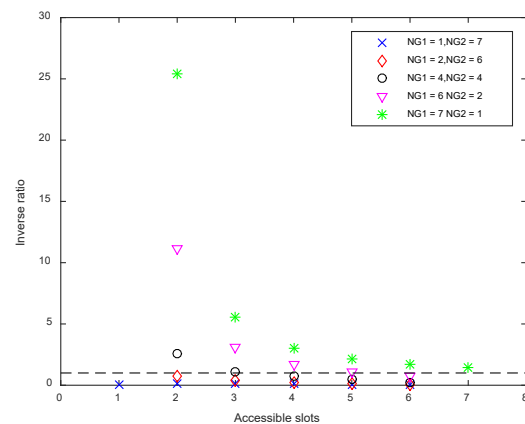


Figure 18: The Inverse ratio vs the number of accessible slot of group 1 users for the SAS algorithm for various number of group 1 users and group 2 users.

IV. CONCLUSION

In this paper, we present 2 new algorithms, LAS and SAS algorithms. The proposed algorithms are derived from IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window. LAS algorithm restricts slot access to group 1 users while group 2 users can access all slots. While SAS algorithm restricts slot access to both groups of users. Each group of users can only access the slots allocated to them. There are no slots that are shared by both groups of users. Our results indicate that each user group experiences distinct average delay times for

channel access, demonstrating that these algorithms can effectively differentiate QoS for multi-class traffic.

It can be concluded that the accessible slot of group 1 users and group 2 users are the important parameters that must be set appropriately according to the number of group 1 users and the number of group 2 users to achieve the desired level of QoS. To prioritize traffic and enhance user experience generally, network operators can apply the LAS and SAS algorithms in a variety of settings, including public Wi-Fi networks. These algorithms can also be included into Internet of Things frameworks to guarantee that vital applications receive data in a timely manner. The use of static traffic patterns in the simulations is one of the study's limitations. To properly represent real-world settings, dynamic traffic scenarios and mobility should be included in future studies.

ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank Thai-Nichi Institute of Technology for financial support of this work.

REFERENCES

- [1] T. Zhang and Q. Zhu, "EVC-TDMA: An enhanced TDMA based cooperative MAC protocol for vehicular networks," *J. Commun. Netw.*, vol. 22, no. 4, pp. 316–325, Aug. 2020.
- [2] S. Li, Y. Liu, and J. Wang, "An efficient broadcast scheme for safety-related services in distributed TDMA-based VANETs," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 8, pp. 1432–1436, Aug. 2019.
- [3] M. Marey and H. Mostafa, "Code-aided modulation classification algorithm for multiuser uplink SC-FDMA systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. 1023–1027, May 2021.
- [4] A. Kumar, S. Dwivedi, and A. K. Jagannatham, "GLRT based spectrum sensing for MIMO SC-FDMA cognitive radio networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 4, no. 6, pp. 593–596, Dec. 2015.
- [5] L. Zhang and Y. Sun, "The optimal assignment of orthogonal polyphase sequences in CDMA Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 109–112, Jan. 2018.
- [6] M. M. Farag and K. E. Ahmed, "Aggregated CDMA crossbar with hybrid ARQ for NoCs," *IEEE Access*, vol. 10, no. 1, pp. 28206–28218, Mar. 2022.
- [7] Y. Wu, D. Wu, C. Yue, and Y. Yang, "Joint reservation and contention-based access for URLLC-enabled D2D communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 1, pp. 212–216, Jan. 2022.
- [8] B. Singh, O. Tirkkonen, Z. Li, and M. A. Uusitalo, "Contention-based access for ultra-reliable low latency uplink transmissions," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 2, pp. 182–185, Apr. 2018.
- [9] J. B. Seo and H. Jin, "Optimally controlled pure aloha systems for wireless sensor networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 11, pp. 2460–2463, Nov. 2017.
- [10] Y. Zhang, F. Guan, Y. H. Lo, F. Shu, and J. Li, "Optimal multichannel slotted ALOHA for deadline-constrained unicast systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 1308–1311, Jun. 2019.
- [11] X. Shao, Z. Sun, M. Yang, S. Gu, and Q. Guo, "NOMA-based irregular repetition slotted ALOHA for satellite networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 624–627, Apr. 2019.
- [12] R. Wang, J. Zhang, and X. Zou, "Performance analysis and optimization of IEEE 802.11 DCF with constant contention window," in *Proc. ISECS Int. Colloq. Comput. Commun. Control and Manage.*, Guangzhou, China, Aug. 2008, pp. 407–411.

ระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษา ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร

ณัฐดนัย กองขุนทด^{1*} ประสงค์ ปราณีตพลกรัง² พายัพ ศิรินาม³

^{1*,2,3}หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สำนักบัณฑิตศึกษา

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : natdanai_k@rtaf.mi.th

รับต้นฉบับ : 13 เมษายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 12 พฤษภาคม 2567; ตอบรับบทความ : 28 พฤษภาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ภายในองค์กร โดยใช้ RapidMiner Studio ในการวิเคราะห์ข้อมูลการบุกรุก ด้วยอัลกอริทึม 4 แบบ ได้แก่ Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest และ Gradient Boosted Trees ซึ่งใช้งานร่วมกับชุดข้อมูลการบุกรุกทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ เพื่อทำการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึม โดยใช้การประเมินประสิทธิภาพจากค่าความแม่นยำ และค่าความเที่ยง จากนั้นนำผลการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึมที่ดีที่สุดจาก 4 แบบ มาเพียงสองอันดับแรกไปสร้างเป็นอัลกอริทึมใหม่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม ต่อมาจะทำการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึม ทั้งนี้ ได้ทำการวัดค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยง สุดท้ายแล้วจึงนำอัลกอริทึมที่ผ่านการประเมินประสิทธิภาพสูงสุดไปสร้างเป็นระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง ผลการวิจัยพบว่า ระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร ที่ดำเนินการตามกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ร่วมกับการสร้างระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่มด้วยอัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ที่ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Naïve Bayes โดยใช้เทคนิค Stacking นั้น สามารถให้ผลการทำนาย มีค่าความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 99.77 และค่าความเที่ยงเท่ากับร้อยละ 88.59

คำสำคัญ : การรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ การบุกรุกทางไซเบอร์ การเรียนรู้ของเครื่อง



Real-time Intrusion Detection System Using Machine Learning for Enhanced and Efficient Cybersecurity in Organizations

Natdanai Kongkhunthod^{1*} Prasong Praneetpolgrang² Payap Sirinam³

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

*Corresponding Author. E-mail address: natdanai_k@rtaf.mi.th

Received: 13 April 2024; Revised: 12 May 2024; Accepted: 28 May 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

The purpose of this research is to create a real-time cyber intrusion detection system using machine learning to strengthen and enhance cybersecurity within organizations. RapidMiner Studio was used to analyze intrusion data with 4 algorithms: Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest, and Gradient Boosted Trees. The algorithms were evaluated and compared using the Royal Air Force Cyber Intrusion Detection Dataset (RTAF Dataset) to determine their accuracy based on precision and recall values. The top 2 from 4 performing algorithms were then combined using ensemble machine learning techniques. The resulting algorithm was evaluated and compared based on precision and recall values. The algorithm with the highest performance was then used to create a real-time cyber intrusion detection system using machine learning. The results showed that the real-time cyber intrusion detection system using machine learning for strengthening and enhancing cybersecurity in organizations, developed using a software development process combined with ensemble machine learning-based real-time cyber intrusion detection using the Gradient Boosted Trees algorithm in conjunction with the Naïve Bayes algorithm using the Stacking technique, can provide prediction results with an accuracy of 99.77% and a precision of 88.59%.

Keywords: Cybersecurity, Cyber intrusion, Machine learning

1) บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีดิจิทัลได้มีบทบาทที่สำคัญเป็นอย่างมากต่อการพลิกฟื้น ปรับปรุงและพัฒนายกระดับประสิทธิภาพการทำงานขององค์กรหรือหน่วยงาน อีกทั้ง เทคโนโลยีดิจิทัลที่อุบัติใหม่มีการพัฒนาก้าวหน้าอย่างรวดเร็วจนเป็นเทคโนโลยีที่ล้ำสมัย ในขณะเดียวกัน โลกต้องเผชิญกับความเสี่ยงทางดิจิทัลในรูปแบบใหม่ ๆ นั่นคือ ภัยคุกคามทางดิจิทัลหรือไซเบอร์ เช่น มัลแวร์ (malware) และการหลอกลวงทางไซเบอร์ หากแต่ภัยคุกคามดังกล่าวได้พัฒนาศักยภาพของตัวเองให้มีการโจมตีที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ความมั่นคงทางเศรษฐกิจ และความมั่นคงของชาติ ในระดับที่มาก

อย่างไรก็ตาม องค์กรต่าง ๆ ได้ตอบสนองต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่เกิดขึ้นค่อนข้างล่าช้าอันเนื่องมาจากการขาดเทคโนโลยี และทักษะในการรับมือกับภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่เหมาะสม ดังนั้น การเตรียมความพร้อมในการรับมือต่อผลกระทบที่จะเกิดขึ้นภายหลังการถูกโจมตีทางไซเบอร์ รวมทั้งการสร้างความรู้ความตระหนักรู้ทางไซเบอร์ให้กับบุคลากรในองค์กร จึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง

สำนักงานคณะกรรมการการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์แห่งชาติ (สกมช.) เป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่เกี่ยวกับการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในประเทศไทย ได้ระบุอย่างชัดเจนจากข้อมูลสถิติและสถานการณ์ทางไซเบอร์ของไทยในปี พ.ศ. 2565 ที่ผ่านมามีพบว่า หน่วยงานภาครัฐถูกโจมตีมากที่สุด รองลงมาคือหน่วยงานเอกชน ทั้งนี้ การโจมตีดังกล่าวได้ส่งผลกระทบไปถึงความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล และความมั่นคงของประชาชนในประเทศ อีกทั้ง จากสถิติดังกล่าว ยังพบว่าปัญหาหลักในด้านช่องโหว่ของการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ (malicious code) มาเป็นอันดับ 1 ของช่องทางการโจมตี คิดเป็นร้อยละ 54 ของการโจมตีทั้งหมด ในขณะที่ภัยคุกคามในรูปแบบของช่องโหว่โปรแกรม (vulnerability) ตามมาเป็นอันดับ 2 คิดเป็นร้อยละ 24 และความพยายามบุกรุก (intrusion attempts) คิดเป็นร้อยละ 11 ตามลำดับ [1]

กองทัพอากาศ เป็นหน่วยงานของภาครัฐที่มีบทบาทสำคัญในการรักษาความมั่นคงและพัฒนาประเทศ ดังจะเห็นได้จากนโยบายกองทัพอากาศดิจิทัลที่ได้ดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558 อนึ่ง ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) ยังได้กล่าวถึงภัยคุกคามในมิติไซเบอร์ (cyber domain) และให้ความสำคัญกับการป้องกันระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร รวมทั้งระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ของกองทัพอากาศ ที่อาจตกเป็น

เป้าหมายการโจมตีทางไซเบอร์ในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ การเจาะระบบคอมพิวเตอร์ (hacking) การสอดแนมข้อมูลคอมพิวเตอร์ (spyware) การดักจับข้อมูลคอมพิวเตอร์ (sniffing) และการโจมตีที่ปฏิเสธการให้บริการ (Denial of Service: DoS) [2] เป็นต้น ซึ่งเป็นการโจมตีเพื่อขโมยข้อมูล ดัดแปลง ใช้ประโยชน์ข้อมูลหรือเพื่อขู่กรโชกทรัพย์ รวมทั้งเพื่อควบคุมการทำงานของโครงสร้างพื้นฐานสำคัญ

เมื่อพิจารณาถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อกองทัพอากาศ โดยเฉพาะต้องเผชิญหน้ากับการโจมตีทางไซเบอร์แล้ว การพัฒนาระบบป้องกันภัยคุกคามทางไซเบอร์ด้วยปัญญาประดิษฐ์และเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องผ่านโปรแกรม RapidMiner Studio จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในการป้องกันและตอบสนองต่อการโจมตีทางไซเบอร์ ทั้งนี้ จะทำให้เรามั่นใจได้ว่ากองทัพอากาศสามารถเปลี่ยนผ่านไปสู่การเป็นกองทัพอากาศดิจิทัลที่สามารถและความปลอดภัยจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อทำการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ ที่ใช้โปรแกรม RapidMiner Studio ซึ่งเป็นการออกแบบและควบคุมการทำงานของระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ให้เป็นอัตโนมัติ

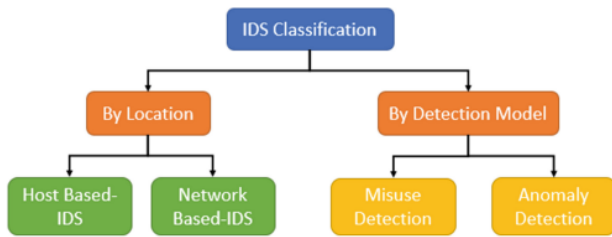
2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อสร้างระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร

3) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1) ระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ (Intrusion Detection Systems: IDS)

เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อตรวจจับและแจ้งเตือนเมื่อมีการพยายามบุกรุกในเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เป้าหมายหลักของ IDS คือการปกป้องข้อมูลและทรัพยากรทางไซเบอร์ [3]–[6] ลักษณะการทำงานของระบบคือการตรวจสอบและวิเคราะห์กิจกรรมต่าง ๆ ในเครือข่ายเพื่อระบุพฤติกรรมที่ไม่ปกติ ซึ่งอาจรวมถึงการพยายามบุกรุกการโจมตีทางไซเบอร์หรือการกระทำที่ผิดปกติอื่น ๆ ระบบ IDS มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีวิธีการทำงานที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : ประเภทของ Intrusion Detection Systems [7]

จากรูปที่ 1 อธิบายประเภทและคุณสมบัติของระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ (IDS) ดังนี้

3.1.1) ระบบตรวจจับการบุกรุกแบบระบุลักษณะ (Signature-Based IDS) เป็นการเปรียบเทียบเหตุการณ์ที่เข้ามาในเครือข่ายกับเหตุการณ์ที่เป็นการบุกรุกซึ่งจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบแล้วตรงกันแสดงว่าเป็นเหตุการณ์บุกรุก

3.1.2) ระบบตรวจจับการบุกรุกแบบระบุเหตุการณ์ผิดปกติ (Anomaly-Based IDS) เป็นการเปรียบเทียบเหตุการณ์ที่เข้ามาในเครือข่ายกับเหตุการณ์ที่ปกติซึ่งจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล หากเปรียบเทียบแล้วไม่ตรงกันแสดงว่าเหตุการณ์นั้นเป็นการบุกรุก

3.1.3) ระบบตรวจจับการบุกรุกแบบระบุการบุกรุกบนเครือข่าย (Network-Based IDS) ระบบจะทำงานในเครือข่ายการติดตามตรวจสอบสัญญาณจราจรที่อยู่ในรูปของแพ็กเก็ตข้อมูลเพื่อตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตใดมีลักษณะที่ผิดปกติ

3.1.4) ระบบตรวจจับการบุกรุกบนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Host-based IDSs) ระบบจะตรวจสอบสัญญาณจราจรที่อยู่ในรูปของแพ็กเก็ตข้อมูลและตรวจสอบการใช้งานโปรแกรมประยุกต์ในเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายจากแฟ้มลงบันทึกเข้าออกเพื่อตรวจสอบว่าแพ็กเก็ตใดมีลักษณะที่ผิดปกติ

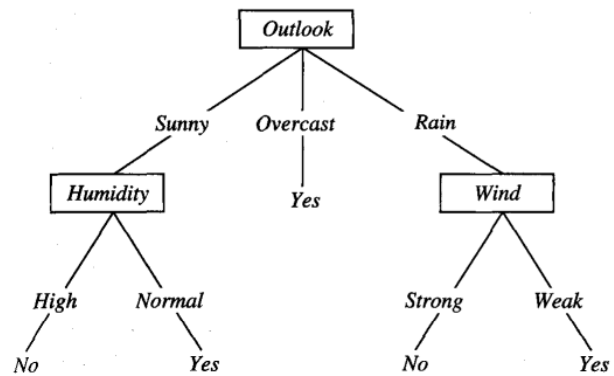
3.2) เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการบุกรุกทางไซเบอร์

โปรแกรม RapidMiner Studio เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์เชิงคาดการณ์และการทำเหมืองข้อมูล [8] มีความสามารถในการจัดการข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ และสร้างอัลกอริทึมในรูปแบบตามที่กำหนด รวมถึงการแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพได้

3.3) อัลกอริทึมที่ใช้จำแนกภัยคุกคามทางไซเบอร์

3.3.1) อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้ระบุประเภทภัยคุกคามทางไซเบอร์ (classification) และการถดถอย (regression) ที่สร้างโครงสร้าง

เป็นต้นไม้ แต่ละโหนดของต้นไม้จะตัดสินใจตามเงื่อนไขของคุณลักษณะ (features) และแต่ละใบ (leaf) จะเก็บค่าการตัดสินใจหรือการทำนาย ข้อดีของ Decision Tree คือความสามารถในการนำเสนอความรู้ในรูปแบบที่อ่านและเข้าใจได้ [4], [9] แสดงดังรูปที่ 2

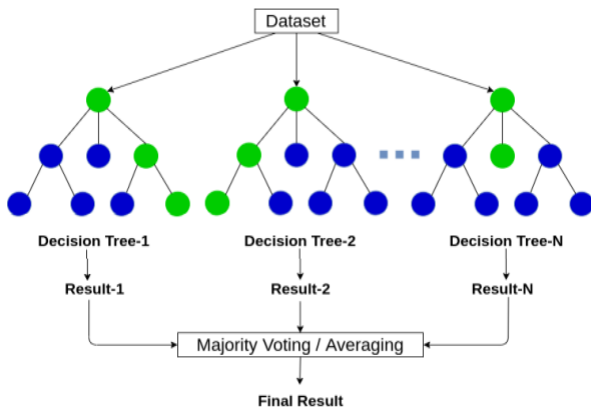


รูปที่ 2 : การทำงานของ Decision Tree [10]

3.3.2) อัลกอริทึมเบย์ (Naive Bayes) เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้อัลกอริทึมในการจำแนกข้อมูลที่ใช้ความน่าจะเป็น และวิธีการทางสถิติจากกฎของเบย์ เพื่อหาความน่าจะเป็นที่ถูกต้องที่สุด จึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลก่อนหน้ากับข้อมูลปัจจุบัน เพื่อหาสมมติฐานที่ดีที่สุด [9], [11], [12] ดังสมการที่ (1)

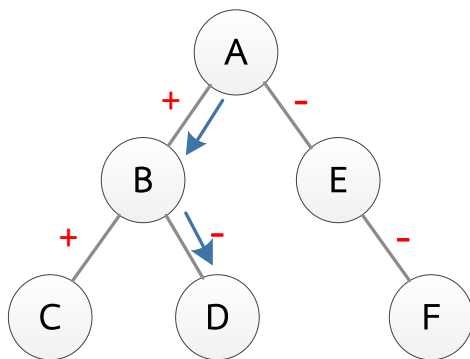
$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

3.3.3) อัลกอริทึมการตัดสินใจแบบสุ่ม (Random Forest) เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ประกอบด้วยการสร้างกลุ่มของต้นไม้ตัดสินใจจำนวนมาก โดยใช้ชุดข้อมูลย่อยที่ถูกสุ่มมาจากชุดข้อมูลต้นฉบับ และใช้การโหวตเพื่อทำนายผลลัพธ์ ซึ่งการใช้ชุดข้อมูลย่อยและคุณลักษณะที่ถูกสุ่มจะทำให้อัลกอริทึมมีความแข็งแกร่งต่อการฝึกฝนที่เกินความจำเป็น (overfitting) [9] แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : การทำงานของ Random Forest [13]

3.3.4) อัลกอริทึม *Gradient Boosted Trees* เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่รวมกลุ่มของต้นไม้ตัดสินใจ ด้วยวิธีการเพิ่มต้นไม้แต่ละต้นแบบต่อเนื่องในการฝึกฝนเพื่อปรับปรุงความผิดพลาดจากต้นไม้ก่อนหน้านี้ และทำการประเมินผลของต้นไม้แต่ละต้นจนกว่าจะได้ต้นไม้ตัดสินใจที่สมบูรณ์ที่สุด [9], [14] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 : การทำงานของ Gradient Boosted Trees [14]

3.3.5) เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม (*Ensemble Method*) วิธีการรวมอัลกอริทึมด้วยกระบวนการการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้หลายโมเดล เพื่อทำนายผลลัพธ์ในการจำแนกประเภทหรือการถดถอย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำ (accuracy) ในการทำนาย นอกจากนั้น ยังมีเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งาน [9], [15]–[18] ดังนี้

1) เทคนิค Bagging หรือ Bootstrap Aggregating คือ การสร้างโมเดลหลาย ๆ ตัวอย่างอิสระจากชุดข้อมูลย่อยที่สุ่มมาจากชุดข้อมูลฝึกฝน แต่ละโมเดลจะทำนายอย่างอิสระและผลที่ได้มักจะถูก “โหวต” หรือเฉลี่ยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้าย

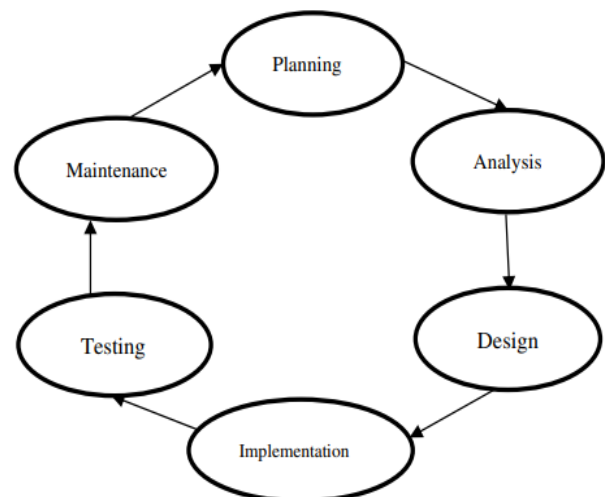
2) เทคนิค Boosting คือ การสร้าง และรวมโมเดลหลาย ๆ ตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายหรือการจำแนกประเภท โดยมุ่งเน้นในการสร้างโมเดลทีละตัว ทั้งนี้ แต่ละโมเดลจะพยายามแก้ไขข้อผิดพลาดจากโมเดลก่อนหน้า

3) เทคนิค โหวต ลงมติ หรือเลือก (Voting) คือ กระบวนการในการทำนายผลลัพธ์ของข้อมูลที่อาศัยโมเดลหลายตัว และใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากโมเดลเหล่านั้นมาใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการทำนายผลลัพธ์สุดท้าย วิธีนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การโหวตที่ใช้โมเดลมากที่สุดเป็นเกณฑ์ (Hard Voting) และการโหวตจะพิจารณาความน่าจะเป็นของแต่ละโมเดล (Soft Voting)

4) เทคนิค Stacked Generalization (Stacking) คือ กระบวนการที่นำเอาผลลัพธ์จากโมเดลหลายตัวมาเป็นอินพุตของโมเดลที่สอง เรียกว่า Meta-Model เพื่อทำนายผลลัพธ์สุดท้าย วิธีนี้ช่วยให้สามารถนำจุดเด่นของโมเดลหลายตัวมารวมกันเพื่อให้ได้โมเดลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.4) กระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development Life Cycle: SDLC)

เป็นกระบวนการที่ครอบคลุมทุกขั้นตอนของการพัฒนาซอฟต์แวร์ ตั้งแต่ การวางแผน การวิเคราะห์ความต้องการ การออกแบบ การพัฒนา การทดสอบ และการบำรุงรักษา [19] แสดงดังรูปที่ 5

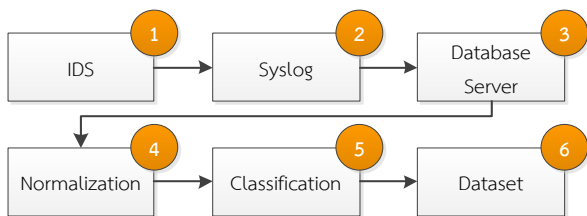


รูปที่ 5 : กระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ [19]

4) วิจัยดำเนินการวิจัย

4.1) ชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย (Dataset)

ในการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลจากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ของศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ เพื่อจัดทำเป็นชุดข้อมูล [3] สำหรับนำไปฝึกสอนโมเดล และได้ทำการจัดเตรียมชุดข้อมูล มีขั้นตอนดังนี้ 1) ดักจับข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์จากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ (IDS) 2) บันทึกข้อมูลสู่ระบบคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของ System Log (Syslog) 3) บันทึกข้อมูลเข้าสู่ระบบฐานข้อมูล (database server) 4) แปลงข้อมูลจากรูปแบบ System Log ให้อยู่ในรูปแบบที่มีโครงสร้าง (normalization) 5) จำแนกประเภทภัยคุกคามทางไซเบอร์ (classification) 6) ส่งข้อมูลออกเป็นชุดข้อมูล [15] แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 : การจัดเตรียมชุดข้อมูล (dataset)

จากรูปที่ 6 ทำให้ผู้วิจัยได้ชุดข้อมูลการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ (RTAF Dataset) จำนวน 9 แอตทริบิวต์ แสดงดังตารางที่ 1 และข้อมูลอินพุต ดังรูปที่ 7

มีข้อมูลการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ จำนวน 948,757 รายการ แบ่งตามประเภทภัยคุกคามทางไซเบอร์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 : ชื่อแอตทริบิวต์

ลำดับ	ชื่อแอตทริบิวต์	ประเภท
1	Classify	Discrete
2	Datetime	Discrete
3	Des_ip	Discrete
4	Des_port	Discrete
5	Priority	Discrete
6	Protocol	Discrete
7	Source_ip	Discrete
8	Source_port	Discrete
9	Type	Discrete

Row No.	Datetime	Classify	Priority	Protocol	Source_ip	Source_port	Des_ip	Des_port	Type
1	2022-11-21 09:28:01.000	Potentially Bad...	2	TCP	10.225.36.70	12967	1.1.20.20	80	warning
2	2022-11-21 09:28:02.000	Potentially Bad...	2	TCP	10.224.106.22	50198	58.97.45.193	80	warning
3	2022-11-21 09:28:02.000	Potentially Bad...	2	TCP	10.107.72.180	58364	119.46.207.161	80	warning
4	2022-11-21 09:28:02.000	Potentially Bad...	2	TCP	10.225.39.48	50296	119.46.207.161	80	warning
5	2022-11-21 09:28:02.000	Potentially Bad...	2	TCP	10.107.72.180	58364	119.46.207.161	80	warning
6	2022-11-21 09:28:02.000	Potentially Bad...	2	TCP	10.233.68.169	7987	119.46.207.161	80	warning
7	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	10.224.36.10	56807	185.188.32.22	80	R2L
8	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper
9	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper
10	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper
11	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper
12	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper
13	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper
14	2022-11-21 09:28:02.000	Potential Corp...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper

รูปที่ 7 : ข้อมูลอินพุต

ตารางที่ 2 : ประเภทและจำนวนภัยคุกคามทางไซเบอร์

ประเภทภัยคุกคามทางไซเบอร์	จำนวน	อัตราส่วน
Normal	5,319	0.5606%
Bitcoin	5,782	0.6094%
botnet	484	0.0510%
compromise	171	0.0180%
data_leak	515	0.0543%
dropper	53,529	5.6420%
Injection	14,831	1.5632%
phishing_Email	2,613	0.2754%
phishing_web	2,268	0.2390%
probe	690	0.0727%
R2L	96,175	10.1369%
trojan	622	0.0656%
U2R	2,359	0.2486%
warning	676,254	71.2779%
Web_Malware	87,124	9.1830%
worm	12	0.0013%
XSS	9	0.0009%
รวม	948,757	100%

4.2) การเตรียมข้อมูล (Data Preparation)

ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมข้อมูลให้เหมาะสมและการคัดเลือกคุณลักษณะข้อมูล (feature selection) ที่มีความครอบคลุมพร้อมจัดให้อยู่ในรูปแบบที่นำไปใช้งานร่วมกับโปรแกรม RapidMiner Studio สำหรับการกำหนดคุณลักษณะผลการทำนาย ในที่นี้ได้กำหนดให้ประเภทภัยคุกคามทางไซเบอร์ ในชื่อแอตทริบิวต์ Type เป็นฉลากหรือป้าย (label) จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลเพื่อทดสอบ (cross-validation) ด้วยวิธี 10-fold cross-validation จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกใช้สำหรับการฝึกสอนเพื่อให้อัลกอริทึมเกิดการเรียนรู้ (train set) และส่วนที่

สองใช้สำหรับการทดสอบอัลกอริทึม (test set) จากนั้นทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนชุดข้อมูลทดสอบ ตั้งแต่ส่วนที่ 1 เป็นชุดทดสอบและส่วนที่ 2 ถึง 9 เป็นชุดสำหรับการเรียนรู้ไปจนถึงชุดทดสอบส่วนที่ 10 และส่วนที่ 1 ถึง 9 เป็นชุดสำหรับการเรียนรู้เมื่อทำจนครบ 10 ครั้ง และนำค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย [20]

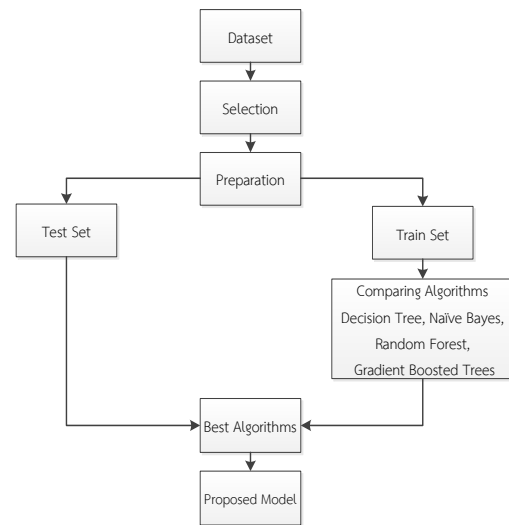
4.3) การสร้างโมเดลตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สร้างโมเดลตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์ [21]–[27] ในกองทัพอากาศด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง กับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเดลตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม โดยเลือกเทคนิคการเรียนรู้แบบกลุ่มแบบโหวต ลงมติ หรือเลือก (voting) และ Stacked Generalization (stacking) มาประยุกต์ใช้ จากนั้นทำการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมประเภทต่าง ๆ จากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวไปสร้างระบบตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องตามขั้นตอน สามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

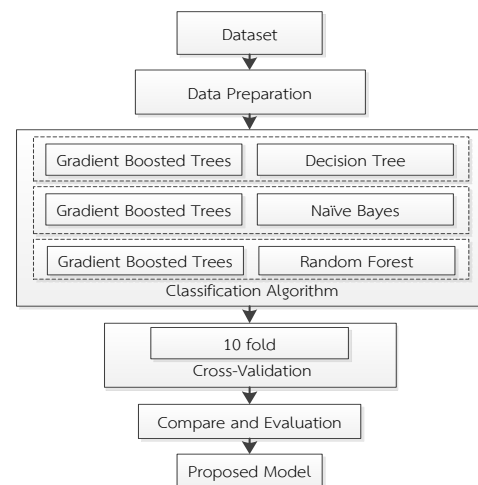
การสร้างโมเดล (model building) ผู้วิจัยได้สร้างโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบมีผู้สอนด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio เป็นการใช้อัลกอริทึมการจำแนกข้อมูลการบุกรุก 4 อัลกอริทึม ประกอบด้วยอัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest และ Gradient Boosted Trees กับชุดข้อมูลการตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ (RTAF Dataset) เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมด้วยสมการวัดค่าความแม่นยำ (accuracy) ค่าความเที่ยง (precision) ค่าความระลึก (recall) และค่าความถ่วงดุล (F1-score) [28] แสดงดังรูปที่ 8

จากนั้น นำผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของอัลกอริทึม เพื่อหาอัลกอริทึมการจำแนกภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ดีที่สุดไปสร้างเป็นโมเดลใหม่ ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม [18] ผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึม พบว่า อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ค่าความแม่นยำ และค่าความเที่ยงที่ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงนำอัลกอริทึมดังกล่าวไปใช้เป็นอัลกอริทึมหลักเพื่อสร้างเป็นโมเดลใหม่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่มกับ 3 อัลกอริทึมที่มีอันดับรองลงมา เพื่อประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดล

จากสมการวัดค่าความแม่นยำ และค่าความเที่ยงที่ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 : แผนภูมิการสร้างโมเดลตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง



รูปที่ 9 : แผนภูมิการสร้างโมเดลตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม

4.4) การประเมินประสิทธิภาพของโมเดล (Model Evaluation)

ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพโมเดล ด้วยอัลกอริทึมการจำแนกภัยคุกคามทางไซเบอร์ทั้ง 4 อัลกอริทึม ประกอบด้วยอัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest และ Gradient Boosted Trees และประเมินประสิทธิภาพโมเดลตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม กับชุดข้อมูลการตรวจจบบุกรุกทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ (RTAF Dataset) ที่ใช้สมการวัดค่าความแม่นยำ

ค่าความเที่ยง ค่าความระลึก และค่าความถ่วงดุล [29], [30] ตามสมการที่ (2)–(5) ดังนี้

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

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

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

$$\text{F1-Score} = 2 \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (5)$$

โดยที่

True Positive (TP) คือ ข้อมูลที่ทำนายถูกต้อง เมื่อเทียบกับเฉลย
False Positive (FP) คือ ข้อมูลที่ทำนายแล้วไม่ถูกต้อง เมื่อเทียบกับเฉลย

True Negative (TN) คือ ข้อมูลที่อยู่ในเฉลยแต่ไม่มีการทำนาย (ตรงข้ามกับ FN)

Precision คือ ค่าความเที่ยงเกิดจากการนำค่า TP มาเทียบกับ FP

Recall คือ ค่าความระลึกเกิดจากการนำค่า TP มาเทียบกับ FN

F1-Score คือ ค่าเฉลี่ยของ Precision และ Recall

4.5) การออกแบบระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร ตามกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ (SDLC) 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.5.1) การวางแผน (Planning) ศึกษา รวบรวม ผลการวิเคราะห์ภัยคุกคาม และอัลกอริทึมที่มีความเหมาะสม

4.5.2) การวิเคราะห์ความต้องการ (Analysis) สอบถามความคิดเห็นจากผู้ปฏิบัติงานในศูนย์ยุทธการทางไซเบอร์ ศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อทำความเข้าใจ และกำหนดขอบเขต

4.5.3) การออกแบบ (Design) นำผลการวิเคราะห์ความต้องการ มาออกแบบระบบทั้งในส่วนของผู้ใช้งาน (front-end) กับส่วนควบคุมการประมวลผล (back-end) และส่วนเชื่อมต่อกับระบบแลกเปลี่ยนข้อมูล (REST API)

4.5.4) การพัฒนา (Implementation) พัฒนาระบบที่มีการเชื่อมต่อไปยังระบบแลกเปลี่ยนข้อมูล (REST API) จากนั้นนำ

ข้อมูลที่ได้จากระบบดังกล่าวมานำเสนอในรูปแบบของจินตทัศน์ข้อมูล (data visualization)

4.5.5) การทดสอบ (Testing) ทดสอบข้อบกพร่องของระบบตามกระบวนการทดสอบซอฟต์แวร์ (Software Testing Life Cycle: STLC) เพื่อให้แน่ใจว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

4.5.6) การบำรุงรักษา (Maintenance) บำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง เพื่อแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ประกอบด้วย การอัปเดตระบบปฏิบัติการ การอัปเดตระบบฐานข้อมูล และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปฏิบัติการ

5) ผลการวิจัย

5.1) ผลการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึม

ผู้วิจัยได้ใช้ชุดข้อมูลการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ ซึ่งเป็นชุดข้อมูลเฉพาะและเป็นชุดข้อมูลที่มาจากข้อมูลจริง นำเข้ากระบวนการสร้างโมเดลตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง และใช้อัลกอริทึมการจำแนกข้อมูลการบุกรุก 4 อัลกอริทึม ประกอบด้วย อัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest และ Gradient Boosted Trees เพื่อประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึม โดยใช้สมการวัดค่าความแม่นยำ ค่าความเที่ยง ค่าความระลึก และค่าความถ่วงดุล สามารถแสดงการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : การประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำของอัลกอริทึมทั้ง 4 อัลกอริทึม

Algorithms	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
Decision Tree	94.98	79.65	58.12	67.20
Naïve Bayes	98.11	72.26	94.28	81.81
Random Forest	94.98	80.06	58.04	67.29
Gradient Boosted Trees	99.07	80.24	71.48	75.61

จากตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินผลและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้ง 4 อัลกอริทึมสามารถสรุปได้ดังนี้

อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 99.07 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 80.24 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 71.48 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 75.61

อัลกอริทึม Naïve Bayes มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 98.11 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 72.26 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 94.28 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 81.81

อัลกอริทึม Random Forest มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 94.98 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 80.06 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 58.04 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 67.29

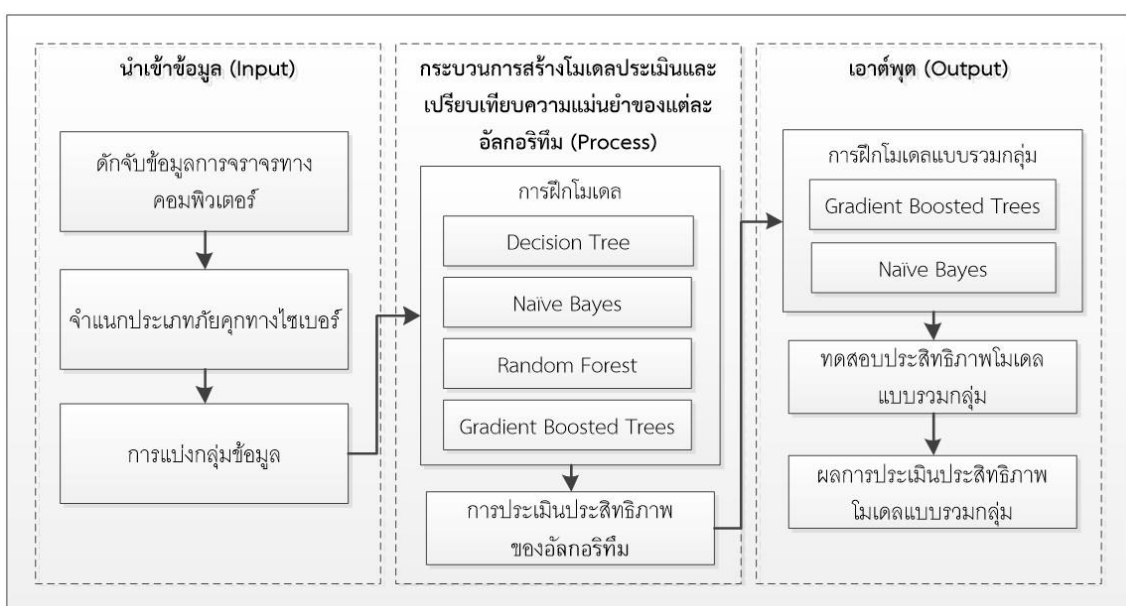
อัลกอริทึม Decision Tree มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 90.98 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 79.65 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 58.12 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 67.20 ฉะนั้น อัลกอริทึมที่มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำและค่าเฉลี่ยความเที่ยงสูงที่สุดคือ อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees

ผู้วิจัยจึงได้คัดเลือกอัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ที่มีค่าความแม่นยำ และค่าความเที่ยงที่สูงสุดไปใช้เป็นอัลกอริทึมหลักสำหรับสร้างระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร

จากนั้นนำผลการการประเมินประสิทธิภาพโมเดล ด้วยอัลกอริทึมการจำแนกภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ดีที่สุด ไปสร้างเป็นโมเดลใหม่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม [16]–[18] กับอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึม ประกอบด้วยอัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes และ Random Forest เพื่อประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึม ที่ใช้สมการวัดค่าความแม่นยำ ค่าความเที่ยง ดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 แสดงการสร้างโมเดลตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การนำเข้าข้อมูล (input) ด้วยการดักจับข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์จากเครื่องข่ายคอมพิวเตอร์ในองค์กร จากนั้นทำการจำแนกประเภทภัยคุกคามทางไซเบอร์ จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลเพื่อทดสอบด้วยวิธี 10-fold cross-validation และแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ Train Set และ Test Set ส่วนแรกใช้สำหรับการฝึกสอนเพื่อให้อัลกอริทึมเกิดการเรียนรู้ ส่วนที่สองใช้สำหรับการทดสอบอัลกอริทึม จากนั้นทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนชุดข้อมูลทดสอบ ทั้งนี้ ได้เริ่มตั้งแต่ส่วนที่ 1 เป็นชุดทดสอบและส่วนที่ 2 ถึง 9 เป็นชุดสำหรับการเรียนรู้ไปจนถึงชุดทดสอบส่วนที่ 10 และส่วนที่ 1 ถึง 9 เป็นชุดสำหรับการเรียนรู้เมื่อทำจนครบ 10 ครั้ง และนำค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย



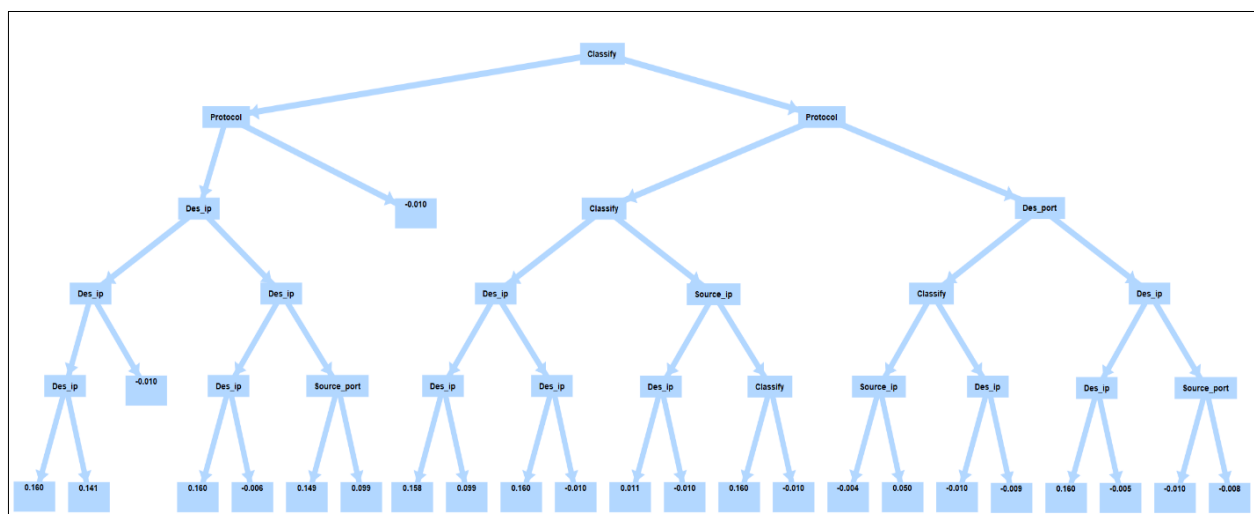
รูปที่ 10 : การสร้างโมเดลตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม

ส่วนที่ 2 การสร้างโมเดลเพื่อประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม โดยนำข้อมูลที่ได้เตรียมไว้ในส่วนที่ 1 ไปสร้างโมเดล จากนั้นทำการฝึกโมเดลจากนั้นทำการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของอัลกอริทึมทั้ง 4 อัลกอริทึม ประกอบด้วย Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest และ Gradient Boosted Trees กับชุดข้อมูลการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ ของกองทัพอากาศ เพื่อเลือกอัลกอริทึมการจำแนกภัยคุกคามทาง

ไซเบอร์ที่ดีที่สุด 2 อันดับไปสร้างเป็นโมเดลแบบรวมกลุ่ม ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมพบว่า อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ ร้อยละ 99.07 และค่าเฉลี่ยความเที่ยง ร้อยละ 80.24 และอัลกอริทึม Naïve Bayes มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ ร้อยละ 98.11 และค่าเฉลี่ยความเที่ยง ร้อยละ 72.26 เป็นเปอร์เซ็นต์สูงสุดจากอัลกอริทึมทั้งหมด ดังตารางที่ 4

Row No.	Datetime	Classify	Priority	Protocol	Source_ip	Source_port	Des_ip	Des_port	prediction(Type)
1	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.107.72.180	58364	119.46.207.161	80	warning
2	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potential Corporate Privacy ...	1	TCP	8.241.160.254	80	10.107.198.109	63268	dropper
3	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.107.184.210	55982	119.46.207.161	80	warning
4	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.229.6.27	57600	103.235.46.245	80	Injection
5	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.107.184.210	56082	119.46.207.161	80	warning
6	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potential Corporate Privacy ...	1	TCP	10.233.73.207	48636	142.250.199.35	80	Web_Malware
7	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.225.36.70	13000	58.97.45.193	80	warning
8	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.107.72.180	58554	119.46.207.161	80	warning
9	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.225.39.48	50486	119.46.207.161	80	warning
10	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.107.72.180	58403	119.46.207.161	80	warning
11	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.107.72.180	58413	119.46.207.161	80	warning
12	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potential Corporate Privacy ...	1	TCP	10.228.255.114	52791	188.172.208.135	80	R2L
13	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potential Corporate Privacy ...	1	TCP	10.224.38.10	57007	37.252.244.158	80	R2L
14	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.235.224.75	9993	119.46.126.79	80	warning
15	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.229.6.27	58080	103.235.46.245	80	Injection
16	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.235.224.75	9993	119.46.126.79	80	warning
17	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potentially Bad Traffic	2	TCP	10.233.69.169	8127	119.46.207.161	80	warning
18	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potential Corporate Privacy ...	1	TCP	10.224.38.10	56879	185.188.32.5	80	R2L
19	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potential Corporate Privacy ...	1	TCP	10.228.255.114	52791	188.172.208.135	80	R2L
20	Nov 21, 2022 9:28:02 AM ICT	Potential Corporate Privacy ...	1	TCP	10.226.184.162	7804	172.67.75.166	80	R2L

รูปที่ 11 : ผลเอาต์พุต



รูปที่ 12 : ลำดับความสำคัญของแอตทริบิวต์

ตารางที่ 4 : ผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่ม

Algorithms	Voting				Stacking			
	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
Gradient Boosted Trees + Decision Tree	95.04	76.11	52.26	61.97	99.51	81.00	77.67	79.30
Gradient Boosted Trees + Naïve Bayes	98.99	80.03	71.20	75.36	99.77	88.59	85.90	87.22
Gradient Boosted Trees + Random Forest	95.06	75.83	52.49	62.04	99.51	81.20	78.31	79.73

ส่วนที่ 3 เอาต์พุต (output) นำอัลกอริทึมที่ผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมที่มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ และค่าความเที่ยง เป็นเปอร์เซ็นต์สูงสุด 2 อันดับ คืออัลกอริทึม Gradient Boosted Trees และอัลกอริทึม Naïve Bayes ไปสร้างเป็นโมเดลแบบรวมกลุ่มด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและการเรียนรู้ของเครื่องที่มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลและสร้างโมเดลทางสถิติโดยไม่ต้องมีทักษะการเขียนโปรแกรม จากนั้นทำการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่มที่ใช้สมการวัดค่าความแม่นยำ ค่าความเที่ยง ค่าความระลึก และค่าความถ่วงดุล [29], [30] ตามสมการที่ (2)–(5) รวมถึงแสดงผลเอาต์พุตชื่อแอตทริบิวต์ “prediction(Type)” ดังรูปที่ 11 และแสดงลำดับความสำคัญของตัวแปร ดังรูปที่ 12

จากรูปที่ 12 แสดงลำดับความสำคัญของแอตทริบิวต์ พบว่าแอตทริบิวต์ Classify มีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือแอตทริบิวต์ Protocol

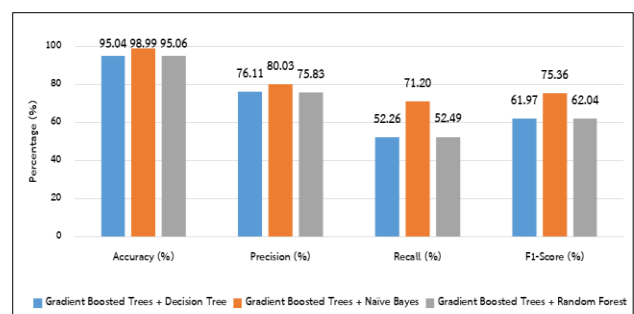
จากตารางที่ 4 สรุปผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่ม ได้ดังนี้ อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Decision Tree ใช้เทคนิคการ Voting มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 95.04 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 76.11 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 52.26 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 61.97 และ Stacking มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 99.51 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 81.00 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 77.67 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 79.30

อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Naïve Bayes ใช้เทคนิคการ Voting มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 98.99 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 80.03 ค่าเฉลี่ย

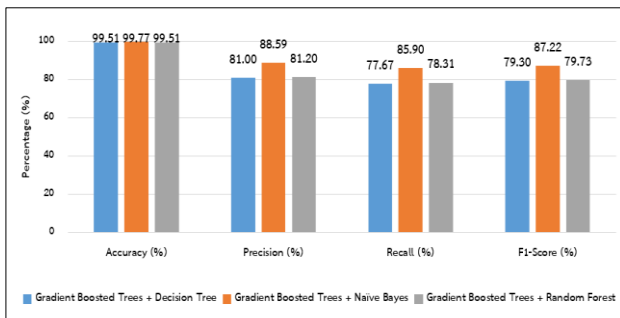
ความระลึก เท่ากับร้อยละ 71.20 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 75.36 และ Stacking มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 99.77 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 88.59 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 85.90 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 87.22

อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Random Forest ใช้เทคนิคการ Voting มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 95.06 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 75.83 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 52.49 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล เท่ากับร้อยละ 62.04 และ Stacking มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับร้อยละ 99.51 ค่าเฉลี่ยความเที่ยง เท่ากับร้อยละ 81.20 ค่าเฉลี่ยความระลึก เท่ากับร้อยละ 78.31 และค่าเฉลี่ยความถ่วงดุล ร้อยละ 79.73

แสดงผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่ม ระหว่างเทคนิค Voting และเทคนิค Stacking ดังรูปที่ 13 และรูปที่ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 13 : ผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่มด้วยเทคนิค Voting



รูปที่ 14 : ผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่มด้วยเทคนิค Stacking

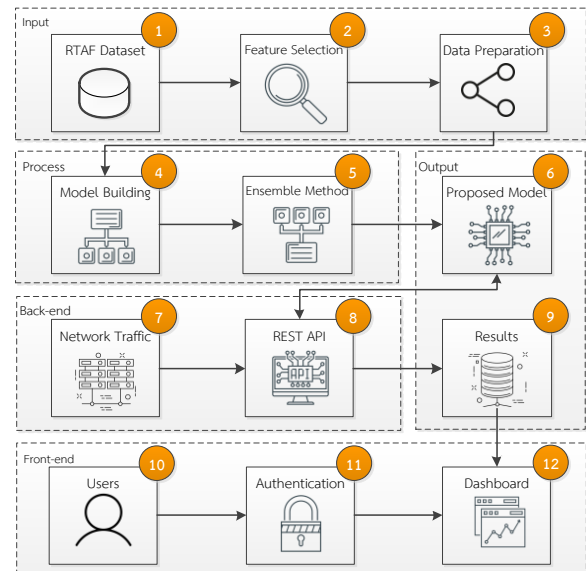
จากผลการประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่มด้วยเทคนิค Stacking พบว่าอัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Naive Bayes ให้ประสิทธิภาพสูงสุด มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ ร้อยละ 99.77 และค่าเฉลี่ยความเที่ยง ร้อยละ 88.59 ส่วนเทคนิค Voting ก็ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเช่นกันเมื่อใช้อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Naive Bayes มีค่าเฉลี่ยความแม่นยำ ร้อยละ 98.99 และค่าเฉลี่ยความเที่ยง ร้อยละ 80.03 ดังนั้นการสร้างโมเดลแบบรวมกลุ่มด้วยอัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Naive Bayes ด้วยเทคนิค Stacking ให้ผลการประเมินประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำนายผลเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ

จากนั้นผู้วิจัยจึงได้นำโมเดลที่ผ่านการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุด ไปทำสร้างเป็นระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร ตามกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ (SDLC)

5.2) ผลการออกแบบระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

ผู้วิจัยนำโมเดลที่มีผลการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดลสูงที่สุดในการวิจัยในครั้งนี้ พบว่าโมเดลตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่มระหว่างอัลกอริทึม Gradient Boosted Trees กับอัลกอริทึม Naive Bayes ด้วยเทคนิค Stacking ให้ผลการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดลสูงที่สุด ผู้วิจัยจึงนำโมเดลดังกล่าวไปสร้างเป็นระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์

ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร ซึ่งในการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบ ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 : ผลการออกแบบระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

จากรูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ของกระบวนการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบที่มีหน้าที่แตกต่างกัน 5 ส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 Input คือ ขั้นตอนการนำข้อมูลที่ได้จากการดักจับข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์จากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ (IDS) ของศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศเข้าสู่ระบบ (หมายเลข 1) จากนั้นทำการคัดเลือกคุณลักษณะข้อมูล (feature selection) เพื่อทำการเลือกข้อมูลที่มีคุณลักษณะที่ตรงความต้องการของการออกแบบ (หมายเลข 2) จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มข้อมูล (data preparation) เพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี 10-fold cross-validation ซึ่งจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ Train Set และ Test Set จำนวน 10 ส่วนเท่า ๆ กัน โดยการเปลี่ยนชุดข้อมูลทดสอบ ตั้งแต่ส่วนที่ 1 เป็นชุดทดสอบและส่วนที่ 2 ถึง 9 เป็นชุดสำหรับการเรียนรู้ไปจนถึงชุดทดสอบส่วนที่ 10 และส่วนที่ 1 ถึง 9 เป็นชุดสำหรับการเรียนรู้ เมื่อทำงานครบ 10 ครั้ง และนำค่าความแม่นยำของการ พยากรณ์ที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย (หมายเลข 3)

ส่วนที่ 2 Process เป็นกระบวนการสร้างโมเดลตรวจจำการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio จะใช้อัลกอริทึมการจำแนกข้อมูลการบุกรุก 4 อัลกอริทึม ประกอบด้วยอัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest และ Gradient Boosted Trees และประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึม (หมายเลข 4) จากนั้นสร้างโมเดลประเภทไฮบริด จากอัลกอริทึมที่มีผลประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมที่สูงสุดไปเพื่อสร้างเป็นโมเดลใหม่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม และการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดล (หมายเลข 5)

ส่วนที่ 3 Output เป็นกระบวนการนำโมเดลที่ทำการออกแบบและการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดลเรียบร้อยแล้วให้อยู่ในรูปแบบพร้อมให้บริการ (หมายเลข 6) และสร้างฐานข้อมูลเพื่อเก็บผลการตรวจจบการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม (หมายเลข 9)

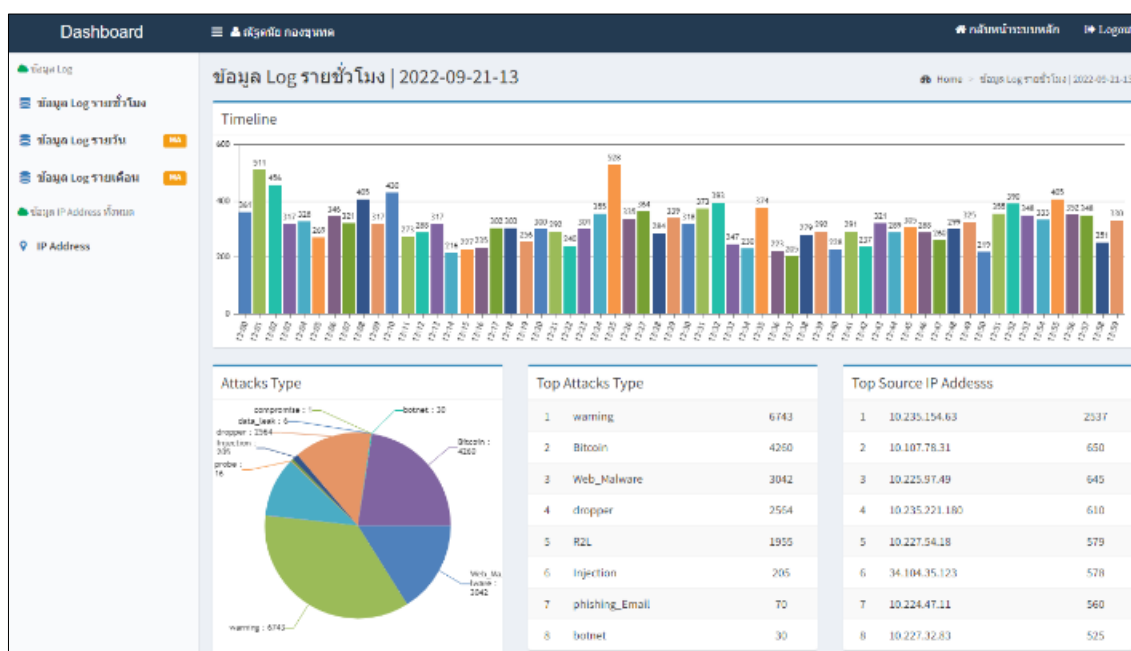
ส่วนที่ 4 Back-End เป็นกระบวนการดักจับข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์จากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ (IDS) (หมายเลข 7) จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวส่งไปยังระบบแลกเปลี่ยนข้อมูล (REST API) (หมายเลข 8) เพื่อทำการวิเคราะห์ประเภทการบุกรุกทางไซเบอร์ เราจะพบว่า ระบบแลกเปลี่ยนข้อมูลจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโมดูลกับระบบ

แลกเปลี่ยนข้อมูลจากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ประเภทการ
บุกรุกทางไซเบอร์ไปเก็บบันทึกไว้ในฐานข้อมูล (result) (หมายเลข
9) ซึ่งอยู่ในส่วนของ Output

ส่วนที่ 5 Front-End เป็นส่วนของผู้ใช้งานระบบ (หมายเลข 10) กล่าวคือ ผู้เข้าใช้งานระบบจะทำการยืนยันตัวตน (authentication) (หมายเลข 11) เพื่อตรวจสอบสิทธิ์การเข้าใช้งานระบบ จากนั้นถึงจะเข้าสู่หน้าหลัก (dashboard) (หมายเลข 12) ของระบบตรวจจัดการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ในองค์กร ดังรูปที่ 16

จากรูปที่ 16 แสดงหน้าระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง ประกอบด้วยส่วนของข้อมูลการบุกรุกทางไซเบอร์ในรูปแบบเส้นเวลา (timeline) ซึ่งแสดงผลเป็นรายนาฬิกา ส่วนของประเภทการบุกรุกทางไซเบอร์ (attacks type) แสดงข้อมูลสถิติการวิเคราะห์การบุกรุกทางไซเบอร์โดยจำแนกตามประเภทการบุกรุกทางไซเบอร์

ส่วนแสดงภัยคุกคามทางไซเบอร์แยกตามจำนวนประเภทการบุกรุกทางไซเบอร์ (top attacks type) เรียงจากมากสุดไปน้อยสุดตามลำดับ และส่วนแสดงสถิติภัยคุกคามทางไซเบอร์แยกตามจำนวน IP Address ที่มีการบุกรุกทางไซเบอร์ (top source IP address) ที่เรียงจากมากสุดไปน้อยสุด ตามลำดับ



รูปที่ 16 : ระบบตรวจจัดการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

6) สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ ของศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ เพื่อจัดทำเป็นชุดข้อมูล จากนั้นทำการเตรียมข้อมูลให้เหมาะสมด้วยการเลือกข้อมูลที่มีความเหมาะสมไปจัดให้อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้องเพื่อให้สามารถนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรม RapidMiner Studio จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี 10-fold cross-validation ซึ่งจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ Train Set และ Test Set จำนวน 10 ส่วนเท่าๆ กัน จากนั้นทำการสร้างโมเดลตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio ด้วยอัลกอริทึมการจำแนกข้อมูลการบุกรุก 4 อัลกอริทึม ประกอบด้วยอัลกอริทึม Decision Tree, Naïve Bayes, Random Forest และ Gradient Boosted Trees เพื่อประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมจะใช้สมการวัดค่าความแม่นยำ และค่าความเที่ยงเป็นหลัก จากนั้นนำผลการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมที่ดีที่สุด คือ อัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ไปสร้างเป็นอัลกอริทึมใหม่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่ม กับอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึม เพื่อประเมินและเปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละอัลกอริทึมแบบรวมกลุ่ม โดยใช้สมการวัดค่าความแม่นยำ และค่าความเที่ยงที่ดีที่สุด

ผลการวิจัยพบว่า การสร้างโมเดลตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องแบบรวมกลุ่มด้วยวิธีการนำอัลกอริทึม Gradient Boosted Trees ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Naïve Bayes ด้วยเทคนิค Stacking มีผลการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นตามที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นนำอัลกอริทึม Gradient Boosted Trees กับอัลกอริทึม Naïve Bayes กับเทคนิค Stacking ไปสร้างเป็นระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร ประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ดังต่อไปนี้ 1) Input เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการดักจับข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์จากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ของ ศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศเข้าสู่ระบบ 2) Process เป็นการสร้างโมเดลตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio 3) Output เป็นการนำโมเดลที่ทำการออกแบบและการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดลเรียบร้อยแล้วให้อยู่ในรูปแบบ

พร้อมให้บริการ และสร้างฐานข้อมูลเพื่อเก็บผลการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ 4) Back-End เป็นการดักจับข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์จากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ จากนั้นนำข้อมูลส่งไปยังระบบแลกเปลี่ยนข้อมูล (REST API) เพื่อทำการวิเคราะห์ประเภทการบุกรุกทางไซเบอร์ จากนั้นระบบแลกเปลี่ยนข้อมูลจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโมเดลกับระบบแลกเปลี่ยนข้อมูลจากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ประเภทการบุกรุกทางไซเบอร์ไปเก็บบันทึกไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งอยู่ในส่วนของ Output และ 5) Front-End เป็นส่วนของผู้ใช้งานระบบ นั่นคือ ผู้ใช้งานระบบจะทำการยืนยันตัวตน (authentication) เพื่อตรวจสอบสิทธิ์การเข้าใช้งานระบบ จากนั้นถึงจะเข้าสู่หน้าหลัก (dashboard)

7) ข้อเสนอแนะ

จากที่ได้ทำการวิจัยเรื่องระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์แบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับเสริมสร้างความแข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในองค์กร ผู้วิจัยได้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมคือ ในการออกแบบโมเดลแบบรวมกลุ่ม ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิคการสร้างโมเดลแบบรวมกลุ่มด้วยเทคนิค Voting และ Stacking อย่างไรก็ตามยังคงมีอีกหลายเทคนิคที่นักวิจัยที่สนใจสามารถนำมาใช้ในการสร้างโมเดลแบบรวมกลุ่มได้อีกในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ ที่ได้สนับสนุนข้อมูลการจราจรทางคอมพิวเตอร์ จากระบบตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ เพื่อจัดทำเป็นชุดข้อมูลการตรวจจับการบุกรุกทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ และขอกราบขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษา พลอากาศตรี ศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ปราณีตพลกรัง สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และคณะทำงานที่ให้คำปรึกษา สนับสนุน และแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จได้อย่างสมบูรณ์

REFERENCES

- [1] National Cyber Security Agency, "Cyber Threat Statistics," 2023. [Online]. Available <https://ncsa.or.th/service-statistics.html>

- [2] Royal Thai Air Force, "Royal Thai air force strategy for 20 years (B.E. 2561–2580) (revised version)," 2020. [Online]. Available: <https://welcome-page.raf.mi.th/blog/e-ksaarephyaeph-11/yuththsastrk-ngthaph-aakaas-20-pii-ph-s-2561-2580-38>
- [3] A. H. Janabi, T. Kanakis, and M. Johnson, "Overhead reduction technique for software-defined network based intrusion detection systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 66481–66491, 2022.
- [4] A. S. A. Aziz, S. E.-O. Hanafi, and A. E. Hassanien, "Comparison of classification techniques applied for network intrusion detection and classification," *J. Appl. Logic*, vol. 24, pp. 109–118, Nov. 2017.
- [5] G. Karatas, O. Demir, and O. K. Sahingoz, "Increasing the performance of machine learning-based IDSs on an imbalanced and up-to-date dataset," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 32150–32162, 2020.
- [6] A. Khraisat, I. Gondal, P. Vamplew, and J. Kamruzzaman, "Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges," *Cybersecurity*, vol. 2, no. 1, 2019, Art. no. 20, doi: 10.1186/s42400-019-0038-7.
- [7] T. A. Alamiedy, M. Anbar, A. K. Al-Ani, B. N. Al-Tamimi, and N. Faleh, "Review on feature selection algorithms for anomaly-based intrusion detection system," in *Proc. 3rd Int. Conf. Reliable Inf. and Commun. Technol.*, Kuala Lumpur, Malaysia, Jun. 2018, pp. 605–619.
- [8] I. Garcia-Magarino, G. Gray, R. Lacuesta, and J. Lloret, "Survivability strategies for emerging wireless networks with data mining techniques: a case study with NetLogo and RapidMiner," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 27958–27970, 2018.
- [9] A. Karim, M. Shahroz, K. Mustofa, S. B. Belhaouari, and S. R. K. Joga, "Phishing detection system through hybrid machine learning based on URL," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 36805–36822, 2023.
- [10] T. M. Mitchell, *Machine Learning*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1997.
- [11] H. Yin, M. Xue, Y. Xiao, K. Xia, and G. Yu, "Intrusion detection classification model on an improved k-dependence Bayesian network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 157555–157563, 2019.
- [12] L. Jian and K.-T. Chau, "Analytical calculation of magnetic field distribution in coaxial magnetic gears," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 92, pp. 1–16, 2009.
- [13] N. Mahdi Abdulkareem and A. M. Abdulazeez, "Machine learning classification based on random forest algorithm: A review," *Int. J. Sci. Bus.*, vol. 5, no. 2, pp. 128–142, 2021.
- [14] W. Li, W. Wang, and W. Huo, "RegBoost: A gradient boosted multivariate regression algorithm," *Int. J. Crowd Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 60–72, 2020.
- [15] D. Stiawan, "An approach for optimizing ensemble intrusion detection systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 6930–6947, 2021.
- [16] H. Luo, F. Cheng, H. Yu, and Y. Yi, "SDTR: Soft decision tree regressor for tabular data," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 55999–56011, 2021.
- [17] M. Mohy-Eddine, A. Guezaz, S. Benkirane, M. Azrou, and Y. Farhaoui, "An ensemble learning based intrusion detection model for industrial IoT security," *Big Data Mining and Analytics*, vol. 6, no. 3, pp. 273–287, 2023.
- [18] S. Ismail, Z. El Mrabet, and H. Reza, "An ensemble-based machine learning approach for cyber-attacks detection in wireless sensor networks," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 1, 2022, Art. no. 30.
- [19] A. Agarwal, A. Agarwal, D. K. Verma, D. Tiwari, and R. Pandey, "A review on software development life cycle," *Int. J. Scientific Res. Comput. Sci., Eng. Inf. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 384–388, 2023, doi: 10.32628/cseit2390387.
- [20] C. Qi, J. Diao, and L. Qiu, "On estimating model in feature selection with cross-validation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 33454–33463, 2019.
- [21] G.-P. Fernando, A.-A. H. Brayan, A. M. Florina, C.-B. Liliana, A.-M. Héctor-Gabriel, and T.-S. Reinel, "Enhancing intrusion detection in IoT communications through ML model generalization with a new dataset (IDSAL)," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 70542–70559, 2023.
- [22] L. Zou, X. Luo, Y. Zhang, X. Yang, and X. Wang, "HC-DTTSVM: A network intrusion detection method based on decision tree twin support vector machine and hierarchical clustering," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21404–21416, 2023.
- [23] S. Ameer, "Comparative analysis of machine learning techniques for predicting air quality in smart cities," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128325–128338, 2019.
- [24] W. Alhakami, A. Alharbi, S. Bourouis, R. Alroobaea, and N. Bouguila, "Network anomaly intrusion detection using a nonparametric Bayesian approach and feature selection," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52181–52190, 2019.
- [25] X. Gao, C. Shan, C. Hu, Z. Niu, and Z. Liu, "An adaptive ensemble machine learning model for intrusion detection," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82512–82521, 2019.



- [26] Y. Yu and N. Bian, "An intrusion detection method using few-shot learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49730–49740, 2020.
- [27] Z. Wu, H. Zhang, P. Wang, and Z. Sun, "RTIDS: A robust transformer-based approach for intrusion detection system," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64375–64387, 2022.
- [28] S. Gibson, B. Issac, L. Zhang, and S. M. Jacob, "Detecting spam email with machine learning optimized with bio-inspired metaheuristic algorithms," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 187914–187932, 2020.
- [29] R. Zhao, Y. Mu, L. Zou, and X. Wen, "A hybrid intrusion detection system based on feature selection and weighted stacking classifier," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 71414–71426, 2022.
- [30] A. A. Taha and S. J. Malebary, "An intelligent approach to credit card fraud detection using an optimized light gradient boosting machine," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 25579–25587, 2020.

The Comparison Between Structural Equation Modeling and Multiple Linear Regression Analysis to Predict the Parents' Intention of Using Child Car Restraint in Bangkok

Bussakorn Hammachukiattikul¹ Anchalee Supithak^{2*}

^{1,2*}*Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: anchalee_s@tni.ac.th

Received: 13 July 2024; Revised: 23 September 2024; Accepted: 3 October 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

This research aims to study the causal variables influencing on the intention of parents in Bangkok to use child car restraint. The questionnaire is developed based on the Theory of Planned Behavior, Government Influence, Price Fairness, and Safety Awareness. The data are collected from 316 parents in Bangkok who have children' age under seven years old. The Structural Equation Modelling (SEM) is used to test the causal variables relationship. The results show that the causal variable that most influence on intention to use CCR is safety awareness (SA), since the value of direct effect coefficient (β) is 0.526. The next casual variable influencing on intention to use is perceived behavior control with the value of effect coefficient (β) of 0.273, and the third influent casual variable is attitude with β value of 0.179. In addition, by applying the Multiple Linear Regression (MLR) with stepwise regression analysis results in the appropriate predictive equation of the parents' intention to use child car restraint. The coefficients of the MLR model of factor attitudes, perceived behavioral control, and safety awareness are 0.260, 0.212, and 0.530, respectively. The results from the SEM and MLR are the same direction. With the integration method of SEM and MLR, the predictive equation from MLR is well reliable with corresponding to the results from SEM method.

Keywords: Child car restraint, Direct effect coefficient, Multiple linear regression, Structural Equation Modelling (SEM), Theory of planned behavior

I. INTRODUCTION

Nowadays, the private automobiles have been usable and instead of public transportation as for the convenience of children. Many countries give significance on the children's safety in a moving vehicle. Child restraint system should be used as normal in the developing country with the effective compulsory. In Thailand, there are 554 (3.93%) children age between 1–14 years old are death from the road accident in 2022 and increase to 586 (4.17%) children in 2023 [1]. Recently, Thailand finally has a law that children under six must be placed in a car seat or a special seat for safety while sitting in a moving vehicle. The violations could mean a fine of up to 2,000 baht. Even though the compulsory use of CCR start on September 5, 2022, the effect and results should be followed up and evaluated. However, the compulsory use of child car restraint in Thailand is not effective. Recent research in Thailand aims to study the parent's awareness, the car seat law, and the car seat safety standards and some research in Asia study the parents' perception of using CCR while travelling with their children. The theory of planned behavior (TPB) is the effective tool in predicting intentions and behavior of customers in many researches. The basic theory can explain the principles of consumer choice. In addition, this study is based on clarity about the context of social and individual processes those aid consumer decision-making. The Theory of Planned Behavior (TPB) model with Government Influence, Safety Awareness, and Price Fairness are considered to develop the questionnaire to study the parents' awareness of using child car restraint or CCR in Thailand [2]. Moreover, the analysis of factors influencing the usage of child restraint system by parents is studied widely [2]–[7].

The objective of this research is to study the relationship of the causal variables influencing to parents' intention of using CCR in Bangkok by applying the Structural Equation Modeling. The Structural Equation

Modeling or SEM is the second-generation technique for modelling casual networks of effects simultaneously. SEM offers extensive and flexible casual-modeling capabilities rather than the first-generation techniques like ANOVA or regression analysis. However, the Multiple Linear Regression or MLR analysis provides the predictive equation of the parents' intention to use child car restraint. Since the advantage of SEM and MLR analysis techniques are different, SEM benefits on dealing with complex structure of casual variables, while MLR analysis result is the predictive equation of casual variables. This research aims to compare the results from two methods and to get better understand and well evaluate the adequacy, reliability, and validity of each casual variables by applying SEM. Finally, the predictive equation of the parents' intention to use is developed by applying MLR analysis.

II. LITERATURE REVIEWS

The study of parents' perception of using child car restraint to their children has been studied widely. Many research study the parents' perception and the influence factors to parents' intention of using CCR. The research of [3] conclude that even though parents' knowledge on child car restraint for discharged newborns from the hospital is high, parents did not intend to use a child car restraint for their newborn for travelling back from hospital except owning one. From the focus group discussion conducted in Singapore, the main factors contributing to non-compliance to child car restraints in Singapore and China was a lack of parental knowledge in terms of road safety awareness and perception of risk and aggravated by child behavior and lack of cultural norms [3]. The research of [4] proposes the information, motivation, and behavioral skills model based to develop the questionnaire and perform in-depth interview in parents of children aged 0–6. [4] proposed logistic regression analysis and concludes that the successive

factors of promoting the usage of CCR are parents' education, family economic status, being trained on children's unintentional injuries, the high scores on CCR riding mode cognition, CCR type cognition, CCR use motivation, and CCR installation skills. The Theory of Planned Behavior (TPB) is implemented to develop the questionnaire to study awareness and parents' intention to use child car restraint [2]. The awareness and the parents' intention to use CCR in in Bangkok is studied by develop the questionnaires based on attitude, subjective norm, perceived behavioral control, government influence, safety awareness and the price fairness and resulting in the regression analysis model representing the intention to use CCR [4]. However, the analysis technique used in research of [3] based on the analysis of variance of multiple linear regression which suitable for the experiment with controlling condition. The first-generation technique like regression analysis is particularly well suited to simple models in which few independent variables and dependent variables are involved, and the data is highly normalized. Regression analysis is suitable for highly simple model and ideal for repeated measures. The advantage of regression analysis is for prediction the dependent variables with the model of independent variables such as the logistic regression analysis applied in [5]. The Structural Equation Modeling (SEM) is the second-generation technique which offers extensive, scalable, and flexible causal-modeling capabilities beyond the first-generation techniques such as ANOVA and regression analysis [6]. The key advantage of SEM to this research is that it enables estimating complete causal networks simultaneously and be able to include latent variables in causal model. Since this research involves many observed variables, SEM enables the researcher to estimate the effect of latent variables and the effect of one factor to other factors. Thus, the hypotheses testing of the direct effect on parents' intention to use CCR is suitably performed

by SEM technique. The Structural Equation Modeling is advantage for complex model or hierarchical component models. [7] presents the methodology of reporting the results of the reflective-formative type and a two-stage approach. The parents' attitude is important for the decision of CCR usage to their children. [8] studied the parents' attitude toward CCR usage based on the health belief model (HBM) theory. This study aimed to understand parents' attitudes toward CCR usage in developing country without enforcing law of CCR usage to compare the non-users and user parents. The SEM is applied to assess the model's factors that impact the CCR usage for nursery school travel [9]. The considered factors in [9] are socioeconomic status, family travel pattern, traffic safety climate, family structure, child demographics, and road network infrastructure. For Theory Planned behaviors in the research of [10], the purpose of this study is to analyze the psychological characteristics underlying Chinese parents' behaviors in using CCR. The theory of planned behavior (TPB) is extended to perceived accident severity, perceived benefits, and perceived barrier. From the perspective of social psychology, the psychological factors that influence parents' use of child car seats and their interrelationships are explored. Thus, this research focusing on developing the model based on Theory Planned Behaviors, Government Influence, Price Fairness, and Safety Awareness to analyze the casual variables influencing on parents' intention to use CCR.

According to the research survey, most researchers apply SEM and Multiple Regression. The comparison between these two methods has been studied in some research [11]–[13]. The hierarchical multiple regression analysis is implemented to test the relationships of dependent and independent variables of the complicated management model [11], [12]. The comparison between the SEM and MLR is applied in the construction industry research and presents the benefits of each method [13].

Therefore, this research aims to compare SEM and MLR to the casual variables of parents' intention of CCR usage and to obtain the significant results from both methods.

III. RESEARCH METHODOLOGY

The theory of planned behavior (TPB) is the basic theory explaining the principle of consumer choice. TPB is effective in predicting intention and behavior of consumers. There are two fundamental theories relevance to this research: consumer decision patterns and behavior, and theory of planned behavior. The questionnaire composes of seven parts. The first part involves respondents' agreement to join the research and filtering questions for only parents whose children's age is under seven years old. The second,

third, and forth part are the 12 questions based on TPB and composing of 5 questions of attitude (Att), 4 questions of subjective norms (SN) and 3 question of percieved behavioral control (PBC). The fifth part is the government influence issues to evaluate the perception of government policy about the CCR law enforcement, car seat' s price and consumer tax benefit, and the car seat supply by the government. The sixth part is about safety concern. Lastly, the seventh part is about the car seat's price perception of parents. The Research Methodology in figure 1 is the causal network of variables related to parents' intention to use CCR. The Structural Equation Modelling (SEM) enhanced in studying the postulated structuring which is represented by using diagrams containing arrow as shown in figure 1.

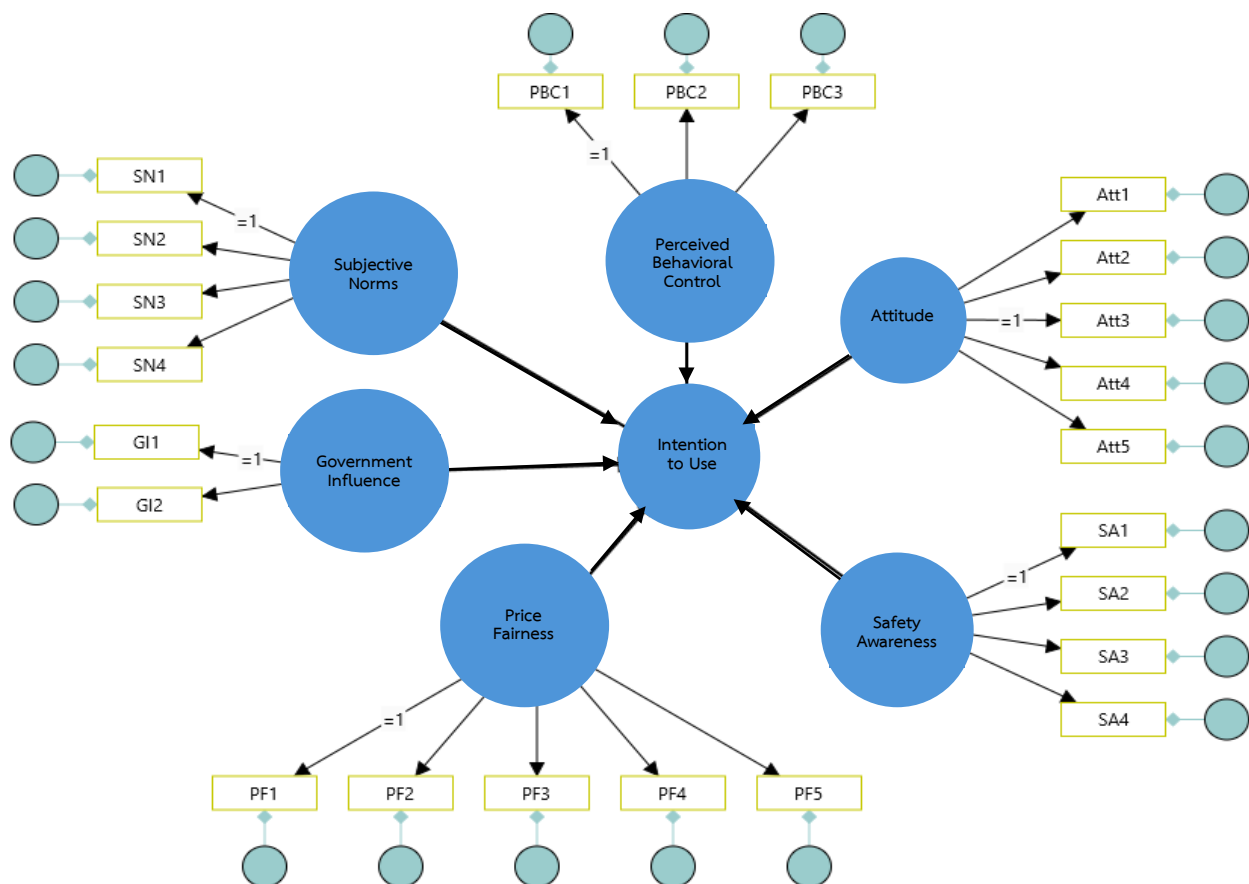


Figure 1: Causal network of variables related to parents' intention to use CCR.

The related hypotheses are as follow:

H1 is attitude influencing on the intention to use CCR.

H2 is subjective norm influencing on the intention to use CCR.

H3 is perceived behavior control influencing on intention to use CCR.

H4 is government influencing on intention to use CCR.

H5 is safety awareness influencing on the intention to use CCR.

H6 is price fairness influencing on the intention to use CCR.

The covariance based structural equation modeling (CB-SEM) is applied to demonstrate that the null hypothesis is insignificant. The data collection tools compose of two sections. The first part is demographic data on parents' gender, age, level of education, salary, income level, address city, acceptable car seat price, number of children, and vehicle type for installation car seat. The second part is the questionnaire adopts Likert's 5-point scoring, with 1–5 representing from "Strongly disagree" to "Completely agree". The survey research questionnaire is conducted according to the Theory of Plan Behavior (TPB), Government Influence, Price Fairness and Safety Awareness to evaluate the parents' intention of buying car seat for their children. The TPB composing of Attitude, Subjective Norms, and Perceived Behavioral Control, is applied to develop the survey questionnaire. The questionnaire composes of seven parts. The first part involves respondents' agreement to join the research and filtering questions for only parents whose children' age is under seven years old. Parents who pass the filtering questions will proceed to the rest of the questionnaire. The analysis method follows the process in figure 2. First, the SEM analysis is conducted to evaluate the relationship of casual variables. Then, the MLR is applied to compare the results to the SEM's results and to obtain well fit predictive equation.

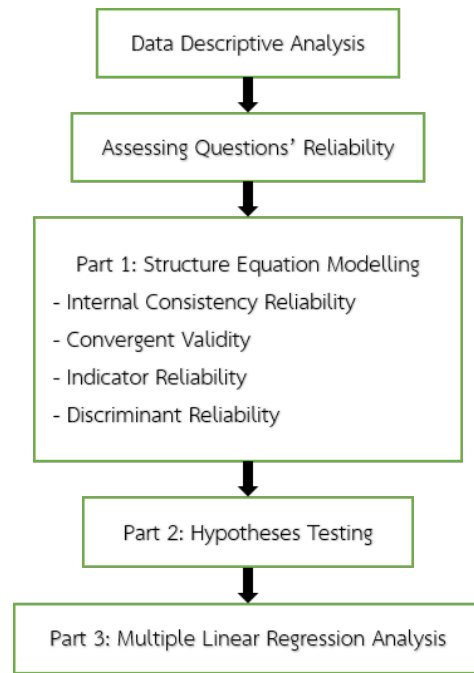


Figure 2: Research methodology.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The samples of parents in Bangkok are randomly selected to answer the research questionnaires during July, 2023. The research questionnaires is approved by three experts to check for the content validity using Item Objective Congruence or IOC. The pilot test of questionnaire is performed with 30 samples and the data is analyzed using Cronbach's alpha with the acceptable level of 0.7 of adequate confidence level [6]. The results as shown in table 1 indicate that all questions are reliable and adequate to study the latent variables because the value of Cronbach's Alpha is between 0.73 to 0.93. The data analysis is divided into 3 parts: the descriptive analysis of sample population, the structural equation modeling with covariance and the hypothesis testing, and the multiple regression analysis to retrieve the prediction model.

Table 1: Cronbach's alpha analysis

Latent Variables	Observed Variables	code	Cronbach's Alpha
Attitude (Att):	1. I think car seat is necessary for safety of children.	Att1	0.89
	2. I think car seat is a valuable product	Att2	
	3. I am interested in searching car seat information	Att3	
	4. Using car seat for child is normal and must strictly compliance	Att4	
	5. I am agreeing with the concept of car seat design for child's safety	Att5	
Subjective Norms (SN):	6. Important person to you also recommend me to use car seat for your children	SN1	0.86
	7. Important person to you also realize the usefulness of using car seat	SN2	
	8. Important person to you also realize that car seat is safety equipment for children	SN3	
	9. Important person to you also realized that car seat can relieve injuries for children.	SN4	
Perceived Behavioral Control (PBC):	10. I have enough budget to buy car seat for my children	PBC1	0.82
	11. I am ready if I must buy car seat for my children to install to my vehicle	PBC2	
	12. I believe that car seat can protect my children	PBC3	
Government Influence (GI):	13. The government explicitly complies the child car restraints	GI1	0.73
	14. Car seat pricing policy supported by the government and the related organization	GI2	
Safety Awareness (SA):	15. I think car accident results in serious injury and death will explicitly relieve if parent use car seat with their child.	SA1	0.85
	16. I realized that car seat is importance for travelling with children	SA2	
	17. My children always ride with car seat	SA3	
	18. I insist my children to use car seat even though they refuse	SA4	
Price Fairness (PF):	19. I think the car seat price is appropriate especially comparing to safety concerning.	PF1	0.86
	20. I agree and trust with the material and design of car seat in the market	PF2	
	21. The car seat price is reasonable for me to buy	PF3	
	22. The car seat price is affordable for other parents	PF4	
	23. The car seat models and price are variety and valid for buying justification of parents.	PF5	
Intention to Use (IU):	24. I plan to buy car seat once I have a child.	IU1	0.93
	25. I plan and ready to buy car seat for my child.	IU2	
	26. Car seat is the important appliance which I certainly supply for my child	IU3	
	27. Even though car seat' price is high but I will certainly purchase for my child.	IU4	
	28. Car seat is the best solution for my child when travelling.	IU5	

A. The Descriptive Analysis of the Participants

The respondents are 316 parents in Bangkok. There are 239 female parents about 75.6 percentage. There are 173 parents (54.7%) with education level of bachelor's degree and higher. The number of participants of 137 have occupation as an employee in private company. Most respondents around 236 people (74.7%) have one child with the age less than 5-year-old. The first objective is to study the significance level of the latent variables according to the results shown in table 2 and table 3.

The interpretation of the mean analysis result is as follow:

- 1.0 to 1.80 is least significance,
- 1.81 to 2.60 is less significance,
- 2.61 to 3.40 is moderate significance,
- 3.41 to 4.20 is high significance, and
- 4.21 to 5.00 is highest significance

From table 2, the result shows that latent variable with the highest significance level to intention to use CCR is Safety Awareness with the average of 4.55. The Theory of Planned Behavioral is the second significance level variable with the average value of 4.42. The results in table 3 indicate that the parents in Bangkok of 316 people intend to use CCR with the highest significance level with mean value of 4.54. The most significant observed variable that effect the intention to use CCR is the "Car seat is the best solution for my child when travelling." with the mean value of 4.63. The second order is "Car seat is the important appliance which I certainly supply for my child." with the mean value of 4.61

Table 2: The significance level of latent variables to parents' intention of using CCR, Bangkok

Latent variables	Mean	SD	Level
Theory Plan Behavior (TPB)	4.42	0.55	highest
Government Influence (GI)	4.08	0.73	high
Safety Awareness (SA)	4.55	0.63	highest
Price Fairness (PF)	3.97	0.78	high

Table 3: The significance level of intention to use CCR of parents in Bangkok

Latent variables	Mean	SD	Level
Intention to Use (IU):	4.54	0.71	highest
1. I plan to buy car seat once I have a child. (IU1)	4.52	0.82	highest
2. I plan and ready to buy car seat for my child. (IU2)	4.41	0.91	highest
3. Car seat is the important appliance which I certainly supply for my child (IU3)	4.61	0.75	highest
4. Even though car seat' price is high but I will certainly purchase for my child. (IU4)	4.53	0.82	highest
5. Car seat is the best solution for my child when travelling. (IU5)	4.63	0.69	highest

B. The Structural Equation Modeling with Covariance (CB – SEM) Analysis

The covariance based structural equation modeling is applied to evaluate the assumed research model (the null hypothesis) whether it is insignificant, meaning that the complete set of paths, as specified in the model that is being analyzed, is plausible. The analysis of Measurement Model is conducted. The construct validity is analyzed, and the results are shown in table 4 and figure 3.

Table 4: The construct validity analysis's results

Latent Variables	Observed variables	Factor Loading	CR	AVE
Attitude (Att):	Att1	0.84	0.90	0.65
	Att2	0.81		
	Att3	0.75		
	Att4	0.82		
	Att5	0.79		
Subjective Norms (SN):	SN1	0.76	0.86	0.61
	SN2	0.86		
	SN3	0.76		
	SN4	0.72		

Table 4: The construct validity analysis's results (Cont.)

Latent Variables	Observed variables	Factor Loading	CR	AVE
Perceived Behavioral Control (PBC):	PBC1	0.84	0.86	0.65
	PBC2	0.94		
	PBC3	0.6		
Government Influence (GI):	GI1	0.85	0.73	0.6
	GI2	0.68		
Safety Awareness (SA):	SA1	0.75	0.85	0.59
	SA2	0.76		
	SA3	0.81		
	SA4	0.74		
Price Fairness (PF):	PF1	0.66	0.87	0.57
	PF2	0.71		
	PF3	0.87		
	PF4	0.79		
	PF5	0.72		
Intention to Use (IU):	IU1	0.88	0.93	0.74
	IU2	0.81		
	IU3	0.88		
	IU4	0.82		
	IU5	0.77		

The values of Average Variance Extracted (AVE) in table 4 are between 0.67 to 0.74 and the loading values are greater than 0.5 which indicates that the constructed model is capturing a significant amount of variance and is a reliable measure of the parents' intention to use CCR. In figure 3, the AVE values are as shown in the nodes and the loading values are shown on the arcs. For the discriminant validity, the Heterotrait-monotrait (HTMT) ratio of correlations analysis, are analyzed as shown in table 5.

Table 5: The discriminant validity analysis results

Heterotrait-monotrait (HTMT) ratio of correlations							
	Att	GI	IU	PBC	PF	SA	SN
Att	-	-	-	-	-	-	-
GI	0.09	-	-	-	-	-	-
IU	0.74	0.12	-	-	-	-	-
PBC	0.61	0.11	0.81	-	-	-	-
PF	0.37	0.38	0.59	0.55	-	-	-
SA	0.74	0.20	0.86	0.67	0.57	-	-
SN	0.57	0.21	0.43	0.42	0.37	0.47	-

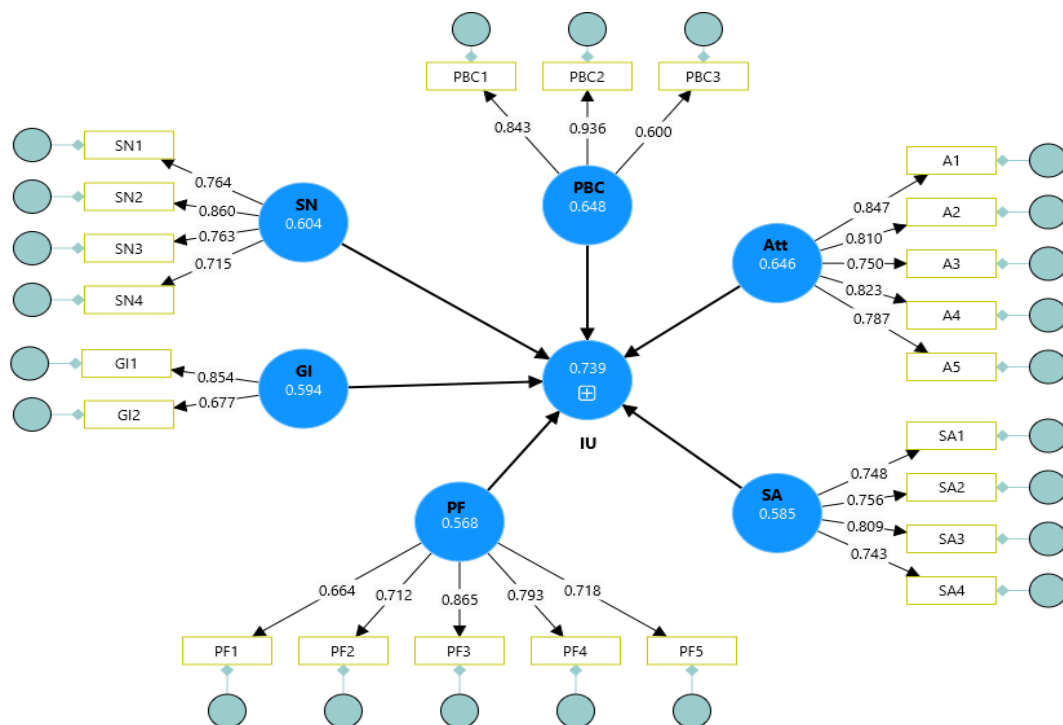


Figure 3: The construct validity analysis showing the loading values on arcs and AVE on nodes.

C. The Hypotheses Analysis

The hypotheses testing results are shown in table 6.

Table 6: The hypotheses analysis results

Direct Effect Testing	Path Coefficient		P- value
	Unstandardized	Standardized	
	b	β	
H1: ATT $\rightarrow$ IU	0.32	0.179**	0.009
H2: SN $\rightarrow$ IU	-0.06	-0.068	0.131
H3: PBC $\rightarrow$ IU	0.22	0.273***	< .001
H4: GI $\rightarrow$ IU	-0.03	-0.044	0.331
H5: SA $\rightarrow$ IU	0.81	0.526***	< .001
H6: PF $\rightarrow$ IU	0.13	0.113*	0.024
$R^2 = 0.798$			

Noted: *p-value < 0.05, ** p-value < 0.01, ***p-value < 0.001.

The direct effect testing according to the null hypotheses are analyzed and presented as the path coefficient or β values in table 6 and figure 4. Firstly, the path coefficients' results show the positive direct relation of two paths at the significance level of 0.001 which are Perceived Behavior Control (PBC) and Safety Awareness

(SA), one path at the significance level of 0.01 which is Attention (ATT), and one path at the significance level of 0.05 which is Price Fairness (PF). While the Subjective Norm (SN) and the Government Influence (GI) are negative path coefficient values.

Secondly, according to the direct effect testing, the results are as follow. Attitude influences on intention to use CCR (H1), since p-value is less than 0.01. Subjective norm does not influence on intention to use CCR (H2) (p-value =0.131). Perceived behavior control influences on intention to use CCR (H3), since p-value is less than 0.001. The government influence does not influence on intention to use CCR (H4) (p-value =0.331). Safety awareness influences on intention to use CCR (H5), since p-value is less than 0.001. Price fairness influences on intention to use CCR (H6), since p-value is less than 0.05.

The third objective is to study the causal variables which influence on the intention of parents in Bangkok on using CCR. From the results in table 6, the causal variable that most influence on intention to use CCR is Safety Awareness (SA), since the value of β is 0.526.

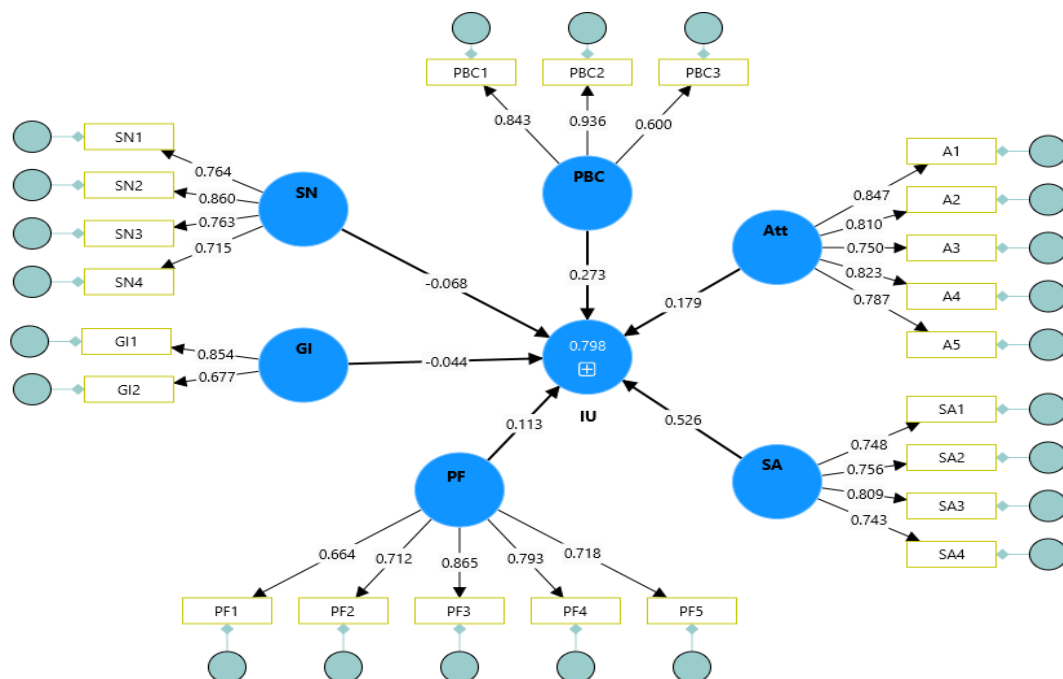


Figure 4: The hypotheses analysis results showing the path coefficients on the arcs.

Table 7: Analysis of variance of the multiple linear regression model

Model	Unstandardized Coefficients		Std. Coefficients	t	Significance P-value
	Beta	Std. Error	Beta		
Constant	0.426	0.159		-2.684	0.008
X ₁ : Attitude	0.195	0.047	0.154	4.123	0.000
X ₂ : Subjective Norm	0.047	0.032	0.047	-1.481	0.139
X ₃ : Perceived Behavioral Control	0.264	0.040	0.254	6.625	0.000
X ₄ : Government Influence	0.026	0.029	0.025	0.896	0.371
X ₅ : Safety Awareness	0.565	0.043	0.504	13.111	0.000
X ₆ : Price Fairness	0.110	0.029	0.116	3.773	0.000

The next casual variable influencing on intention to use is Perceived Behavior Control with β value of 0.273. The path coefficients (β) are presented in figure 4. The higher value represents more direct effect to intention to use.

D. The Results Comparison between SEM and Multiple Linear Regression Analysis

According to the research results of [2], the regression analysis performed on the data of this research is shown in table 7. The analysis of variance indicates that X₁ (Attitude), X₃ (Perceived Behavioral Control), X₅ (Safety Awareness), X₆ (Price Fairness) are significant to the dependent variable which is parent's intention to use CCR.

Table 8: The regression model summary

Model	R	R-square	Adjusted R-Square	Std. Error of the Estimate
1	0.873 ^a	0.762	0.759	0.35950

From table 8, R-square and adjusted R-square measures the goodness of fit of a regression model. The higher R-square which close to 1.0 indicate the model is a good fit. The different between these two terms is R-squared tends to increase as more variables are added to the model even if they don't improve the model significantly, while adjusted R-square penalizes

the addition of unnecessary variables. The results in table 8 indicate that the regression model in table 7 is well fit. The fitting model which represents the data, has the p-value less than 0.05 (testing value of 95% of confident level) as shown in equation (1).

$$Y = -0.426 + 0.195X_1 + 0.264X_3 + 0.565X_5 + 0.110X_6 \quad (1)$$

Even though the results are resemblance to the results of Structural Equation Modeling, the reliability of regression analysis is only the correlation coefficient value (R) in table 8, which represent the adequacy of the model. On the other hand, systematic analysis of SEM technique gives better understand and well evaluates the adequacy, reliability, and validity of each casual variable.

The SEM is more efficient to analyze effect of the latent variable and the complicate relationship of casual variables according to developing path network. However, the response variable consists of five latent variables (IU1 to IU5) according to table 9. The individual latent variable of intention to use is interesting to perform the regression analysis.

E. The Multiple Regression Analysis Results of Latent Variables of the Intention to Use

The regression analysis is performed on five latent variables of the intention to use. Each question represents Y_i as follow:

Y_1 is "I plan to buy car seat once I have a child."

Y_2 is "I plan and ready to buy car seat for my child."

Y_3 is "Car seat is the important appliance which I certainly supply for my child."

Y_4 is "Even though car seat' price is high, but I will certainly purchase for my child."

Y_5 is "Car seat is the best solution for my child when travelling."

The objective is to examine the relationship between the response variables (Y_i) and the predictor variables which are Attitude (Att), Planned Behavioral Control (PBC), Safety Awareness (SA), and Price Fairness (PF). The normality assumption checking is performed by normality test (Shapiro-Wilk), and the p-value is less than 0.001 for all multiple dependent variables. Thus, the normality assumption is valid. The analysis of

variance results are shown in table 9. The correlation coefficients (R and R-sq, and R-sq adj) of every model of Y_1 to Y_5 are high. The linear regression model of Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , and Y_5 are presented as equation 2, 3, 4, and 5, respectively. According to the analysis of variance in table 9, the Price Fairness (PF) has the p-value greater than 0.05 significant level, therefore, the PF variable is not significant to the predictor model. The Y_1 , Y_2 , Y_3 , and Y_4 prediction equations are following.

- 1) I plan to buy car seat once I have a child.
- 2) I plan and ready to buy car seat for my child.
- 3) Car seat is the important appliance which I certainly supply for my child.
- 4) Even though car seat' price is high, but I will certainly purchase for my child.

Table 9: The results of multiple linear regression analysis

			Model Coefficients					Model fit Measures		
			Intercept	Att	PBC	SA	PF	R	R-sq	R-sq (adj)
1. I plan to buy car seat once I have a child. (IU1)	Y_1	Estimate	0.0444	0.2117	0.1988	0.6007	-0.0055	0.829	0.688	0.684
		SE	0.1915	0.0577	0.0508	0.0539	0.0339			
		Lower	-0.3326	0.0981	0.0989	0.4947	-0.0722			
		Upper	0.4214	0.3252	0.2987	0.7067	0.0612			
		t-value	0.23	3.67	3.92	11.15	-0.16			
		p-value	0.817	< .001	< .001	< .001	0.871			
2. I plan and ready to buy car seat for my child. (IU2)	Y_2	Estimate	-0.5566	1.4970	0.3668	0.5679	0.0434	0.816	0.666	0.661
		SE	0.2254	0.0716	0.0565	0.0641	0.0392			
		Lower	-1.0003	0.0089	0.2555	0.4417	-0.0337			
		Upper	-0.113	0.291	0.478	0.694	0.120			
		t-value	-2.47	2.09	6.49	8.86	1.11			
		p-value	0.014	0.037	< .001	< .001	0.268			
3. Car seat is the important appliance which I certainly supply for my child (IU3)	Y_3	Estimate	0.2136	0.2245	0.1121	0.5987	0.0499	0.845	0.714	0.711
		SE	0.1731	0.0519	0.0427	0.0492	0.0304			
		Lower	-0.1271	0.1224	0.0281	0.5018	-0.0100			
		Upper	0.554	0.327	0.196	0.696	0.110			
		t-value	1.23	4.33	2.62	12.16	1.64			
		p-value	0.218	< .001	0.009	< .001	0.102			

Table 9: The results of multiple linear regression analysis (Cont.)

			Model Coefficients					Model fit Measures		
			Intercept	Att	PBC	SA	PF	R	R-sq	R-sq (adj)
4. Even though car seat' price is high but I will certainly purchase for my child. (IU4)	Y ₄	Estimate	-0.1901	0.2965	0.2179	0.4893	0.0630	0.855	0.731	0.727
		SE	0.1769	0.0530	0.0441	0.0488	0.0303			
		Lower	-0.53813	0.19217	0.13108	0.39324	0.00338			
		Upper	0.158	0.401	0.305	0.585	0.123			
		t-value	-1.07	5.59	4.94	10.02	2.08			
		p-value	0.283	< .001	< .001	< .001	0.058			
5. Car seat is the best solution for my child when travelling. (IU5)	Y ₅	Estimate	0.0200	0.3465	0.0971	0.4946	0.0921	0.856	0.733	0.729
		SE	0.1668	0.0498	0.0428	0.0468	0.0294			
		Lower	-0.095	0.285	0.089	0.397	-0.015			
		Upper	0.368	0.423	0.213	0.526	0.064			
		t-value	0.12	6.96	2.27	10.56	3.13			
		p-value	0.905	< .001	0.024	< .001	0.002			

$$Y_1 = 0.21169X_1 + 0.19883X_3 + 0.60069X_5 \quad (2)$$

$$Y_2 = -0.5566 + 0.1497X_1 + 0.3668X_3 + 0.5679X_5 \quad (3)$$

$$Y_3 = 0.2245X_1 + 0.1121X_3 + 0.5987X_5 \quad (4)$$

$$Y_4 = 0.2965X_1 + 0.2179X_3 + 0.4893X_5 \quad (5)$$

However, for question 5) which is “Car seat is the best solution for my child when travelling.”, the p-value is 0.002, which indicate the significance of price fairness to this question. Parents’ decision about the best car seat depends on not only the product performance and quality but also the price as well. The prediction equation of the intention to use along this question presented by equation (6).

$$Y_5 = 0.3465X_1 + 0.0971X_3 + 0.4946X_5 + 0.0921X_6 \quad (6)$$

In summarized, the parents’ decision basically bases on the safety awareness, their attitude, and the perceived behavioral control. The Price of car seat is not much significant influence on parents’ decision. In addition, the parent’ intention of using car seat can be predicted by the proposed equation from the multiple linear regression analysis.

The stepwise regression method is applied to the results from the analysis of variance of the multiple linear regression model as shown in table 7 to finalize the predictive equation.

F. The Stepwise Regression Analysis

The terms in the full linear equation (1) are reduced by cutting the independent variable that has the highest p-value one by one. Therefore, the model’s variables are reduced as the results shown in table 10. The final model is presented as equation (7). The dependent variable (Y) representing parents’ intention of car seat usage can be predicted from the score of parents’ attitudes (X₁), Perceived Behavioral Control (X₃), and Safety Awareness (X₅). The coefficient of each independent variable represents the weight of each factor.

$$Y = 0.260X_1 + 0.212X_3 + 0.530X_5 \quad (7)$$

Table 10: The results of stepwise regression analysis

Model	Unstandardized Coefficients		Std. Coefficients	t	P-value
	Beta	Std. Error	Beta		
Constant	-0.083	0.136	-	-0.609	0.543
X ₁ : Attitude	0.285	0.042	0.260	6.771	0.000
X ₃ : Perceived Behavioral Control	0.203	0.036	0.212	5.638	0.000
X ₅ : Safety Awareness	0.543	0.038	0.530	14.114	0.000

V. CONCLUSION

The systematic analysis of Structural Equation Modelling can test the plausibility of the entire causal relationship of parents' intention to use child car restraint. The effect of latent variables is presented with the factor loading values. The safety awareness, perceived behavioral control, attitude, and price fairness are the factors influencing on the parents' intention to use child car restraint. However, the effect of price fairness is less significant than the safety awareness, attitudes, and perceived behavioral control. The regression analysis gives the same results as the SEM's results. Parents' intention of CCR usage can be predicted by the developed model of stepwise regression analysis. The proposed equation in (7) represents the linear relationship of three factors which are attitudes, perceived behavioral control, and safety awareness. Therefore, we can predict the parents' intention of CCR usage according to the equation.

ACKNOWLEDGEMENT

This research is granted by the Mitsui Sumitomo Insurance Welfare Foundation Research in the fiscal year of 2023.

REFERENCES

- [1] Thai RSC, "Statistical Comparison of Road Accidents in Thailand (in Thai)," Road Accident Victims Protection, Bangkok, Thailand, [Online]. Available: <https://www.thairsc.com/da-ta-compare>
- [2] S. Suwannawong, P. Chomchark, and A. Supithak, "The study of awareness of child car restraint compliance and the prediction of parents' intention to use in Thailand," in *Proc. 49th Int. Congr. Sci. Technol. and Technol.-based Innov.*, Songkla, Thailand, Jan. 2024, pp. 241–247.
- [3] R. M. R. Tan *et al.*, "Parental knowledge and beliefs on the use of child car restraints in Singapore: a qualitative study," *Singapore Med. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 102–107, 2020.
- [4] Y. Sun *et al.*, "Analysis of factors influencing the use of child restraint system by parents of children aged 0–6 years: an information, motivation, behavioral skills model-based cross-sectional study," *BMC Pediatr.*, vol. 23, Jan. 2023, Art. no. 2, doi: 10.1186/s12887-022-03827-9.
- [5] K. Meksagul, S. Prakaiwichien, and A. Boonsue, "The prediction model of pm_{2.5} in Phayao province," (in Thai), *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 11, no. 2, pp. 114–124, Dec. 2023.
- [6] P. B. Lowry and J. Gaskin, "Partial Least Squares (PLS) Structural Equation Modeling (SEM) for building and testing behavioral causal theory: When to choose it and how to use it," *IEEE Trans. Prof. Commun.*, vol. 57, no. 2, pp. 123–146, Jun. 2014.
- [7] C. Jhantasana, "Methods of reporting research results of second-order construct of PLS-SEM," (in Thai), *Chulalongkorn Bus. Rev.*, vol. 42, no. 3, pp. 39–67, 2020.
- [8] T. Champahom, S. Jomnonkwao, W. Thotongkam, P. Jongkol, P. Rodpon, and V. Ratanavaraha, "Investigating parents' attitudes towards the use of child restraint systems by comparing non-users and user parents," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, Feb. 2023, Art. no. 2896.
- [9] I. Armouti, R. Ezzati Amini, and C. Antoniou, "Modelling factors that impact the use of child safety seats for nursery school travel," *Traffic Saf. Res.*, vol. 3, Jul. 2022, Art. no. 00018, doi: 10.55329/kcgl3326.



- [10] K. Jiang, Y. Wang, Z. Yu, Z. Feng, and Z. Huang, "The use of car safety seats for children in China: A questionnaire survey based on the theory of planned behavior," *Traffic Injury Prevention*, vol. 24, no. 5, pp. 414–422, 2023.
- [11] E. W. L. Cheng, "SEM being more effective than multiple regression in parsimonious model testing for management development research," *J. Manag. Develop.*, vol. 20, no. 7, pp. 650–667, 2001.
- [12] K. Nusair and N. Hua, "Comparative assessment of structural equation modeling and multiple regression research methodologies: E-commerce context," *Tourism Manage.*, vol. 31, no. 3, pp. 314–324, Jun. 2010.
- [13] N. Chantama and P. Wethyavivorn, "The comparison of utilization of multiple regression with structural equation model in construction industry research," (in Thai), *Kasetsart Eng. J.*, vol. 29, no. 98, pp. 1–8, 2016.

การใช้แถบยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดเสาตอม่อ สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชิษณุาศุ บุญมี¹ ปรัชญา ยอดดำรงค์^{2*} ณัฐวุฒิ ไชยวิโน³

¹ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร,
ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตอุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

³ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : pruchaya_yo@rmutto.ac.th

รับต้นฉบับ : 1 เมษายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 16 กรกฎาคม 2567; ตอบรับบทความ : 7 สิงหาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

การซ่อมบำรุงและเสริมกำลังเสาตอม่อสะพานที่ชำรุดจากการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมนั้นได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง มีการนำเสนอวิธีการหลายวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเสริมกำลังมีราคาค่อนข้างสูง ในบางกรณีการใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาง่ายและมีราคาต่ำเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนเสาตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรง โดยจำลองเสาที่มีขนาดเทียบเท่าเสาตอม่อของสะพานที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของกรมทางหลวง เสาตัวอย่างควบคุมมีปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ 1.2% ซึ่งเป็นปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดในเสาตอม่อที่ใช้งานจริง ตัวอย่างเสา 3 ต้น ถูกทดสอบภายใต้แรงดัดและแรงอัดตามแนวแกน โดยแต่ละตัวอย่างมีวิธีการเสริมกำลังแตกต่างกัน ประกอบด้วย การเสริมเหล็ก 100% ของปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด การเสริมเหล็ก 25% ของปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด และการเสริมเหล็ก 25% ของปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดพร้อมทั้งเสริมแถบยางพาราอัดแรง จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรงสามารถเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดได้ถึง 46.5% และผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองโดยโปรแกรม Response-2000 แสดงค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ

คำสำคัญ : สะพาน แผ่นยางพารา การเสริมกำลัง

The Use of Prestressed Rubber Pads for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Bridge Pier

Chichaya Boonmee¹ Pruchaya Yoddumrong^{2*} Natawut Chaiwino³

¹*Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand*

^{2*}*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthen Thawai Campus, Bangkok, Thailand*

³*Department of Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: pruchaya_yo@rmutto.ac.th

Received: 1 April 2024; Revised: 16 July 2024; Accepted: 7 August 2024

Published online: 26 December 2024

Abstract

Repairing and strengthening damaged bridge piers with the loss of the cross-sectional area of the rebar due to rusting has been studied extensively. Several effective methods have been proposed and are widely used. However, most of the materials used for strengthening are quite expensive. Locally available and low-cost materials sometimes are more appropriate alternatives for structural reinforcement. This research aims to study flexural behavior of reinforced concrete bridge piers strengthened using prestressed rubber pads. Samples replicated existing piers of bridges under the responsibility of the Department of Highways were constructed. The percentage of rebars in the control specimen is 1.2%, equal to the minimum percentage of rebars in the existing bridge piers. Three samples were tested under flexure and axial load. Each test specimen had a different reinforcement quantity and approach consisting of 100% of the minimum steel reinforcement amount, 25% of the minimum steel reinforcement amount, and 25% of the minimum steel reinforcement amount along with prestressed rubber pads. The test results showed that strengthening of bridge piers using prestressed rubber pads can increase flexural strength by 46.5% and the analysis results from Response-2000 software provided the flexural capacities of the specimens relevant to those from the experiment.

Keywords: Bridge, Rubber pad, Strengthening

1) บทนำ

ในปัจจุบันภาครัฐให้ความสำคัญกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างมาก โดยเฉพาะการสร้างระบบโครงสร้างเพื่อการคมนาคม ได้แก่ ถนน อุโมงค์ สะพาน เป็นต้น ในประเทศไทย สะพานถือเป็นหนึ่งในสิ่งก่อสร้างที่มีการสร้างขึ้นจำนวนมากและหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสะพานเหล่านี้ได้มีการก่อสร้างและใช้งานมาอย่างยาวนานส่งผลให้โครงสร้างมีการเสื่อมสภาพ

เป็นที่ทราบกันดีว่าปริมาณการใช้งานและน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น หรือบางครั้งมีการบรรทุกเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด รวมถึงผลกระทบจากภัยธรรมชาติ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ความสามารถใช้งาน ตลอดจนความทนทานของสะพาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องซ่อมบำรุงสะพานด้วยการเสริมกำลังโครงสร้าง ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงและเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก โดยมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีฉีกเกิดคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีฉีกเกิดเหล็ก วิธีลวดอัดแรงภายนอก เป็นต้น [1]–[4] อย่างไรก็ตามวิธีที่ได้รับการยอมรับสูงในปัจจุบันคือการใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนเสริมกำลัง (Carbon fiber reinforced polymer: CFRP) เพราะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ทนทานและติดตั้งง่าย อีกทั้งมีงานวิจัยจำนวนมากบ่งชี้ว่าเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการเสริมกำลังสามารถใช้ได้กับโครงสร้างหลายประเภทและด้านทนแรงกระทำได้หลายชนิดทั้งแรงอัด แรงดัดและแรงเฉือน [5]–[10] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างโดยการนำแถบเส้นใยคาร์บอนมาอัดแรง (Prestressed CFRP plate) เพื่อให้ระบบการเสริมกำลังทำงานทันทีซึ่งเป็นการเสริมกำลังเชิงรุก (Active strengthening) และเพื่อคงสภาพของวัสดุมาใช้งานได้มากขึ้น [11], [12] แต่ข้อเสียคือแผ่นเส้นใยคาร์บอนมีราคาสูงมาก จึงไม่เหมาะกับการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีงบประมาณจำกัด

สะพานในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงจำนวนมากที่ตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลหรือแม่น้ำประสบปัญหาการแตกร้าวและหลุดล่อนของคอนกรีตตอม่อสะพาน ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักและความปลอดภัยในการใช้งานสะพาน โดยหนึ่งในสาเหตุหลักเกิดจากการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตทำให้เหล็กเสริมถูกกัดกร่อนและเป็นสนิม ปริมาตรของเหล็กที่เป็นสนิมจะเพิ่มขึ้นจึงเกิดแรงดันคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแตกและหลุดล่อนจากภายใน ดังแสดงในรูปที่ 1

การป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมจากการแทรกซึมของคลอไรด์เพื่อแก้ปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตตอม่อสะพานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้มีความทึบน้ำมากขึ้นโดยใส่สารผสมเพิ่มการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยสารกันน้ำจำพวกซิลาน (Silane) [13] หรือการป้องกันเหล็กเสริมโดยตรง เช่น การใช้เหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซี (Epoxy) หรือการใช้เหล็กเสริมกัลวาไนซ์ (Galvanized steel) อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูงและเหมาะกับงานก่อสร้างใหม่ เมื่อนำมาใช้กับงานซ่อมแซมมักเกิดความบกพร่องในการเชื่อมประสานโครงสร้างใหม่กับโครงสร้างเดิม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันเหล็กเสริมของแต่ละวิธีมีความแปรปรวนสูง ดังนั้นการนำวิธีดังกล่าวมาใช้ซ่อมตอม่อสะพานที่แตกร้าวเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเสาเรียงขนาดเล็กหน้าตัด 40×40 ซม. สำหรับรองรับสะพานช่วงสั้นจึงไม่คุ้มค่า ปัจจุบันกรมทางหลวงซ่อมตอม่อสะพานประเภทเสาเรียงด้วยวิธีการสกัดคอนกรีตส่วนที่แตกร้าวออก ในกรณีที่จำเป็นจะทำการตัดต่อเปลี่ยนเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากนั้นจะเทคอนกรีตซ่อมแซมส่วนที่สกัดออกโดยเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตให้หนาขึ้นเพื่อชะลอการแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะไปสู่เหล็กเสริม อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้แก่โครงสร้างด้วย อีกทั้งคอนกรีตบริเวณที่เพิ่มระยะหุ้มมีความเสี่ยงที่จะแตกร้าวเนื่องจากการโก่งดัดของเสา ซึ่งจะทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตง่ายขึ้น การป้องกันด้วยวิธีนี้จึงยังไม่เห็นผลชัดเจน ตอม่อเสาเรียงหลายแห่งที่ได้รับการซ่อมแซมโดยการเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตยังคงแตกร้าวเนื่องจากคลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมหลังจากซ่อมแซมเสร็จได้เพียงไม่นาน



รูปที่ 1 : การแตกร้าวของคอนกรีตตอม่อสะพาน

การซ่อมบำรุงสะพานจำเป็นที่จะต้องของงบประมาณประจำปี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาค่อนข้างมาก ทำให้สะพานที่ชำรุดบางแห่งต้องปิดการใช้งานหรือจำกัดการใช้งานเพื่อความปลอดภัย ดังนั้นการเสริมกำลังโครงสร้างหรือซ่อมแซมสะพานแบบชั่วคราวแต่เร่งด่วนจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยวิธีการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมนั้นต้องไม่ซับซ้อนและหน่วยงานราชการที่รับผิดชอบสามารถดำเนินการได้ทันทีโดยไม่ต้องรออนุมัติงบประมาณในการจ้างบุคคลภายนอก

การนำวัสดุที่หาง่ายและมีราคาถูกในประเทศมาใช้ทดแทนในการเสริมกำลังชิ้นส่วนต่อม่อสะพานแบบชั่วคราวถือเป็นหนึ่งในทางเลือกที่ดี ซึ่งในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับการนำยางพารามาใช้ประโยชน์กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากยางพารามีราคาถูกภาครัฐจึงให้ความสำคัญในการพัฒนาวัสดุยางพาราเพื่อนำมาเพิ่มมูลค่า อีกทั้งยางพาราเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสามารถเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น ช่วยลดการแตกร้าวของชิ้นส่วนโครงสร้าง และช่วยลดการสั่นไหวของคานได้ [14], [15] อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนายางพาราเพื่อนำมาเสริมกำลังโครงสร้างยังมีอยู่อย่างจำกัด

เสาต่อม่อสะพานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นโครงสร้างสะพานที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานและแพร่หลายทั่วประเทศ การออกแบบวิธีการเสริมกำลังเบื้องต้นให้กับสะพานชนิดนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ทำให้สะพานสามารถใช้งานต่อได้ชั่วคราวอย่างปลอดภัยระหว่างรออนุมัติงบประมาณในการซ่อมแซมอย่างถาวรต่อไป

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำวัสดุยางพาราอัดแรงมาใช้เสริมกำลังของโครงสร้างเสาสะพานโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ภายใต้แรงดัดของชิ้นส่วนเสาต่อม่อสะพานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เหล็กเสริมภายในเกิดความเสียหายรุนแรงแต่ไม่มีการเสริมกำลัง และเหล็กเสริมภายในเกิดความเสียหายรุนแรงแล้วมีการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราอัดแรง โดยเปรียบเทียบกับเสาต่อม่อสะพานที่ไม่มีความเสียหายรวมถึงเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาต่อม่อสะพานโดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ

3) วิธีดำเนินการวิจัย

เสาที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ซึ่งกำหนดขนาดตามขนาดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของสะพานจากกรมทางหลวงเท่ากับ $40 \times 40 \times 300$ ซม. การเสริมเหล็กตามยาวและเหล็กตามขวางในงานวิจัยนี้เป็นไปตามแบบก่อสร้างของกรมทางหลวงโดยมีการกลึงลดขนาดเหล็กเสริมตามยาวช่วงกึ่งกลางเสาในบางตัวอย่างทดสอบเพื่อจำลองความเสียหายและการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริม เหล็กเสริมตามยาวและตามขวางเป็นเหล็กเกรด SD40 และ SR24 ตามลำดับ เสาตัวอย่างควบคุมมีจำนวน 1 ต้น (รหัสตัวอย่างคือ C-100) ซึ่งไม่ได้กลึงลดขนาดเหล็กเสริมและมีปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ 1.2% การกลึงลดขนาดเหล็กเสริมให้พื้นที่หน้าตัดลดลงเหลือ 25% จะทำในช่วงกึ่งกลางเสาเป็นระยะเท่ากับ 60 ซม. และหาซิลิโคนในช่วงที่กลึงลดขนาดเพื่อลดแรงยึดเกาะระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต เหล็กเสริมที่กลึงแล้วแสดงดังรูปที่ 2 ตัวอย่างเสาทดสอบที่ลดปริมาณเหล็กเสริมมีจำนวน 2 ต้น โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างเสาที่ไม่มีการเสริมและมีการเสริมแถบยางพาราอัดแรง (รหัสตัวอย่างทดสอบคือ C-25 และ C-25R ตามลำดับ) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้แถบยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังโครงสร้างเสา ตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 3 ต้น รับแรงอัดตามแนวแกน 4 ต้น จากลวดอัดแรงเพื่อจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน รายละเอียดตัวอย่างเสาแสดงในตารางที่ 1 และรายละเอียดตัวอย่าง C-25 แสดงดังรูปที่ 3 การเสริมกำลังชิ้นส่วนสะพานด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงได้ถูกออกแบบและทดสอบการใช้งานมาแล้วหลายรูปแบบจนกระทั่งได้วิธีการที่เหมาะสม โดยแผ่นยางพาราจำนวน 4 แผ่น ซึ่งเป็นแผ่นยางเกรด Hardness 60 ขนาดกว้าง 20 ซม. x ยาว 50 ซม. x หนา 4 ซม. ถูกติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางเสาคอนกรีตตามแนวยาวทั้ง 4 ด้าน โดยขั้นตอนการติดตั้งเริ่มจากการนำแผ่นยางพารามาตั้งให้มีการยึดตัวเป็น 2 เท่า จากความยาวเดิมด้วยแม่แรงไฮดรอลิกและติดอุปกรณ์จับยึดแบบชั่วคราวเพื่อให้แผ่นยางมีการยึดตัวค้างไว้ จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์จับยึดแบบถาวรอีกชุดเพื่อยึดแผ่นยางกับตัวอย่างทดสอบด้วยสลักเกลียว แล้วจึงปลดอุปกรณ์จับยึดชั่วคราวออกเพื่อให้แผ่นยางพาราคืนตัวและถ่ายแรงเข้าสู่เสา แถบยางพาราที่ติดตั้งด้านบนและด้านล่างจะตรงกันและมีตำแหน่งเยื้องจากแถบยางที่ติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังเป็นระยะ 10 ซม. เพื่อป้องกันการกระแทกของคอนกรีตหุ้มเสา ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 : รายละเอียดตัวอย่างเสาทดสอบ

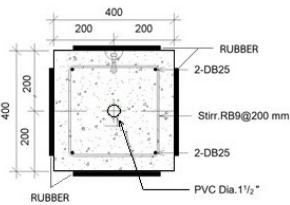
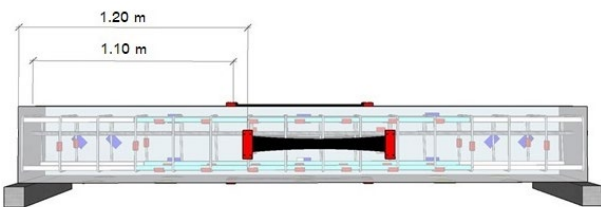
ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดเสาทดสอบ (ซม.)	เหล็กเสริมตามยาว	ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวช่วงกลางเสา (ซม ²)	เหล็กเสริมตามขวาง	แรงอัดตามแนวแกน (ตัน)	จำนวนแผ่นยางพาราอัดแรง
C-100	40x40x300	4-DB25	19.6	RB9@20 ซม.	4	-
C-25	40x40x300	4-DB25	4.9	RB9@20 ซม.	4	-
C-25R	40x40x300	4-DB25	4.9	RB9@20 ซม.	4	4



รูปที่ 2 : เหล็กเสริมที่กลึงช่วงกึ่งกลาง

ตารางที่ 2 : คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย (กก./ซม ²)
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c)	242
กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (f_y)	5074
กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมตามยาว (f_u)	6110
กำลังดึงประลัยของแผ่นยางพารา ($f_{u,R}$)	10.2

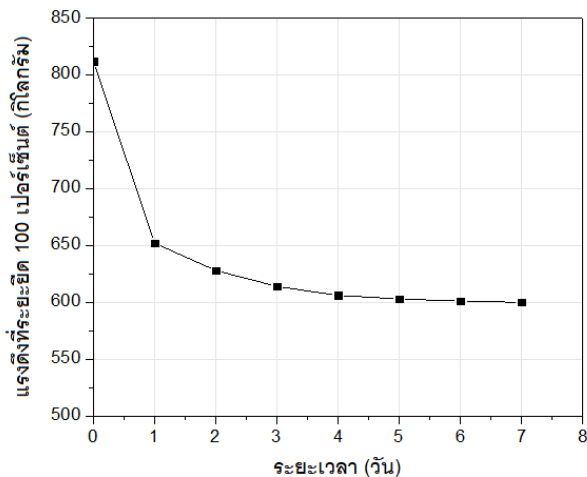


รูปที่ 3 : รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

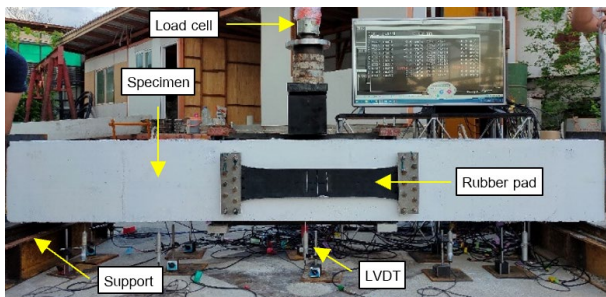


รูปที่ 4 : ตัวอย่างทดสอบที่ติดตั้งแผ่นยางพาราอัดแรง

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยกำลังอัดประลัยเฉลี่ยของคอนกรีต กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยที่จุดครากและกำลังรับแรงดึงประลัยเฉลี่ยของเหล็กเสริม รวมถึงกำลังรับแรงดึงประลัยของแถบยางพาราที่ได้จากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบแถบยางพารา 3 ตัวอย่าง จากผลการทดสอบพบว่าแถบยางพาราสามารถรับแรงดึงได้ประมาณ 800 กิโลกรัม ที่ระยะยืด 100% โดยหากยืดเกินระยะนี้แผ่นยางจะเสียรูปมาก ทำให้ไม่เหมาะต่อการติดตั้งกับโครงสร้าง [15] ในการใช้งานจริงแถบยางพาราจะถูกยึดติดกับโครงสร้างเป็นระยะเวลานาน เมื่อเวลาผ่านไปแผ่นยางพาราที่ถูกดึงค้างไว้จะมีการเสื่อมถอยของแรงดึงหรือมีการคลายตัวของแผ่นยาง จากการทดสอบการค้างแรงดึงเป็นเวลา 7 วัน พบว่าแรงดึงในแผ่นยางลดลงมากในช่วง 3 วันแรก และค่อนข้างคงที่เมื่อผ่านไป 5 วัน โดยแรงดึงลดลงเหลือ 75% ของแรงดึงตั้งต้นเมื่อครบ 7 วัน [16] ดังนั้นในการใช้งานจริงจะพิจารณาแรงดึงในแถบยางเท่ากับ 600 กิโลกรัม รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่ลดลงในแผ่นยางและระยะเวลาหลังจากเริ่มดึงแผ่นยาง



รูปที่ 5 : ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงแผ่นยางและเวลา [16]



รูปที่ 6 : การติดตั้งการทดสอบ

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของเสาสะพานถูกออกแบบให้ตัวอย่างเสารับแรงดัดคงที่จากลวดอัดแรง และรับโมเมนต์ดัดโดยวางเสาในแนวราบและให้แรงกระทำในแนวตั้งที่กึ่งกลางเสาด้วยแม่แรงไฮดรอลิก เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกในการควบคุมการทดสอบ ตัวอย่างเสาวางบนฐานรองรับซึ่งอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านโดยไม่ได้ยึดติดกับฐานรองรับ ทำให้สามารถหมุนและเคลื่อนที่ในแนวราบได้จึงมีลักษณะเหมือนคนอย่างง่าย ระยะการแอนตัวของเสาถูกวัดด้วย LVDT (Linear variable differential transformer) ซึ่งติดตั้งทั้งหมด 5 ตัว ที่บริเวณฐานรองรับทั้ง 2 ฝั่ง บริเวณห่างจากฐานรองรับ 1 ใน 4 ของความยาวเสา และบริเวณกึ่งกลางเสา การติดตั้งการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 การทดสอบเริ่มโดยให้แรงกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงขึ้นอย่างช้า ๆ กระทั่งเสาไม่สามารถรับแรงกระทำเพิ่มได้อีก แรงกระทำและระยะแอนตัวของเสาถูกบันทึกตลอดช่วงการทดสอบเพื่อนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและระยะแอนตัว นอกจากนี้

รูปแบบและขนาดของรอยร้าวของเสาถูกบันทึกและใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างด้วย

ในการศึกษานี้นอกจากการทดสอบแล้วได้มีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดและระยะแอนตัวของตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 3 แบบถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Response-2000 ที่พัฒนาโดย Evan C. Bentz ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์หน้าตัดแบบไม่เชิงเส้นบนพื้นฐานของทฤษฎี Modified compressive field theory โดยมีสมมติฐานว่าระยะหน้าตัดของชิ้นส่วนยังคงรักษาระนาบภายใต้แรงกระทำ และความเค้นอัดหลักของคอนกรีต f_{c2} สัมพันธ์กับทั้งความเครียดอัดหลัก ϵ_2 และความเครียดดึงหลัก ϵ_1 [17] โดยความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (1)

$$f_{c2} = \frac{f'_c}{0.8+170\epsilon_1} \left[2 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon'_c} \right) - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

เมื่อ f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ ϵ'_c คือความเครียดที่กำลังอัดประลัยโดยกำหนดให้มีความเท่ากับ -0.002

ในการจำลองนี้กำหนดให้มวลรวมหยาบของคอนกรีตมีขนาด 19 ม.ม. (3/4 นิ้ว) และใช้แบบจำลอง Popovics Thorenfeldt และ Collins ทำนายพฤติกรรมของคอนกรีต กำหนดให้กำลังสูงสุดของเหล็กเสริมสูงกว่ากำลังที่จุดคราก 50% และความเครียดเท่ากับ 10% ที่ความเค้นสูงสุด [18] ลวดอัดแรงจำลองด้วยแรงอัดตามแนวแกน 4 ตัน กระทำที่จุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดเสา แผ่นยางพาราอัดแรงที่ผิวด้านข้างของเสาถูกจำลองอย่างง่ายด้วยแรงอัดตามแนวแกนที่จุดเซนทรอยด์และโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงกระทำเอียงศูนย์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเสามีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงทั้ง 4 ด้าน จึงทำให้โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงเอียงศูนย์หักล้างกันหมด การจำลองการเสริมกำลังอย่างง่ายนี้ไม่ได้คำนึงถึงหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปในแผ่นยางเมื่อเสามีการแอนตัว เนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นยางพารามีค่าต่ำมากและการเสียรูปของแผ่นยางเกิดขึ้นน้อยทำให้การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในแผ่นยางมีค่าน้อยมากสำหรับเหล็กเสริมตามยาวที่มีการสูญเสียหน้าตัดเฉพาะช่วงกลางเสาได้ถูกจำลองโดยการลดพื้นที่หน้าตัดตลอดทั้งเส้น โดยถือว่าการจำลองอย่างง่ายนี้มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการวิเคราะห์กำลังของหน้าตัดที่กึ่งกลางเสาซึ่งเป็นหน้าตัดที่จะเกิดการวิบัติการวิเคราะห์นี้ไม่พิจารณาการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตช่วงกึ่งกลางเสาเนื่องจากมีผลกระทบน้อยและโปรแกรมมีข้อจำกัดในการกำหนดค่าแรงยึดเหนี่ยว

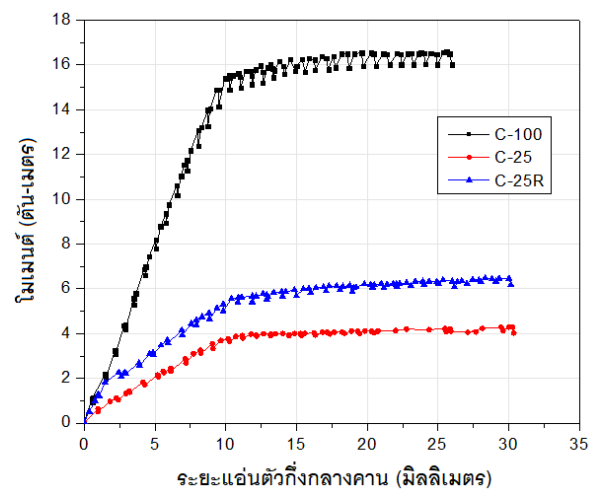
4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1) แรงดัดสูงสุดและรูปแบบการแตกร้าวจากการทดสอบ

แรงดัดหรือโมเมนต์ดัดที่ตัวอย่างเสาทดสอบสามารถรับได้จะสัมพันธ์กับความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาต่อมอสะพานในสภาพการใช้งานจริง ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและระยะแอ่นตัวของตัวอย่างเสาที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 7 เส้นกราฟของเสาทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง มีพฤติกรรมคล้ายกันโดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น 2 ช่วง ที่มีความชันไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาในช่วงแรกเส้นกราฟระหว่างโมเมนต์ดัดและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของเสา C-100 มีความชันมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุดทำให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ในขณะที่ C-25R มีความชันรองลงมาเนื่องจากมีปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ C-25 แต่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงทำให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่า C-25 อย่างไรก็ตามในแง่ของความแข็งแรง (Stiffness) การเสริมแผ่นยางพาราอัดแรงไม่สามารถทดแทนปริมาณเหล็กเสริมของเสาที่ลดลงเหลือ 25% ได้เมื่อเพิ่มแรงดัดมากขึ้นกระทั่งระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของเสามีค่าประมาณ 10 มม. เส้นกราฟของทุกตัวอย่างทดสอบมีความชันลดลงฉับพลันเนื่องจากแรงดัดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมทำให้เกิดความเครียดในเหล็กเสริมสูงขึ้นถึงค่าความเครียดดัดประลัย (Ultimate tensile strain) จากเส้นกราฟในช่วงที่ 2 พฤติกรรมของทุกตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเหมือนกันคือมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นมากเมื่อเพิ่มแรงดัดเพียงเล็กน้อย และเมื่อแรงกระทำเพิ่มถึงจุดที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสา เสาทดสอบทุกต้นไม่เกิดการวิบัติแบบฉับพลันซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมแบบเหนียว โดยเกิดการครากของเหล็กเสริมภายในเสาทุกต้นก่อนเกิดการวิบัติของเสา

กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของเสาตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 จากข้อมูลพบว่าตัวอย่างเสา C-25 ซึ่งเหล็กเสริมภายในมีการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดและสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ทำให้มีกำลังรับโมเมนต์

ดัดประลัยลดลง 73.8% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม C-100 ในขณะที่ตัวอย่าง C-25R ซึ่งเหล็กเสริมภายในเกิดความเสียหายรุนแรงและสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเช่นเดียวกัน แต่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรง มีกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยสูงกว่า C-25 เท่ากับ 2 ตัน-เมตร หรือคิดเป็น 46.5% ดังนั้นสำหรับเสาต่อมอสะพานที่เหล็กเสริมภายในมีความเสียหายรุนแรง การใช้แผ่นยางพาราอัดแรงมาเสริมกำลังสามารถเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดได้ดี



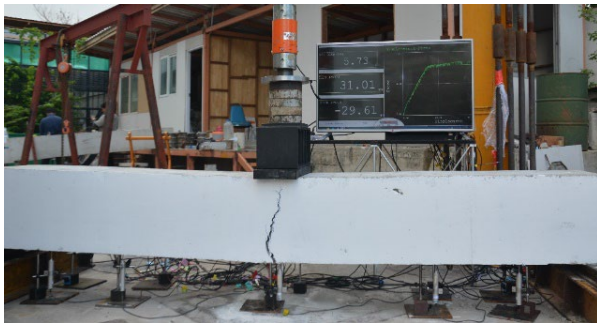
รูปที่ 7 : ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและระยะแอ่นตัว



รูปที่ 8 : รูปแบบการแตกร้าวของ C-100 ที่กำลังดัดประลัย

ตารางที่ 3 : ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่กึ่งกลางเสา (การทดสอบ), M_{exp} , ตัน-เมตร	กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่กึ่งกลางเสา (แบบจำลอง), M_{num} , ตัน-เมตร	ความคลาดเคลื่อน, M_{num}/M_{exp}
C-100	16.4	16.7	1.02
C-25	4.3	5.1	1.19
C-25R	6.3	5.7	0.90



รูปที่ 9 : รูปแบบการแตกร้าวของ C-25 ที่กำลังดัดประลัย



รูปที่ 10 : รูปแบบการแตกร้าวของ C-25R ที่กำลังดัดประลัย

รูปแบบและการพัฒนารอยร้าวของตัวอย่าง C-100 เริ่มจากเกิดรอยร้าวขนาดเล็กบริเวณกึ่งกลางเสา จากนั้นรอยร้าวเพิ่มจำนวนและมีขนาดยาวขึ้นเมื่อเพิ่มแรงกระทำ โดยขยายจากด้านล่างสู่ด้านบนเป็นแนวตรงซึ่งเป็นผลจากโมเมนต์ดัด เมื่อแรงกระทำเพิ่มถึงจุดที่เกิดโมเมนต์ดัดประลัยพบว่ามียอยร้าวจำนวนมากกระจายเป็นบริเวณกว้างแต่มีลักษณะเอียงและขยายตัวเข้าสู่กลางเสา ซึ่งเป็นการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 8 ตัวอย่างเสา C-25 มียอยร้าวเกิดขึ้นบริเวณกลางเสาในช่วงต้นของการทดสอบ รอยร้าวมีขนาดกว้างขึ้นและขยายยาวขึ้นด้านบนเป็นแนวตรงเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากโมเมนต์ดัด อย่างไรก็ตามรอยร้าวจะเกิดเฉพาะบริเวณกึ่งกลางเสาและมีความกว้างมากกว่ารอยร้าวของ C-100 ดังแสดงในรูปที่ 9 สาเหตุที่รอยร้าวไม่กระจายตัวเนื่องจากเหล็กเสริมช่วงกลางเสา C-25 สูญเสียพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต ทำให้มีความเครียดดึงสูงกว่าบริเวณอื่น ในขณะที่เสาเสริมกำลัง C-25R มียอยร้าวเริ่มต้นที่บริเวณกึ่งกลางเสา และเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นพบว่ารอยร้าวขยายตัวจากด้านล่างสู่ด้านบนเป็นแนวตรงซึ่งเป็นผลจากโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มแรงจนสิ้นสุดการทดสอบพบว่ามียอยร้าวขนาดใหญ่บริเวณกึ่งกลางเสาคัลยารอยร้าวของ C-25 แต่มีรอยร้าวขนาดเล็ก

กระจายตัวนอกบริเวณที่มีการเสริมแผ่นยางพาราด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 สาเหตุเนื่องจากแรงอัดจากแผ่นยางพาราช่วยลดความเครียดดึงช่วงกลางเสา ทำให้เกิดการชะลอการแตกร้าวในช่วงดังกล่าว

4.2) การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการแสดงในตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับโมเมนต์ดัดที่ได้จากการทดสอบและจากแบบจำลองของตัวอย่างเสาทดสอบ C-100 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงด้วยค่าอัตราส่วน M_{num}/M_{exp} เท่ากับ 1.02 โดยค่า 1.00 หมายถึงมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดหรือค่าที่ได้จากการทดสอบเท่ากับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ขณะที่ตัวอย่าง C-25 และ C-25R มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 1.19 และ 0.90 ตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนของตัวอย่าง C-25 เป็นผลจากการกำหนดให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตในแบบจำลองเป็นแรงยึดเหนี่ยวแบบสมบูรณ์ แรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมจึงสามารถถ่ายไปที่คอนกรีตบริเวณใกล้เคียงได้ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ สำหรับตัวอย่าง C-25R ที่มีค่าอัตราส่วนความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1.00 แปลว่าค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งวิธีการจำลองแผ่นยางพาราอัดแรงอย่างง่ายที่ใช้กันทำให้อัตราส่วนความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนจาก 1.19 เป็น 0.90 คิดเป็น 24.4% แสดงให้เห็นว่าวิธีการจำลองแผ่นยางพาราอัดแรงมีความแม่นยำไม่สูงมาก อย่างไรก็ตามการจำลองอย่างง่ายนี้มีความสะดวกรวดเร็วและมีความคลาดเคลื่อนไปในทางที่ปลอดภัย

5) สรุปผล

จากผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข การนำแถบยางพาราอัดแรงมาใช้เสริมกำลังเสาตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมภายในเสาตอม่อสะพานสามารถส่งผลให้กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยและความแข็งแรงของเสาลดลงมาก แต่ไม่ส่งผลต่อความเหนียวของเสาอย่างมีนัยสำคัญ
2. การนำแผ่นยางพาราอัดแรงมาใช้ในการเสริมกำลังเสาตอม่อคอนกรีตที่เหล็กเสริมภายในเสียหายรุนแรงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ

โดยสามารถเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของเสาได้ถึง 46.5% เมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง

3. การเสริมกำลังเสาตอม่อด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงทำให้ความแข็งแรงของเสาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นยางพารามีค่าต่ำมาก

4. รูปแบบการแตกร้าวของทุกเสาทดสอบมีความแตกต่างกัน การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมภายในทำให้เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่และเกิดเฉพาะบริเวณที่เหล็กเสริมเสียหาย การเสริมแผ่นยางพาราอัดแรงสามารถลดขนาดรอยร้าวและชะลอการแตกร้าวในบริเวณที่เสริมกำลังได้

5. ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในด้านกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยมีความสอดคล้องกันดี โดยเฉพาะตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรง สำหรับวิธีการจำลองแผ่นยางพาราอัดแรงที่ใช้จนถึงแม้จะให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำไม่สูงมาก แต่การจำลองอย่างง่ายนี้ช่วยลดความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองและลดเวลาในการประมวลผล อีกทั้งแบบจำลองอย่างง่ายนี้ให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปในทางที่ปลอดภัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมทางหลวง ผู้สนับสนุนทุนวิจัย และทีมนักวิจัยจากศูนย์วิจัยเฉพาะทางพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่มีส่วนช่วยในการทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยนี้

REFERENCES

- [1] A. M. Sayed, M. M. Rashawn, and M. E. Helmy, "Experimental behavior of cracked reinforced concrete columns strengthened with reinforced concrete jacketing," *Materials*, vol. 13, no. 12, Jun. 2020, Art. no. 2832.
- [2] A. He, J. Cai, Q.-J. Chen, X. Liu, and J. Xu, "Behavior of steel-jacket retrofitted RC columns with preload effects," *Thin-Walled Struct.*, vol. 109, pp. 25–39, Dec. 2016.
- [3] S. Raza, M. K. I. Khan, S. J. Menegon, H.-H. Tsang, and J. L. Wilson, "Strengthening and repair of reinforced concrete columns by jacketing: State-of-the-art review," *Sustainability*, vol. 11, no. 11, Jun. 2019, Art. no. 3208.
- [4] L. Leicht, C. L. Roberts-Wollmann, I. Koutoumanos, M. H. Hebdon, and O. Mosig, "Experimental and analytical investigation of a 64-year-old prestressed beam retrofitted with external posttensioning," *J. Bridge Eng.*, vol. 27, no. 4, Apr. 2022, Art. no. 04022015.
- [5] A. S. Mosallam and K. M. Mosalam, "Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates," *Construction Building Mater.*, vol. 17, no. 1, pp. 43–54, Feb. 2003.
- [6] M. Di Ludovico, A. Prota, G. Manfredi, and E. Cosenza, "FRP strengthening of full-scale PC girders," *J. Composites Construction*, vol. 14, no. 5, pp. 510–520, Feb. 2010.
- [7] A. Godat and O. Chaallal, "Strut-and-tie method for externally bonded FRP shear-strengthened large-scale RC beams," *Composite Struct.*, vol. 99, pp. 327–338, May 2013.
- [8] Y. Yang *et al.*, "Emergency repair of an RC bridge column with fractured bars using externally bonded prefabricated thin CFRP laminates and CFRP strips," *Composite Struct.*, vol. 133, pp. 727–738, Dec. 2015.
- [9] M. Chellapandian and S. S. Prakash, "Rapid repair of severely damaged reinforced concrete columns under combined axial compression and flexure: An experimental study," *Construction Building Mater.*, vol. 173, pp. 368–380, Jun. 2018.
- [10] C. Tan, J. Xu, and R. S. Aboutaha, "Bridge pier extension with carbon-fiber reinforced polymer flexural reinforcement: Experimental tests and three-dimensional finite element modeling," *ACI Struct. J.*, vol. 118, no. 1, pp. 251–262, Jan. 2021.
- [11] J. Michels *et al.*, "Prestressed CFRP strips for concrete bridge girder retrofitting: Application and static loading test," *J. Bridge Eng.*, vol. 21, no. 5, 2016, Art. no. 04016003.
- [12] Y. Deng *et al.*, "Strain driven mode-switching analytical framework for estimating flexural strength of RC box girders strengthened by prestressed CFRP plates with experimental validation," *Eng. Struct.*, vol. 286, Jul. 2023, Art. no. 116084.
- [13] J. Bao *et al.*, "Influence of exposure environments and moisture content on water repellency of surface impregnation of cement-based materials," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 12115–12125, 2020.



- [14] N. Channarong and K. Rodsin, "The application of pre-tensioned rubber pads in vibration suppression of prestressed concrete beams," (in Thai), in *Proc. 28th Nat. Conv. Civil Eng.*, Phuket, Thailand, May 2023, pp. 576–581.
- [15] C. Boonmee and K. Rodsin, "Static behavior of a plank girder strengthening by pre-stressed rubber pads," (in Thai), *J. Ind. Technol. Suan Sunandha Rajabhat Univ.*, vol. 7, no. 1, pp. 71–82, 2019.
- [16] S. Somboonbab and K. Rodsin, "Strengthening of a PC-plank girder using pre-stressed rubber pads," in *Proc. 24th Nat. Conv. Civil Eng.*, Udonthani, Thailand, Jul. 2019, pp. 162–167.
- [17] F. J. Vecchio and M. P. Collins, "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear," *ACI J.*, vol. 83, no. 2, pp. 219–231, 1986.
- [18] E. C. Bentz, "Sectional analysis of reinforced concrete members," Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng., Univ. Toronto, Ontario, Canada, 2000. [Online]. Available: <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/13811/1/NQ49840.pdf>

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น บทความที่น่าสนใจจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามรูปแบบที่กำหนด และพร้อมที่จะนำไปตีพิมพ์ได้ทันที การเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร มีรายละเอียดดังนี้

1. หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์

1.1 เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ หรือไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือรายงานการสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการใดมาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ หากตรวจสอบพบว่ามีการตีพิมพ์ซ้ำซ้อน ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.2 เป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ มีความสมบูรณ์ของเนื้อหา และมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ

1.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะต้องผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewer) อย่างน้อย 2 ท่าน ต่อบทความ ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิอาจให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือปรับปรุงบทความให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.4 กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ตามที่เห็นสมควร

1.5 บทความ ข้อความ ภาพประกอบ และตารางประกอบ ที่ตีพิมพ์ลงวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.6 ต้องเป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ลอกเลียน หรือตัดทอนข้อความของผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

1.7 หากเป็นงานแปลหรือเรียบเรียงจากภาษาต่างประเทศ ต้องมีหลักฐานการอนุญาตให้ตีพิมพ์เป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์

1.8 ต้องมีการอ้างอิงที่ถูกต้อง เหมาะสมก่อนการตีพิมพ์ ซึ่งเป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน

1.9 บทความที่ส่งถึงกองบรรณาธิการ ขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่ส่งคืนผู้เขียน

2. รูปแบบการกลั่นกรองบทความก่อนลงตีพิมพ์ (Peer-review)

ในการประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิเป็นการประเมินแบบ Double-blind peer review คือ ผู้ทรงคุณวุฒิไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้เขียนบทความ และผู้เขียนบทความไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้ทรงคุณวุฒิ

3. ประเภทของบทความที่รับพิจารณาลงตีพิมพ์

นิพนธ์ต้นฉบับต้องเป็นบทความวิจัย ประกอบด้วย บทคัดย่อ บทนำ วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัยและอภิปรายผล สรุปผล และเอกสารอ้างอิง*

หมายเหตุ : บทความภาษาไทยต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้หน้าบทคัดย่อภาษาไทยอยู่ก่อนหน้าบทคัดย่อภาษาอังกฤษ สำหรับบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

* เอกสารอ้างอิง เป็นการบอกรายการแหล่งอ้างอิงที่มีการอ้างอิงในเนื้อหาของงานเขียน

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

4. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ได้คำนึงถึงจริยธรรมในการตีพิมพ์บทความ โดยจริยธรรมและบทบาทหน้าที่ของผู้เกี่ยวข้อง มีดังนี้

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้เขียน

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

จริยธรรมและหน้าที่ของบรรณาธิการ

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

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ

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

5. ข้อกำหนดการจัดพิมพ์ต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนต้องจัดพิมพ์บทความตามข้อกำหนดเพื่อให้มีรูปแบบการตีพิมพ์เป็นมาตรฐานแบบเดียวกัน ดังนี้

5.1 ขนาดของกระดาษ ให้ใช้ขนาด A4

5.2 กรอบของข้อความ ระยะห่างของขอบกระดาษ

ด้านบน 2.5 ซม. (0.98")

ด้านล่าง 2 ซม. (0.79")

ด้านซ้าย 2 ซม. (0.79")

ด้านขวา 2 ซม. (0.79")

5.3 ระยะห่างระหว่างบรรทัด หนึ่งช่วงบรรทัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Single)

5.4 ตัวอักษร รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ TH Sarabun New

5.5 รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความ กำหนดดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ขนาด 22 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง

ชื่อผู้เขียน (Author) ขนาด 16 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง ไม่ต้องใส่คำนำหน้า

สังกัด (Affiliation) ขนาด 14 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง

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

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

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

รูปแบบการพิมพ์เนื้อหาของบทความ

- รูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ กว้าง 8.2 ซม. (3.23") ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.61 ซม. (0.24")

- หัวข้อหลัก ประกอบด้วย บทนำ (INTRODUCTION) วัตถุประสงค์ของการวิจัย (OBJECTIVES) วิธีดำเนินการวิจัย (METHODS) ผลการวิจัยและอภิปรายผล (RESULTS AND DISCUSSION) สรุปผล (CONCLUSIONS) เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ขนาด 14 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และมีเลขกำกับ เช่น 1) บทนำ หรือ I. INTRODUCTION เป็นต้น

- หัวข้อรอง ระดับที่ 1 ขนาด 14 ตัวหนา กำหนดชิดซ้าย เมื่อขึ้นหัวข้อระดับเดียวกันหรือมากกว่าในลำดับถัดไป ให้เคาะเว้น 1 บรรทัดหลังจบเนื้อหา

- หัวข้อรอง ระดับที่ 2 ขนาด 14 ตัวหนา กำหนดชิดซ้ายและเลื่อนเข้ามา 0.5 ซม.

- เนื้อเรื่อง ขนาด 14 ตัวธรรมดา

- ชื่อตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อเหนือตาราง

- หัวข้อในตาราง ขนาด 12 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง เนื้อหาในตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา

- ชื่อภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อใต้ภาพ

- เนื้อหาในภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

5.6 เอกสารอ้างอิง

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

ตัวอย่างรูปแบบการเขียนและการแปลเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ

ตัวอย่างที่ 1 การอ้างอิงจากหนังสือ(Books)

Basic Format:

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

Examples:

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

ตัวอย่างที่ 2 การอ้างอิงจากวารสาร (Periodicals)

Basic Format:

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

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

Examples:

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

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

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

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

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

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

ตัวอย่างที่ 3 การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

Basic Format:

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

Examples:

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

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

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

ตัวอย่างที่ 4 การอ้างอิงการประชุมทางวิชาการ (Conferences and Conference Proceedings)

Basic Format:

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

Examples:

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

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

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

ตัวอย่างที่ 5 การอ้างอิงเว็บไซต์

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

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

6. วิธีการจัดส่งบทความ

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

ทุกบทความที่ส่งเข้ามาจะมีการตรวจพิจารณาเบื้องต้นโดยกองบรรณาธิการก่อน เมื่อบทความผ่านการพิจารณาเบื้องต้นผู้เขียนจึงจะสามารถชำระเงินได้ หลังจากที่คุณชำระเงินเรียบร้อยแล้ว ทางกองบรรณาธิการจะดำเนินการส่งบทความเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความและแจ้งผลการพิจารณาให้ผู้เขียนบทความทราบ สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแล้วจะได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

“สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร”

คณะวิศวกรรมศาสตร์

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ (Automotive Engineering, B.Eng.: AE)
- หลักสูตรวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติแบบสิ้น (Robotics and Lean Automation Engineering, B.Eng.: RE)
- หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ (Computer Engineering and Artificial Intelligence, B.Eng.: CE)
- หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหการ (Industrial Engineering, B.Eng.: IE)
- หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering, B.Eng.: EE)
- หลักสูตรวิศวกรรมบูรณาการระบบดิจิทัล (Digital System Integration Engineering, B.Eng.: SE)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

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

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

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

หลักสูตรระดับปริญญาโท

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

คณะบริหารธุรกิจ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, B.B.A.: BJ)
- หลักสูตรการจัดการธุรกิจระหว่างประเทศ (International Business Management, B.B.A.: IB)
- หลักสูตรการบัญชี (Accountancy, B.Acc.: AC)
- หลักสูตรการจัดการทรัพยากรมนุษย์แบบญี่ปุ่น (Japanese Human Resources Management, B.B.A.: HRJ)
- หลักสูตรการตลาดดิจิทัล (Digital Marketing, B.B.A.: DM)
- หลักสูตรการจัดการการท่องเที่ยวและการบริการเชิงนวัตกรรม (Innovative Tourism and Hospitality Management, B.B.A.: TH)
- หลักสูตรการพัฒนาธุรกิจและสตาร์ทอัพ (Development of Business and Start-Up, B.B.A.: DBS)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

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

คณะสื่อสารสากล

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรภาษาญี่ปุ่นเพื่อธุรกิจระหว่างประเทศ (Japanese for International Business, B.A.: JIB)

คณะเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อธุรกิจอุตสาหกรรม

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน (Logistics and Supply Chain Management, B.B.A.: LM)

Thai-Nichi International College (TNIC)

Bachelor's Degree Programs

- สาขาวิศวกรรมดิจิทัล (Digital Engineering, B.Eng.: DGE)
- สาขาวิทยาการข้อมูลและปัญญาประดิษฐ์ (Data Science and Artificial Intelligence, B.Sc.: DSA)
- สาขาธุรกิจระหว่างประเทศและการเป็นผู้ประกอบการ (International Business and Entrepreneurship, B.B.A.: IBN)

Thai-Nichi Institute of Technology

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

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

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