

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

Thai-Nichi Institute of Technology

Vol.13 No.1

January - June 2025



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2568

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล

Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568 Vol. 13 No. 1 January - June 2025

ISSN (Online) 2774-0617

ความเป็นมา

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

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์รังสรรค์ เลิศในสัตย์

ขอบเขตเนื้อหา

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

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 6 เดือน (ปีละ 2 ฉบับ)

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

เจ้าของ

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

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.มังกร วิจารณ์ประภากร

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

- | | |
|--|--|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ธนารักษ์ อีระมั่นคง | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จ่านองไทย | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 4. ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย งามหุ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 5. ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 6. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 7. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.กัณฑ์พงษ์ วรรัตน์ปัญญา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.พยุ่ง มีสัจ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรณัฐ เสี่ยงมศักดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 12. รองศาสตราจารย์ อัญชลี สุพิทักษ์ | สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |
| | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |

คณะกรรมการดำเนินงาน

- | | |
|---|------------------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ | 7. นางสาวสุพิศ บายคายคม |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รชตะ รุ่งตระกูลชัย | 8. นายอศิรา พรหมสุทธิ์ |
| 3. ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ | 9. นางสาวพิมพ์รต์ พิพัฒน์กุล |
| 4. ดร.อภิขญา นิมคุ้มภัย | 10. นางสาวอารีสา จิระเวชถาวร |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันยชัย เจียรกุล | 11. นางสาวอนันดา ปันเด |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมราวดี ทัพพุน | |

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

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

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

E-mail : JEDT@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน

กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

บทบรรณาธิการ

ในยุคที่เทคโนโลยีเปลี่ยนผ่านอย่างรวดเร็วและความรู้ใหม่ ๆ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT) ทำหน้าที่เป็นเวทีเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณภาพ เพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ระหว่างนักวิชาการ นักวิจัย และผู้สนใจทั่วไป

ในโอกาสนี้ กองบรรณาธิการขอแสดงความยินดีกับนักวิจัยทุกท่านที่ผลงานได้รับการคัดเลือกและตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 ซึ่งทุกบทความผ่านกระบวนการประเมินอย่างเข้มข้นจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง โดยแต่ละบทความได้รับคำแนะนำอย่างละเอียดเพื่อการปรับปรุงให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้เนื้อหาที่มีคุณภาพในระดับสูง พร้อมทั้งสะท้อนแนวคิดเชิงลึกและความก้าวหน้าทางวิชาการที่สามารถนำไปต่อยอดในงานวิจัย และการพัฒนานวัตกรรม

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ดำเนินงานภายใต้นโยบายที่เปิดกว้าง ด้วยการรับบทความวิจัยทั้งในรูปแบบภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เพื่อรองรับนักวิจัยทั้งจากภายในประเทศและต่างประเทศ อันสะท้อนถึงความมุ่งมั่นของวารสารในการเป็นเวทีทางวิชาการระดับนานาชาติที่ส่งเสริมการสื่อสารและการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ในระดับกว้าง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล ได้รับการรับรองจากศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre: TCI) ให้อยู่ในกลุ่มที่ 1 อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการยืนยันถึงคุณภาพของบทความ การบริหารจัดการวารสารที่มีประสิทธิภาพ กองบรรณาธิการจะรักษามาตรฐานวิชาการในระดับสูงนี้ไว้ต่อไป

กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า บทความที่ได้รับการเผยแพร่ในฉบับปัจจุบัน จะไม่เพียงแต่เป็นแหล่งอ้างอิงทางวิชาการที่น่าเชื่อถือเท่านั้น แต่ยังเป็นแรงบันดาลใจให้กับการวิจัยในอนาคต และสามารถนำไปต่อยอดสู่การพัฒนาองค์ความรู้ เทคโนโลยี หรือการประยุกต์ใช้ในบริบทจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และขอเชิญชวนผู้สนใจส่งบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสารของเราในโอกาสต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์
ปฏิบัติหน้าที่แทนบรรณาธิการ

Editorial Message

In an era where technology is evolving rapidly and new knowledge is constantly emerging, Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT) serves as an essential source for publishing quality academic works to promote knowledge exchange among scholars, researchers and the general public.

On this occasion, the editorial board would like to extend heartfelt congratulations to all researchers whose work has been selected and published in Journal of Engineering and Digital Technology, Volume 13, Issue 1. Each manuscript has undergone a rigorous peer-review process by experts in the respective fields. Detailed feedback and constructive recommendations have been provided to help enhance the content, resulting in scholarly articles of high quality that reflect in-depth perspectives and significant academic progress-contributing to future research and innovation.

JEDT operates under an open and inclusive policy, accepting research articles in both Thai and English. This approach enables contributions from both domestic and international researchers and reflects the journal's strong commitment to becoming an internationally recognized academic platform that fosters broad-based academic communication and collaboration.

The journal has been consistently ranked in Tier 1 of the Thai-Journal Citation Index Centre (TCI), which confirms the quality of the articles and the efficient management of the journal. The editorial team remains dedicated to maintaining and further strengthening this level of academic excellence.

We sincerely hope that the articles published in this issue will not only serve as reliable references for academic study but also inspire future research endeavors. Furthermore, we believe they will contribute meaningfully to the advancement of knowledge, technology development, and practical applications. We warmly invite researchers to submit the work for future issues of our journal.

Assoc. Prof. Warakorn Srichavengsup, Ph.D.

For Editor-in-Chief

สารบัญ

- 1 **Assessing the Feasibility of Using EPS Mortar as a Construction Material for Mitigating Foam Waste**
Sirikanya Laosuwan, Nutapong Hirano, Wechsawan Lakas, Kraisorn Lucksiri, Sermsak Arsa
- 13 **Bogie Frame Assessment: A Multibody Dynamic Approach**
Thanaporn Talingthaisong, Aunna Sukhom, Sedthawatt Sucharitpwatskul, Anchalee Manonukul, Panya Kansuwan
- 26 **Determination of Robust Parameters for Deodorant Spray Gas Filling Process Using the Taguchi Technique**
Noppasak Pongpakdee, Srisit Chianrabutra
- 40 **Effect of Cutout Eccentricity on the Elastic Stability of Square Perforated Plates**
Ek-u Thammakornbunjut, Sombat Tamna, Pongkorn Meelapchotipong, Jongsak Pakpia, Paiboon Limpitipanich
- 49 **Heavy Rainfall-induced Slope Erosion Prevention by Recycled Rubber Textile**
Wijit Itthiwongkul, Wittayakul Sittisarn, Siwarote Siriluck
- 59 **Increasing Dissolved Oxygen in Water Using an Orifice Cavitation-induced Hydrodynamics Cavitation Reactor**
Nopparat Amattirat, Thanakrit Nonchana, Ittiphon Woraphun, Prachasanti Triyasuit, Kulachate Pianthong
- 69 **Optimization Plastic Mold Injection Parameters for Sprinkler Valve Production Process Using Problem Solving and Experimental Design**
Bantita Keawprapai, Mintra Bunduang, Ninlawan Choomrit

- 79 Value Stream Mapping and Simulation Techniques for Considering Bottleneck Reduction Alternatives: A Case Study in A Sterile Pharmaceutical Factory

Chartkawe Jehsaree, Chootrakul Siripiboon, Srisit Chianrabutra

- 98 Vehicle Routing for Garbage Collection and Transportation Using Saving Algorithm and Modified Saving Algorithm

Saharit Sameenoi, Khanawut Napachot, Rojanee Homchalee

การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ EPS มอร์ตาร์เป็นวัสดุก่อสร้าง เพื่อบรรเทาปัญหาขยะโฟม

ศิริกัญญา เลาสุวรรณ^{1*} อนุตพงษ์ อีรานโน² เวชสวรรค์ หล้ากาศ³ ไกรสร ลักษณะศิริ⁴ เสริมศักดิ์ อาษา⁵

^{1*,2,3,4,5}ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : sirikanya_lao@cmru.ac.th

รับต้นฉบับ : 30 มิถุนายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 4 ตุลาคม 2567; ตอบรับบทความ : 7 ตุลาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

โฟมเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างหลากหลายเนื่องจากมีคุณลักษณะเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา รองรับแรงกระแทกได้ดี และมีคุณสมบัติกันความร้อน อย่างไรก็ตาม การทิ้งขยะโฟมหรือการกำจัดโดยวิธีที่ไม่เหมาะสม อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ของวิธีการกำจัดขยะโฟม โดยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการละลายโฟมเพื่อให้กลายเป็นตัวยัดประสาน จากนั้นนำตัวยัดประสานผสมกับทราย โดยใช้โฟมในอัตราส่วนร้อยละ 5 7 9 11 13 15 และ 17 ของน้ำหนักทราย เพื่อนำมาขึ้นรูปเป็น EPS มอร์ตาร์ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ในโครงการนี้มี 2 ประเภท ได้แก่ แอซีโตนและไดคลอโรมีเทน จากผลการทดสอบพบว่า EPS มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,200 ถึง 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 40 ถึง 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่ากำลังรับแรงดัดอยู่ในช่วง 10 ถึง 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมอร์ตาร์ที่ได้จากการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์แอซีโตนในอัตราส่วนโฟมร้อยละ 13 ของน้ำหนักทรายมีคุณสมบัติและต้นทุนการผลิตที่ดีที่สุด ดังนั้นวัสดุ EPS มอร์ตาร์ที่พัฒนาจากการวิจัยนี้จึงมีศักยภาพที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้างได้อย่างหลากหลาย

คำสำคัญ : ตัวทำละลายอินทรีย์แอซีโตน ค่ากำลังรับแรงอัด ตัวทำละลายอินทรีย์ไดคลอโรมีเทน ค่ากำลังรับแรงดัด การรีไซเคิลโฟม

Assessing the Feasibility of Using EPS Mortar as a Construction Material for Mitigating Foam Waste

Sirikanya Laosuwan^{1*} Nutapong Hirano² Wechsawan Lakas³ Kraisorn Lucksi⁴ Sermak Arsa⁵

^{1*,2,3,4,5} *Department of Industrial Technology, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: sirikanya_lao@cmru.ac.th

Received: 30 June 2024; Revised: 4 October 2024; Accepted: 7 October 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

Foam is a versatile material due to its advantageous properties, such as being lightweight, impact-resistant, and providing thermal insulation. However, improper disposal or management of foam waste can lead to environmental issues. This research thus explores the possibility of disposing of foam waste by dissolving it in organic solvents, transforming it into a binder. The binder is then mixed with sand at foam-to-sand ratios of 5, 7, 9, 11, 13, 15, and 17 percent foam by weight to create EPS mortar. Two types of organic solvents, acetone and dichloromethane, were used in the study. The test results show that the EPS mortar had density values ranging from 1,200 to 1,600 kilograms per cubic meter, compressive strength ranging from 40 to 120 kilograms per square centimeter, and flexural strength ranging from 10 to 65 kilograms per square centimeter. The mortar made with acetone as the organic solvent, at a 13 percent foam ratio by weight, demonstrated the optimal balance of properties and production cost. Therefore, the EPS mortar developed in this research has potential for use in various construction applications.

Keywords: Acetone solution, Compressive strength, Dichloromethane solution, Flexural strength, Foam recycling

1) บทนำ

โฟมเป็นวัสดุที่ผลิตมาจากเม็ดพลาสติกโดยผ่านการใช้สารที่ทำให้ขยายตัว ทำให้เกิดการพองตัวขึ้น และมีคุณสมบัติที่สามารถตัดและขึ้นรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น มีความต้านทานความร้อน และมีความทนทานต่อแรงกระแทก ซึ่งในปัจจุบันมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกสำหรับอุปกรณ์ ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกในหมวกนิรภัย หรือใช้เป็นวัสดุฉนวนในงานก่อสร้าง เป็นต้น ถึงแม้โฟมจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย แต่เมื่อการใช้ประโยชน์เสร็จสิ้น โฟมจะกลายเป็นขยะที่อันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เพราะการย่อยสลายของโฟมตามธรรมชาติจะใช้เวลาานานมาก ด้วยเหตุนี้ขยะโฟมจึงเป็นหนึ่งในปัญหาที่ทั่วโลกกำลังประสบอยู่ ณ ตอนนี้ จากบทความของการใช้พลาสติกในยุโรปได้ระบุไว้ว่า ในปี พ.ศ. 2560 มีความต้องการในการใช้โฟมมากถึง 2.65 ล้านตันและสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้เพียงร้อยละ 31.1 ของการใช้โฟมทั้งหมด [1] ในทำนองเดียวกัน ประเทศไทยมีความต้องการการใช้โฟมในเชิงอุตสาหกรรมมากขึ้น และส่งผลให้เกิดปัญหาขยะประเภทโฟมมากขึ้นตาม โดยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาพบปัญหาขยะพลาสติกและโฟมถึง 2 ล้านตันของปริมาณขยะทั้งหมด และได้มีการรีไซเคิลเพียง 0.5 ล้านตัน นอกจากนั้นกลายเป็นขยะออกสู่สิ่งแวดล้อม [2]

เมื่อโฟมที่ถูกใช้ประโยชน์เสร็จสิ้นและกลายเป็นขยะโฟม ขยะโฟมเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ด้วยกันเอง เนื่องจากโฟมคือพลาสติกสังเคราะห์ที่ผลิตมาจากพอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) เมื่อขยะโฟมลงสู่แม่น้ำและทะเล จะเกิดผลเสียให้แม่น้ำหรือทะเลเน่าเสีย นอกจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้วแต่ยังส่งผลไปถึงสัตว์น้ำทุกชนิดไม่สามารถอาศัยอยู่ได้ จากผลการสำรวจขององค์การอนุรักษ์ทางทะเลในปี พ.ศ. 2562 พบขยะพลาสติกและขยะโฟมเฉลี่ยถึง 558 ชิ้น ต่อระยะทาง 100 เมตรตามแนวชายฝั่งทะเลในประเทศไทย [3] ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อแม่น้ำเท่านั้น หากขยะโฟมเหล่านี้ถูกเผาไหม้จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้เมื่อขยะโฟมสัมผัสกับไนโตรเจนออกไซด์ในอากาศจะสามารถผลิตโอโซนในระดับพื้นดิน ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและหากมีการสะสมในปริมาณมากจะทำให้เกิดความผิดปกติต่อร่างกาย ในท้ายที่สุดอาจเกิดเป็นมะเร็งได้ [4], [5] ดังนั้นโฟมเหล่านี้ถึงแม้จะมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมแต่

เมื่อกลายเป็นขยะก็สามารถสร้างผลกระทบให้กับสิ่งแวดล้อมได้มากเช่นเดียวกัน

แนวทางการแก้ไขปัญหาขยะโฟมในปัจจุบันมีการดำเนินการทั้งหมด 3 วิธีคือ การเผา การฝังกลบ และการรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ วิธีที่หนึ่งคือการเผาวัสดุโฟมเป็นวิธีที่ช่วยกำจัดขยะได้รวดเร็วและกำจัดได้ในปริมาณที่มาก อย่างไรก็ตามผลกระทบที่ตามมาจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการเผาจะทำให้เกิดสารปนเปื้อนในบรรยากาศ ยกตัวอย่างเช่น สารไดออกซินที่ได้มาจากการเผา หรือไมโครพลาสติกที่ลอยในบรรยากาศ [6] ซึ่งล้วนแต่เป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต ในปัจจุบันการเผาขยะมูลฝอยรวมทั้งขยะโฟมอย่างมีประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากความรู้ความเข้าใจในหลักการเผาและการควบคุมมลพิษของประชาชนยังไม่มากพอจากการสำรวจและทบทวนวรรณกรรมของ Ramadan et al. [7] พบว่าความเข้าใจในการเผาขยะของประชาชนยังไม่มีความเข้าใจมากนัก ทั้งความร่วมมือจากภาครัฐและเอกชนที่เข้ามาจับบทบาทน้อย ในความเป็นจริงการเผาขยะที่ประสิทธิภาพคือการเผาโดยมีโรงงานควบคุมมลพิษและการใช้กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) หลอมเหลวขยะพลาสติกในสภาวะปิดเพื่อให้กลับคืนสภาวะเดิมที่เป็นวัตถุน้ำมันดิบ [8] ทั้งนี้ในการเผาอย่างมีประสิทธิภาพในสถานที่ควบคุมมลพิษจะต้องมีกระบวนการคัดแยกขยะเสียก่อนเนื่องจากกระบวนการเผาบางชนิดจะไม่เหมาะสมสำหรับขยะบางชนิด [9] อย่างไรก็ตามโดยภาพรวมแล้วกระบวนการเผาขยะยังเป็นกระบวนการที่ปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมากในการควบคุมมลพิษหรือการก่อตั้งโรงงานสำหรับการเผาขยะจะต้องมีการควบคุมมลพิษอย่างจริงจังและมีต้นทุนที่สูงมากไม่สามารถเข้าถึงได้ในหลาย ๆ พื้นที่ วิธีที่สองคือการฝังกลบ วิธีนี้ถึงแม้ว่าจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเมื่อเทียบกับการเผาขยะ แต่กระบวนการและขั้นตอนในการฝังกลบขยะมีความยุ่งยากเนื่องจากการนำขยะมาฝังกลบจำเป็นต้องใช้พื้นที่โล่งที่มีขนาดใหญ่ โดยปกติการเลือกพื้นที่ใช้ในการฝังกลบขยะจะพิจารณาในด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และสุขภาพของผู้นคน ดังนั้นการเลือกพื้นที่จึงมีกระบวนการที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน [10] ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยี Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) ร่วมกับ Geographical Information System (GIS) เพื่อประเมินและคัดกรองพื้นที่สำหรับการจัดทำหลุมฝังกลบ โดยพิจารณาปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม ชุมชน และขนาดของพื้นที่ ทั้งนี้วิธีดังกล่าวจะช่วยในเรื่องการประหยัดเวลาในการคัดเลือกและคำนึง

ถึงผลกระทบต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมน้อย [11] อย่างไรก็ตาม ผลกระทบหลังจากที่ฝังขยะลงในบ่อขยะยังมีผลตามมา ยกตัวอย่าง เช่น การซึมของน้ำที่มาจากบ่อฝังกลบขยะ น้ำที่ซึมผ่านออกมาจากบ่อขยะเป็นน้ำเสียที่มีค่า pH และ Chemical Oxygen Demand (COD) สูง นอกจากนี้บางแหล่งอาจมีการปนเปื้อนของสารพิษที่อยู่ในขยะรวมอีกด้วย [12] ดังนั้นในภายภาคหน้าจะส่งผลเสียต่อดินในพื้นที่ ไม่สามารถนำดินไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมได้ ในปัจจุบันมีงานวิจัยการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการฝังกลบขยะหลากหลายวิธี ในปี ค.ศ. 2016 Cucchiella et al. [13] ได้ทำการเปลี่ยนขยะในบ่อฝังกลบบางส่วนมาใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยทำเป็นพลังงานไฟฟ้าใช้ในโรงงานด้วยวิธีการเผา อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องคัดแยกขยะที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถลดปริมาณขยะในบ่อฝังกลบได้ร้อยละ 21–25 ข้อเสียของวิธีนี้คือ ใช้ระยะเวลานานในการคัดแยกขยะ นอกจากนี้การแก้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมของบ่อฝังกลบสามารถทำได้โดยการแยกบ่อฝังกลบตามประเภทของขยะ โดยใช้วิธีการแยกบ่ออินทรีย์และอนินทรีย์แยกจากกัน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ที่ต่างกัน เนื่องจากบ่อที่เป็นประเภทอินทรีย์วัตถุดิบสามารถนำกลับไปทำเป็นปุ๋ยหมักช่วยทางการเกษตร บ่อประเภทอินทรีย์วัตถุดิบสามารถกำจัดด้วยการเติมจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลาย หรือบ่อฝังกลบประเภทอันตรายซึ่งเป็นที่เก็บของวัตถุอันตราย วิธีนี้ยังสามารถลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากขยะสู่สิ่งแวดล้อมได้ [14], [15] นอกจากนี้การแยกบ่อที่เป็นประเภทของขยะโพลีเมอร์ที่มีปริมาณมากสามารถกำจัดได้โดยการเลี้ยงหนอนนก ซึ่งหนอนนกสามารถย่อยสลายโพลีเมอร์ได้เนื่องจากกระเพาะของหนอนนกมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายขยะประเภทโพลีเมอร์ได้ [16] แต่วิธีการแยกบ่อขยะยังมีข้อเสียอยู่เนื่องจากวิธีการฝังกลบขยะถึงแม้ว่าจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงแต่จำเป็นต้องใช้พื้นที่จำนวนมากและการดูแลรักษามีความซับซ้อน ไม่เพียงเท่านั้น ต้นทุนในสร้างบ่อฝังกลบยังมีต้นทุนที่สูงอีกด้วย วิธีที่สามคือการรีไซเคิลขยะโพลีเมอร์ให้นำกลับมาใช้ใหม่ ในปัจจุบันมีกระบวนการทั้งหมด 2 กระบวนการหลักคือการรีไซเคิลทางกลและการรีไซเคิลทางเคมี โดยการรีไซเคิลทางกลจะเป็นการใช้ความร้อนประมาณ 100–200 องศาเซลเซียส และแรงดันสูงถึง 30–200 บาร์ เพื่อเปลี่ยนสถานะโพลีเมอร์จากของแข็งให้เป็นของเหลว จากนั้นลดอุณหภูมิลงเพื่อเปลี่ยนกลับไปเป็นเม็ดพอลิเมอร์เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป [17], [18] แต่เนื่องจากกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้ต้นทุนที่สูงในการสร้างห้องปิดและเครื่องมือที่ซับซ้อนดังนั้นวิธีนี้จึงจัดว่าเป็นการ

รีไซเคิลที่มีขนาดใหญ่และมีต้นทุนสูงพอในการรีไซเคิล ส่วนอีกกระบวนการคือ การรีไซเคิลทางเคมีจะทำให้ขยะโพลีเมอร์กลับคืนสู่สภาพเดิมที่อยู่ในสถานะของเหลว อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลทางเคมี [19] ซึ่งมีหลากหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น วิธีไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นวิธีการนำขยะโพลีเมอร์กับไอน้ำที่ประกอบด้วยสารเอมีน ณ อุณหภูมิ 150–320 องศาเซลเซียสในสถานะปิด จะได้โพลีเมอร์ในรูปของของเหลวโดยไม่มีการทำลายโมเลกุลของโพลีเมอร์ [20] หรือวิธีไพโรไลซิส กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ปราศจากออกซิเจน หรือมีออกซิเจนน้อยที่สุด โดยความร้อนทำให้พันธะที่เชื่อมกันระหว่างโมเลกุลเกิดการแตกตัว [21] เป็นต้น

นอกจากการนำโพลีเมอร์กลับคืนสู่สภาพเดิมที่อยู่ในสถานะของเหลวเพื่อนำมารีไซเคิลแล้วนั้น ทางด้านวิศวกรรมมีการนำขยะโพลีเมอร์รีไซเคิลหลากหลายวิธีเนื่องจากโพลีเมอร์มีคุณสมบัติการรับแรงได้ดี และมีคุณสมบัติการยืดหยุ่นซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในทางวิศวกรรม เช่น การนำเม็ดโพลีเมอร์มาผสมกับคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคอนกรีตให้มีความแข็งแรงและแรงอัดเพิ่มขึ้น [22] เนื่องจากโพลีเมอร์มีคุณสมบัติรับแรงอัดและแรงดึงได้ดี แม้กระทั่งการนำขยะโพลีเมอร์มาเคลือบผิวถนนโดยการนำโพลีเมอร์มาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แอซีโตนทำให้ผิวถนนมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น [23] อย่างไรก็ตาม นอกจากขยะโพลีเมอร์ที่นำมารีไซเคิลจะเป็นการนำขยะโพลีเมอร์เข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุแล้วยังนำขยะโพลีเมอร์มาเป็นวัสดุในงานก่อสร้างได้เช่นกัน โดยการนำขยะโพลีเมอร์มาหลอมในอุณหภูมิที่ต่ำเป็นเวลานานทำให้โพลีเมอร์หลอมละลายและแข็งตัวเป็นวัสดุมวลรวมทดแทนทรายหรือกรวดในงานก่อสร้าง [24] ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของกรรมวิธีในการรีไซเคิลขยะโพลีเมอร์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปยังแนวคิดที่จะศึกษาตัวทำละลายอินทรีย์ที่สามารถทำละลายโพลีเมอร์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ โดยที่ตัวทำละลายอินทรีย์จะเข้าไปทำลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์และทำให้อากาศที่อยู่ในโพลีเมอร์ออกมาได้ง่ายจนทำให้โพลีเมอร์กลายเป็นของเหลว โดยตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ได้แก่แอซีโตน และไดคลอโรมีเทน เนื่องจากตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งสองสามารถละลายโพลีเมอร์ให้เปลี่ยนสภาพจากของแข็งให้กลายเป็นของเหลวได้อย่างรวดเร็ว เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานที่สามารถแทรกตัวไปในช่องว่างให้แก่ทรายที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดเกาะกัน และจะเกิดการแข็งตัวของตัวยึดประสานในภายหลัง โดยในงานวิจัยจะมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ EPS มอร์ตาร์ที่นำตัวยึด

ประสานมาผสมกับทราย เพื่อหาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมด้านต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาขยะจากโฟม

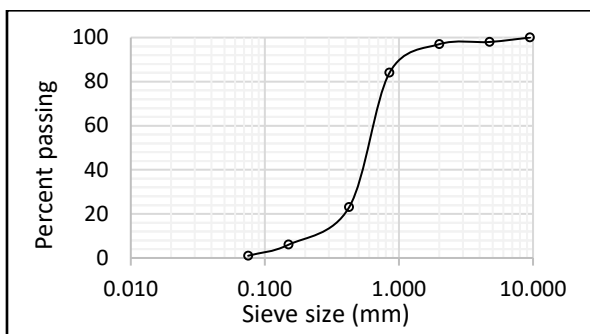
2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ได้จากการทดสอบทั้งค่าความหนาแน่น, ค่ากำลังรับแรงอัด และค่ากำลังรับแรงดัดของ EPS มอร์ตาร์ ที่อัตราส่วนโฟมเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ และที่ตัวทำละลายอินทรีย์ 2 ประเภทคือ แอซีโตนและไดคลอโรมีเทน
2. ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ EPS มอร์ตาร์เป็นวัสดุรับแรง เพื่อให้ในงานก่อสร้างและบรรเทาปัญหาขยะจากโฟม

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1) ทราย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทรายประเภท SP (poorly grade sand) ตามมาตรฐาน USCS (unified soil classification system) [25] ซึ่งเป็นวัสดุเม็ดหยาบ ทรายประเภทนี้เป็นทรายที่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากกว่าทรายประเภท SW (well grade sand) เนื่องจากขนาดของเม็ดดินมีขนาดที่ใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ เป็นผลทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินไม่ถูกเติมด้วยขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า เพื่อให้วัสดุเชื่อมประสานสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายได้มาก โดยแสดงกราฟการจำแนกขนาดของทรายเป็นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : การทดสอบเพื่อหาขนาดคละของทราย

3.1.2) โฟมประเภท EPS (Expandable Polystyrene Foam) ซึ่งเป็นโฟมพอลิสไตรีนที่ใช้แก๊สเพนเทน (C_5H_{12}) เป็นสารที่ทำให้ขยายตัว ดังนั้นองค์ประกอบของโฟมประเภทนี้จึงมีอากาศอยู่ร้อยละ 98 และมีพอลิสไตรีนเพียงร้อยละ 2 เนื่องจากโฟมประเภทนี้มีคุณสมบัติในการรับน้ำหนักได้ดี มีน้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวน และมีความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m^3 จึงถูกนำมาใช้ในงานเชิง

อุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์เพื่อรองรับการกระแทกอย่างแพร่หลายดังคุณสมบัติที่กล่าวมา อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ประโยชน์เสร็จสิ้นแล้วโฟมประเภทนี้ต้องใช้พื้นที่มากในการบริหารจัดการ ดังรูปที่ 2 งานวิจัยนี้จึงใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติโฟมและปริมาณขยะที่มากขึ้นเพื่อกำจัดขยะและใช้ประโยชน์ในการรีไซเคิล



รูปที่ 2 : โฟม EPS ที่ใช้งานแล้ว

3.1.3) ตัวทำละลายอินทรีย์ เนื่องจากวัสดุโฟมเป็นพอลิสไตรีนประเภทไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นในการทำละลายจะต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วต่ำ [26], [27] งานวิจัยนี้ได้เลือกตัวทำละลายอินทรีย์ประเภทแอซีโตนและไดคลอโรมีเทนที่สามารถทำละลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ในระยะเวลาอันสั้น เมื่อเทียบกับตัวทำละลายอินทรีย์ประเภทอื่น [28] เช่น เบนซิน โทลูอีน ดังรูปที่ 3 และคุณสมบัติดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 : ตัวทำละลายอินทรีย์แอซีโตนและไดคลอโรมีเทน

ตารางที่ 1 : คุณสมบัติของตัวทำละลายอินทรีย์

Property	Acetone	Dichloromethane
Chemical formula	C_3H_6O	CH_2Cl_2
Boiling point ($^{\circ}C$)	56	40
Melting point ($^{\circ}C$)	-94.7	-96.7
Density (kg/m^3)	784	1326.6
Molar mass (g/mol)	58.08	84.93

3.2) ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย คือแอซีโตนและไดคลอโรมีเทน (L) โฟมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นโฟมประเภท EPS (F) โดยการเตรียมส่วนผสมจะใช้อัตราส่วนผสมของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อโฟมที่อัตราส่วน (L:F) เท่ากับ 3.5 : 1 โดยคิดอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งอัตราส่วนนี้เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอที่จะทำให้ตัวทำละลายอินทรีย์สามารถละลายโฟม เปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวได้หมดดังรูปที่ 4 หลังจากละลายโฟมจนเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวแล้ว จึงนำตัวยึดประสานผสมเข้ากับทรายประเภท SP ดังรูปที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 7, 9, 11, 13, 15 และ 17 ของน้ำหนักทราย แสดงอัตราส่วนผสมได้ดังตารางที่ 2 และ 3 การผสมจะผสมจนตัวยึดประสานและทรายเข้ากันดี จากนั้นจึงเทลงแบบการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบมอร์ตาร์ [29] ที่มีขนาดของแบบการทดสอบ (กว้าง×สูง×ยาว) คือ 40×40×160 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมก่อนตัวอย่างนี้จะทำที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้พื้นที่ที่เป็นระบบปิด โดยมี fume hood หรืออุปกรณ์ดูดไอระเหยที่เกิดขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าวัสดุที่ผสมระหว่างตัวยึดประสานกับทรายว่า EPS มอร์ตาร์ แล้วนำมาทำการหาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมต่อไป



รูปที่ 4 : ละลายโฟมในตัวทำละลายอินทรีย์



รูปที่ 5 : ผสมตัวยึดประสานกับทราย



รูปที่ 6 : ก่อนตัวอย่างตามแบบการทดสอบมาตรฐาน ขนาด 40×40×160 มม.

ตารางที่ 2 : อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของตัวอย่าง
กรณีใช้ตัวทำละลายอินทรีย์แอซีโตน

No. Mixture	Foam (%) (by weight)	Sand (g)	Foam (g)	Acetone (g)
1	5	1200	60	210
2	7	1200	84	294
3	9	1200	108	378
4	11	1200	132	462
5	13	1200	156	546
6	15	1200	180	630
7	17	1200	204	714

ตารางที่ 3 : อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของตัวอย่าง
กรณีใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ไดคลอโรมีเทน

No. Mixture	Foam (%) (by weight)	Sand (g)	Foam (g)	Dichloro methane (g)
1	5	1200	60	210
2	7	1200	84	294
3	9	1200	108	378
4	11	1200	132	462
5	13	1200	156	546
6	15	1200	180	630
7	17	1200	204	714

3.3) การวิเคราะห์การทดสอบ

การทดสอบหาค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงดัด และค่ากำลังรับแรงอัด จะนำวัสดุ EPS มอร์ตาร์หล่อในแบบการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบมอร์ตาร์ เริ่มต้นผสมตัวอย่างโดยใช้อัตราส่วนตามตารางที่ 2 เมื่อผสมทรายเข้ากับตัวยึดประสานให้เข้ากันแล้วนำมาเข้าแบบที่เตรียมไว้ จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาจึงนำตัวอย่างออกจาก

แบบและฝังให้แห้งจนครบกำหนดเวลา 28 วัน โดยจำนวนการทดสอบ EPS มอร์ตาร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วนผสม จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดมาทดสอบหาค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงดัด และค่ากำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน BS EN 196-1: 1995; Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength [29] ด้วยเครื่องกดเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดัด ยี่ห้อ ELE และเครื่องกดเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด รุ่น YES-300 ทั้ง 2 การทดสอบกระทำที่ strain rate เท่ากับ 1.2 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 7 เมื่อก่อนตัวอย่าง EPS มอร์ตาร์ เกิดวิบัติหลังผ่านการทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะมีลักษณะดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 : เครื่องมือทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดและค่ากำลังรับแรงอัดของ EPS มอร์ตาร์



รูปที่ 8 : ก่อนตัวอย่าง EPS มอร์ตาร์ หลังการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ

โดยสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีดังนี้

ค่าความหนาแน่น

$$D = \frac{m}{V} \quad (1)$$

เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่น

m คือ น้ำหนักของวัสดุ

V คือ ปริมาตร

ค่ากำลังรับแรงดัด

$$R_f = \max \sigma_f = \frac{\max M}{W} \quad (2)$$

เมื่อ R_f คือ ค่ากำลังรับแรงดัด

σ_f คือ ค่าความเค้นดัด

M คือ ค่าโมเมนต์ดัด

W คือ โมดูลัสภาคตัด

ค่ากำลังรับแรงอัด

$$R_c = \max \sigma_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3)$$

เมื่อ R_c คือ ค่ากำลังรับแรงอัด

σ_c คือ ค่าความเค้นอัด

F_c คือ ค่าแรงอัดสูงสุด

1600 คือ หน้าตัดในการกดอัด (ขนาด 40 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร)

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

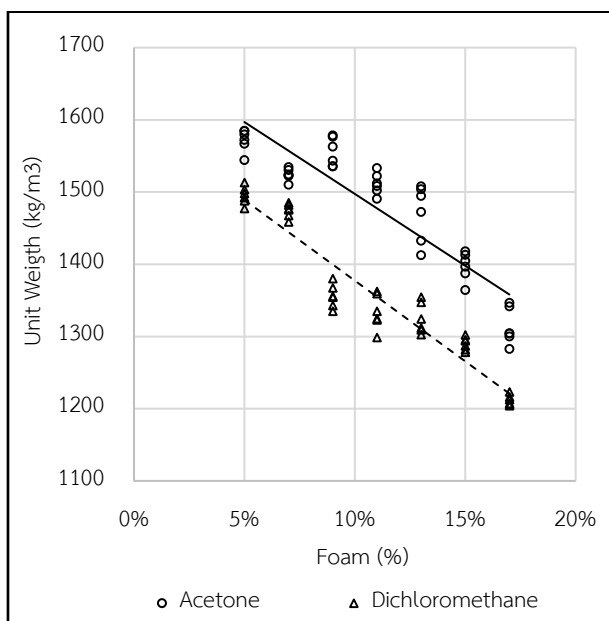
งานวิจัยนี้แสดงพฤติกรรมของโฟมที่ถูกตัวทำลายอินทรีย์ทั้งแอซีโตน และไดคลอโรมีเทน ให้อยู่ในสถานะของเหลวโดยนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเข้ากับทรายประเภท SP เนื่องจากพฤติกรรมของตัวยึดประสานสามารถเข้าไปแทนที่ในช่องว่างของทรายประเภท SP ซึ่งเป็นทรายที่มีช่องว่างจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อโฟมแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างและจับตัวกับอนุภาคของทรายแล้ว ก่อนตัวอย่างจะเริ่มแข็งตัว ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของก้อนตัวอย่าง EPS มอร์ตาร์ที่แข็งตัวจากการแทรกของโฟมในอนุภาคทรายโดยงานวิจัยจะแบ่งการศึกษาพฤติกรรมของก้อนตัวอย่างออกเป็น 3 หัวข้อได้แก่ 1. ค่าความหนาแน่น 2. ค่ากำลังรับแรงดัด และ 3. ค่ากำลังรับแรงอัด

4.1) ความหนาแน่นของ EPS มอร์ตาร์

ผลสรุปของการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของ EPS มอร์ตาร์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวยึดประสานเข้าไปในตัวอย่างค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากการแทรกตัวของโฟม ยังมีปริมาณตัวยึดประสานแทรกตัวเข้าไปในก้อนตัวอย่างมากขึ้นค่าความหนาแน่นจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นระหว่างตัวทำลายอินทรีย์ที่ใช้ทำลายโฟมทั้ง 2 ตัวทำลายอินทรีย์ให้ผลสรุปตามรูปที่ 9 ซึ่งเกิดจากการผสมระหว่างทรายที่เป็นวัสดุเม็ดหยาบกับตัวยึดประสานที่ได้จากการใช้ตัวทำลายอินทรีย์ที่แตกต่างกันส่งผลให้พฤติกรรมของการจับตัวเชื่อมกับเม็ดทรายมีลักษณะต่างกัน ค่าความหนาแน่นที่ได้จึงแตกต่างกัน

รูปที่ 10-15 เป็นภาพตัดขวางของ EPS มอร์ตาร์ด้วย เครื่อง digital microscope ที่กำลังขยาย 2000 เท่า เพื่อแสดงพฤติกรรม การจับตัวของตัวยึดประสานกับทราย โดยตัวยึดประสานที่ได้จากการ ทำละลายของแอซีโตน มีการแทรกตัวอัดแน่นเพื่ออุดช่องว่าง ที่เป็นอากาศระหว่างเม็ดทรายได้ดี พร้อมทั้งยึดเกาะให้เม็ดทราย ที่ไม่มีความเชื่อมแน่นให้กลายเป็นก้อนแข็ง ดังรูปที่ 10-12 ในขณะที่ตัวยึดประสานที่ได้จากการทำละลายของไดคลอโรมีเทน จะเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายในลักษณะที่เคลือบ รอบผิวทรายพร้อมทำการยึดเกาะ ดังรูปที่ 13-15 เป็นผลทำให้ ค่าความหนาแน่นของ EPS มอร์ตาร์จากแอซีโตนมีค่าสูงกว่า

ค่าความหนาแน่นของการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์แอซีโตน มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากรณีตัวทำละลายอินทรีย์ไดคลอโรมีเทน แต่พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณโฟมที่เปอร์เซ็นต์มากขึ้น ตัวยึดประสานจะเข้าไป จับตัวกับเม็ดทรายพร้อมกับแทนที่เม็ดทราย จึงทำให้ค่าความ หนาแน่นที่ได้มีค่าแนวโน้มที่ต่ำลง โดยค่าความหนาแน่นที่มากที่สุดเท่ากับ 1571.70 kg/m^3 (ที่อัตราส่วนผสม 5% โดยน้ำหนัก) และค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุดเท่ากับ 1312.95 kg/m^3 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดยน้ำหนัก) และตัวทำละลายอินทรีย์ไดคลอโรมีเทน มีค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่นที่มากที่สุดเท่ากับ 1495.23 kg/m^3 (ที่อัตราส่วนผสม 5% โดยน้ำหนัก) และค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุด เท่ากับ 1211.34 kg/m^3 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 9 : ค่าความหนาแน่นต่อเปอร์เซ็นต์โฟมที่ละลายด้วยแอซีโตน และไดคลอโรมีเทน

4.2) ค่ากำลังรับแรงดัดของ EPS มอร์ตาร์

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงดัด จะเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์โฟมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวยึดประสานที่ แทรกตัวภายในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายยังคงแสดงพฤติกรรมของ ความยืดหยุ่นของโฟมก่อนที่จะนำมาขึ้นรูป ดังนั้นความสามารถ รับแรงดัดของ EPS มอร์ตาร์จึงมีค่าสูงขึ้น โดยผลการทดสอบค่า กำลังรับแรงดัด โฟมที่ถูกละลายโดยแอซีโตนมีค่ากำลังรับแรงดัด เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 61.52 kg/cm^2 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดย น้ำหนัก)และโฟมที่ถูกละลายโดยไดคลอโรมีเทนมีค่ากำลังรับแรง ดัดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 54.34 kg/cm^2 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดยน้ำหนัก)



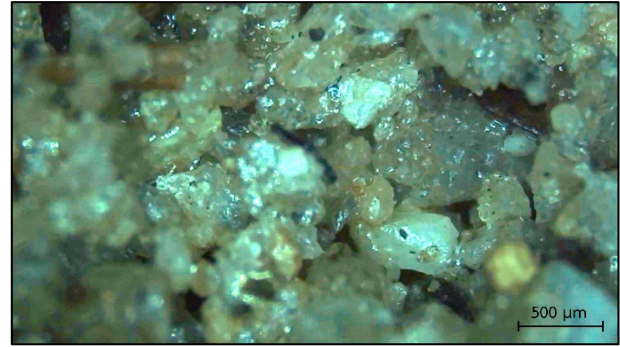
รูปที่ 10 : ภาพตัดขวางของ EPS มอร์ตาร์โดยตัวทำละลายอินทรีย์ แอซีโตน ที่ปริมาณโฟม 5%



รูปที่ 11 : ภาพตัดขวางของ EPS มอร์ตาร์โดยตัวทำละลายอินทรีย์ แอซีโตน ที่ปริมาณโฟม 13%



รูปที่ 12 : ภาพตัดขวางของ EPS มอร์ตาร์โดยตัวทำละลายอินทรีย์
แอซีโตน ที่ปริมาณโฟม 17%



รูปที่ 15 : ภาพตัดขวางของ EPS มอร์ตาร์โดยตัวทำละลายอินทรีย์
ไดคลอโรมีเทน ที่ปริมาณโฟม 17%

ค่ากำลังรับแรงดัดของ EPS มอร์ตาร์ เนื่องจากการละลายของตัวทำละลายอินทรีย์ 2 ชนิดมีความแตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกใช้อัตราส่วน 5–13% ค่ากำลังรับแรงดัดของโฟมที่ถูกละลายโดยแอซีโตนในจะมีค่าต่ำกว่าโฟมที่ถูกละลายโดยไดคลอโรมีเทน ช่วงที่สองใช้อัตราส่วน 13–17% ค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าโฟมที่ใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ [30] ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 13 : ภาพตัดขวางของ EPS มอร์ตาร์โดยตัวทำละลายอินทรีย์
ไดคลอโรมีเทน ที่ปริมาณโฟม 5%

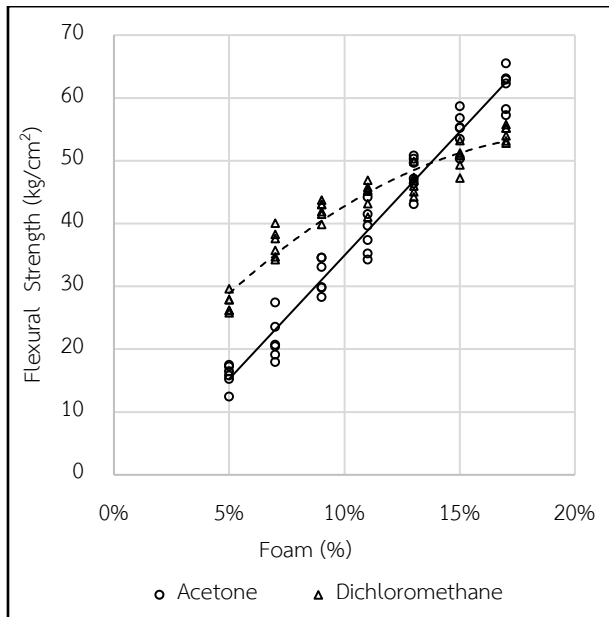


รูปที่ 14 : ภาพตัดขวางของ EPS มอร์ตาร์โดยตัวทำละลายอินทรีย์
ไดคลอโรมีเทน ที่ปริมาณโฟม 13%

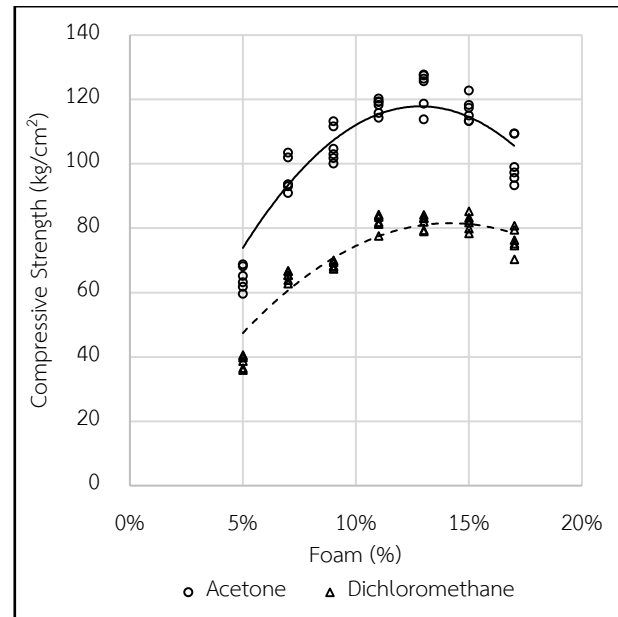
เนื่องจาก EPS มอร์ตาร์กรณีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นแอซีโตนที่เปอร์เซ็นต์โฟมน้อย การจับตัวกันเป็นก้อนของตัวยึดประสานจะทำให้เกิดการกระจายของตัวเชื่อมประสานไม่ทั่วถึงดี เป็นผลทำให้วัสดุที่มีทรายเป็นหลักไม่สามารถรับแรงดัดได้มาก ดังรูปที่ 10 แต่เมื่อมีเปอร์เซ็นต์ของโฟมที่มากพอ ทำให้ตัวยึดประสานมีลักษณะเป็นก้อนที่จับตัวกันกับทรายได้อย่างแน่นหนา ดังรูปที่ 11 และ 12 จึงทำให้ EPS มอร์ตาร์รับกำลังแรงดัดได้สูงขึ้นมาก ตรงข้ามกับ EPS มอร์ตาร์กรณีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นไดคลอโรมีเทนที่มีความสามารถในการกระจายตัวเคลือบเม็ดทรายได้ดี ทำให้ EPS มอร์ตาร์ที่ได้สามารถรับแรงดัดได้มากกว่าในช่วงแรก ดังรูปที่ 13 แต่เมื่อปริมาณตัวยึดประสานมากขึ้น ถึงแม้กำลังรับแรงดัดที่ได้จะสูงขึ้น แต่การยึดเกาะเม็ดทรายที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นหนาเท่า ดังรูปที่ 14 และ 15 จึงได้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่ากรณีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นแอซีโตน

4.3) ค่ากำลังรับแรงอัดของ EPS มอร์ตาร์

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณโฟมที่เพิ่มขึ้นและจะเริ่มลดลง โฟมที่ถูกละลายโดยแอซีโตนจะมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงที่สุดในอัตราส่วนโฟม 13% โดยน้ำหนักซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 123.25 kg/cm² และค่ากำลังรับแรงอัดของโฟมที่ถูกละลายโดยไดคลอโรมีเทนจะมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงที่สุดในอัตราส่วนโฟม 15% โดยน้ำหนักซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 81.82 kg/cm²



รูปที่ 16 : ค่ากำลังรับแรงดัดต่อเปอร์เซ็นต์โฟมที่ละลายด้วยแอซีโตนและไดคลอโรมีเทน



รูปที่ 17 : ค่ากำลังรับแรงอัดต่อเปอร์เซ็นต์โฟมที่ละลายด้วยแอซีโตนและไดคลอโรมีเทน

จากการทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากโฟมที่เปลี่ยนสถานะของแข็งเป็นของเหลวเข้าไปแทรกระหว่างเม็ดทราย [31] ความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดของตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งสอง เนื่องจากการแทรกตัวของตัวอัดประสานที่ถูกละลายด้วยแอซีโตนสามารถแทรกและอุดตัวในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายได้ดี เป็นผลให้ EPS มอร์ตาร์ที่ได้มีช่องว่างที่เป็นอากาศน้อย และเมื่อตัวอัดประสานมีการแข็งตัวกับเม็ดทรายเป็นก้อนอย่างแน่นหนา ดังรูปที่ 10-12 จึงทำให้สามารถรับแรงอัดได้สูง ค่ากำลังในการรับแรงอัดที่ได้จึงสูงกว่ากรณีของ EPS มอร์ตาร์จากตัวอัดประสานที่ถูกละลายด้วยไดคลอโรมีเทนที่มีลักษณะของการแทรกตัวของตัวอัดประสานเป็นแบบเคลือบรอบผิวเม็ดทราย ดังรูปที่ 13-15 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณโฟมมากเกินไป ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มของปริมาณโฟมจะทำให้ความหนาแน่นของ EPS มอร์ตาร์ลดลง เม็ดทรายจะถูกแทนที่ด้วยโฟม ส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านการรับแรงอัดมีค่าลดลง เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของ EPS มอร์ตาร์ ที่ใช้แอซีโตนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ มีค่าสูงกว่า EPS มอร์ตาร์ที่ใช้ไดคลอโรมีเทน ดังแสดงในรูปที่ 17

5) สรุปผล

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อละลายโฟมให้เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวด้วยแอซีโตนหรือไดคลอโรมีเทน ตัวอัดประสานสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดทรายประเภท SP ได้ดี และเกาะติดกันได้ดีเนื่องจากตัวอัดประสานมีคุณสมบัติการยึดเกาะคล้ายคลึงกับกาว แต่เนื่องจากการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่แตกต่างกันจึงให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการเชื่อมประสานของตัวอัดประสานหลังจากที่ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ละลายโฟมไปแล้วมีลักษณะที่ต่างกัน จึงส่งผลให้การแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้ไม่เท่ากัน โดยมีผลสรุปคือ EPS มอร์ตาร์ที่ใช้แอซีโตนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์จะมีความหนาแน่นน้อยที่สุดอยู่ที่ 1312.95 kg/m^3 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดยน้ำหนัก), ค่ากำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดอยู่ที่ 61.52 kg/cm^2 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดยน้ำหนัก) และค่ากำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดอยู่ที่ 123.25 kg/cm^2 (ที่อัตราส่วนผสม 13% โดยน้ำหนัก) และ EPS มอร์ตาร์ที่ใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์มีความหนาแน่นน้อยที่สุดอยู่ที่ 1211.34 kg/m^3 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดยน้ำหนัก), ค่ากำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดอยู่ที่ 54.34 kg/cm^2 (ที่อัตราส่วนผสม 17% โดยน้ำหนัก) และค่ากำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดอยู่ที่ 81.82 kg/cm^2 (ที่อัตราส่วนผสม 15% โดยน้ำหนัก)

อย่างไรก็ตามการละลายโพลีเมอร์โดยตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งสองได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูง โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัดของโพลีเมอร์ที่ถูกละลายด้วยเอซีโตนคิดเป็น 51.35 เปอร์เซ็นต์ของคอนกรีต (240 kg/cm^2) [32] นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงอัดของ EPS มอร์ตาร์ที่ได้ยังให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาตามมาตรฐาน (50 kg/cm^2) [33] แต่มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงเฉื่อยของอิฐมวลเบาตามมาตรฐาน (173.35 kg/cm^2) [34] แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบามีค่าความหนาแน่นที่น้อยกว่า (มีค่าเท่ากับ 600 kg/m^3)

อย่างไรก็ตามนอกจากการนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างในด้านอื่น ๆ ได้ ในกระบวนการใช้งานนั้นยังช่วยลดขยะประเภทโพลีเมอร์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมลงไปได้ ยกตัวอย่างในกรณีที่ต้องการสร้างวัสดุอิฐบล็อกที่เทียบเท่ากับอิฐมวลเบาตามมาตรฐาน ที่มีปริมาตรเท่ากับ 9,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อก่อน เมื่อใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายอินทรีย์เอซีโตนที่ให้กำลังรับแรงสูงสุด ณ อัตราส่วนโพลีเมอร์ 13% โดยน้ำหนัก จะต้องใช้ปริมาณโพลีเมอร์ถึง 1.72 กิโลกรัม ต่อทราย 11.51 กิโลกรัม

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตราคาของ EPS มอร์ตาร์กับอิฐมวลเบาแล้ว ราคาการผลิตของ EPS มอร์ตาร์จะมีราคาที่สูงกว่า ณ ปริมาณการผลิตที่เท่ากัน ซึ่งราคาของอิฐมวลเบาขนาด $20 \times 60 \times 7.5$ เซนติเมตร มีราคาประมาณ 25 บาท เทียบเท่ากับอิฐมวล 6 ก้อน ราคา 15 บาท โดยที่ EPS มอร์ตาร์ที่ถูกละลายด้วยเอซีโตนมีราคาต้นทุนประมาณ 60 บาท ส่วน EPS มอร์ตาร์ที่ถูกละลายด้วยไดคลอโรมีเทนจะมีต้นทุนประมาณ 80 บาท อย่างไรก็ตามหากมองในบริบทของการนำขยะมาใช้ประโยชน์การผลิต EPS มอร์ตาร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานก่อสร้างที่นำขยะกลับมาใช้เพื่อทดแทนวัสดุในรูปแบบเดิม จากผลการหาค่ากำลังรับแรงอัด การหาค่ากำลังรับแรงดัด และต้นทุนการผลิตของ EPS มอร์ตาร์ที่ถูกละลายด้วยเอซีโตนและไดคลอโรมีเทน งานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่า การใช้ EPS มอร์ตาร์จากตัวทำละลายอินทรีย์เอซีโตน ณ อัตราส่วนโพลีเมอร์ 13% โดยน้ำหนัก เหมาะสมที่สุดทั้งด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรม และต้นทุนการผลิต

กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนเป็นอย่างดีจากโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีบล็อกรีไซเคิลเพื่อลดขยะพลาสติกในชุมชนการท่องเที่ยวที่เป็น

มิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และบริษัท ASIA GREEN ROAD ที่ให้การสนับสนุน

REFERENCES

- [1] Plastics Europe, "Plastics - the Facts 2017," 2018. [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2017-Plastics-the-facts.pdf>
- [2] P. Punyayong. "Plastic waste." (in Thai), ONEP.go.th. <https://www.onep.go.th/ขยะพลาสติก/> (accessed Jan. 14, 2022).
- [3] A. Magnin *et al.*, "Enzymatic recycling of thermoplastic polyurethanes: Synergistic effect of an esterase and an amidase and recovery of building blocks," *Waste Manag.*, vol. 85, pp. 141–150, Feb. 2019.
- [4] B. C. Levin and E. D. Kuligowski, "Combustion toxicology," in *Encyclopedia of Toxicology*, 2nd ed. New York, NY, USA: Academic Press, 2005, pp. 639–652.
- [5] Y. Yanagiba *et al.*, "Styrene trimer may increase thyroid hormone levels via down-regulation of the Aryl Hydrocarbon Receptor (AhR) target Gene UDP-Glucuronosyltransferase," *Environ. Health Perspect.*, vol. 116, no. 6, pp. 740–745, 2008.
- [6] Y. Wang, N. Lai, J. Zuo, G. Chen, and H. Du, "Characteristics and trends of research on waste-to-energy incineration: A bibliometric analysis, 1999–2015," *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 95–104, Dec. 2016.
- [7] B. S. Ramadan, I. Rachman, N. Ikhlas, S. B. Kurnuawan, M. F. Miftahadi, and T. Matsumoto, "A comprehensive review of domestic-open waste burning: recent trends, methodology comparison, and factors assessment," *J. Mat. Cycles Waste Manag.*, vol. 24, pp. 1633–1647, May 2022.
- [8] C. Mukherjee, J. Denney, E. G. Mbonimpa, J. Slagley, and R. Bhowmik, "A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA," *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 119, Mar. 2020, Art. no. 109512.
- [9] H. I. Abdel-Shafy and M. S. M. Mansour, "Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization," *Egyptian J. Petroleum*, vol. 27, no. 4, pp. 1275–1290, Dec. 2018.
- [10] R. Kikuchi and R. Gerardo, "More than a decade of conflict between hazardous waste management and public resistance: A case study of NIMBY syndrome in Souselas (Portugal)," *J. Hazardous Mater.*, vol. 172, no. 2–3, pp. 1681–1685, Dec. 2009.
- [11] G. D. Feo and S. D. Gisi, "Using MCDA and GIS for hazardous waste landfill siting considering land scarcity for waste disposal," *Waste Manag.*, vol. 34, no. 11, pp. 2225–2238, Nov. 2014.



- [12] M. A. Kamaruddin, M. S. Yusoff, L. M. Rui, A. M. Isa, M. H. Zawawi, and R. Alrozi, "An overview of municipal solid waste management and landfill leachate treatment: Malaysia and Asian perspectives," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, no. 35, pp. 26988–27020, 2017.
- [13] F. Cucchiella, M. Gastaldi, and I. D'Adamo, "Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill," *Energy Convers. Manag.*, vol. 131, pp. 18–31, Jan. 2017.
- [14] R. B. Brennan, M. G. Healy, L. Morrison, S. Hynes, D. Norton, and E. Clifford, "Management of landfill leachate: The legacy of European Union Directives," *Waste Manag.*, vol. 55, pp. 355–363, Sep. 2016.
- [15] I. T. Osazee, "Landfill in a sustainable waste disposal," *Eur. J. Environ. Earth Sci.*, vol. 2, no. 4, pp. 67–74, 2021.
- [16] S. S. Yang *et al.*, "Progresses in polystyrene biodegradation and prospects for solutions to plastic waste pollution," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 150, 2018, Art. no. 012005.
- [17] K. M. Zia, H. N. Bhatti, and I. A. Bhatti, "Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review," *Reactive Functional Polym.*, vol. 67, no. 8, pp. 675–692, Aug. 2007.
- [18] A. J. Hulme and T. C. Goodhead, "Cost effective reprocessing of polyurethane by hot compression moulding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 139, no. 1–3, pp. 322–326, Aug. 2003.
- [19] A. Kemoni and M. Piotrowska, "Polyurethane recycling and disposal: Methods and prospects," *Polymers*, vol. 12, no. 8, Aug. 2020, Art. no. 1752.
- [20] R. Gu, S. Konar, and M. Sain, "Preparation and characterization of sustainable polyurethane foams from soybean oils," *J. Amer. Oil Chemists' Soc.*, vol. 89, pp. 2103–2111, 2012.
- [21] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, May 2016.
- [22] R. Sri-Ravindrarajah and A. J. Tuck, "Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads," *Cement Concrete Composites*, vol. 16, no. 4, pp. 273–277, 1994.
- [23] E. I. Gutierrez-Velasquez, S. N. Monteiro, and H. A. Colorado, "Characterization of expanded polystyrene waste as binder and coating material," *Case Stud. Construction Mater.*, vol. 16, Jun. 2022, Art. no. e00804.
- [24] A. Kan and R. Demirboga, "A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 6, pp. 2994–3000, Mar. 2009.
- [25] *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM C136-01, Aug. 2017. [Online]. Available: <https://store.astm.org/c0136-01.html>
- [26] J. Brandrup, E. H. Immergut, and E. A. Grulke. *Polymer Handbook*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1975.
- [27] B. A. Miller-Chou and J. L. Koenig, "A review of polymer dissolution," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 28, no. 8, pp. 1223–1270, Aug. 2003.
- [28] A. Mwasha, A. Armstrong-Richardson, and W. Wilson, "Management of polystyrene wastes using a supercritical solvent—propanone," *J. Assoc. Prof. Eng. Trinidad Tobago*, vol. 41, pp. 23–28, 2013.
- [29] *Methods of testing cement - Determination of strength*, BS EN 196-1:2016, May 2016. [Online]. Available: <https://knowledge.bsigroup.com/products/methods-of-testing-cement-determination-of-strength>
- [30] A. Milling, A. Mwasha, and H. Martin, "Exploring the full replacement of cement with expanded polystyrene (EPS) waste in mortars used for masonry construction," *Construct. Build. Mater.*, vol. 253, Aug. 2020. Art. no. 119158.
- [31] M. T. Garcia, I. Gracia, G. Duque, A. D. Lucas, and J. F. Rodriguez, "Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process," *Waste Manag.*, vol. 29 no. 6, pp. 1814–1818, Jun. 2009.
- [32] V. Chovichian, "Properties of concrete," in *Concrete Technology*, 8th ed. Bangkok, Thailand: New Thaimit (in Thai), 1996, ch. 12, p. 149.
- [33] A. J. Bogas, J. Brito, and J. M. Figueiredo, "Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete," *J. Cleaner Prod.*, vol. 89, pp. 187–195, Feb. 2015.
- [34] P. Joyklad and S. Areecharoen, "Mechanical properties of local cement-clay interlocking bricks in central part of Thailand," (in Thai), *SWU Eng. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, 2018.

Bogie Frame Assessment: A Multibody Dynamic Approach

Thanaporn Talingthaisong¹ Aunna Sukhom² Sedthawatt Sucharitpwatskul³

Anchalee Manonukul⁴ Panya Kansuwan^{5*}

¹*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan
Khon Kaen Campus, Khon Kaen, Thailand*

²*School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand*

^{3,4}*National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency,
Pathumthani, Thailand*

^{5*}*Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand*

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

Received: 11 August 2024; Revised: 7 December 2024; Accepted: 27 December 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

Developing a new bogie frame design requires a complete design process to ensure the safe operation of the running vehicles. EN 13749 specifies the procedure from the initial design phase to the final verified on-track test. Due to the current power of computational hardware and software, the process can be performed and crossed over among phases seamlessly by integrating finite element analysis capability within multibody dynamic software. If design engineers perform the analysis entirely on computers before manufacturing the prototype, they can reduce product development time, which is the crucial benefit of optimizing their design. This paper presents the discrepancy of resulting stress from the calculation by the code with those from simulated test rigs within ADAMS. Furthermore, fatigue analysis software has demonstrated its effectiveness in evaluating fatigue life, particularly when considering the mean stress effect. The results can assist test engineers in locating hot spot positions for strain monitoring and further adjusting design procedures, especially for specific components such as side frames or cross beams.

Keywords: ADAMS flex, Bogie frame, CAE fatigue, Durability, Multibody analysis

I. INTRODUCTION

National administrators financially support technology transfer in various industries to promote local industrial manufacturers. One of the major industries is the railway system, which results in railway engineering curriculums in many universities to produce working forces and railway organizations in various government sectors to administer and support activities to ensure continuous developments in the field. The technologies include fundamental research on railway vehicle dynamics [1] rail/wheel contact failure mechanism [2], [3] and track quality measurement and modification [4].

Manufacturing a new bogie frame design is challenging to qualify safety standards at higher operating velocities. Railway engineers must perform detailed calculations, control manufacturing quality, and validate the results at every step to conform to the standards. EN13749 and EN14363 by European standard body (CEN) are recognized. EN13749 specifies the complete design processes of a bogie frame, while EN14363 states the acceptance criteria of a railway vehicle via its running characteristics [5]–[7].

Previously, the design process for a new railway bogie frame depended on manufacturing experiences from on-bench static and fatigue tests according to UIC 515-1 for trailer bogies [8] UIC615-4 for motor bogies [9] and UIC 510-3 for freight bogies [10]. EN13749 now standardizes the acceptance process based on the results of structural calculations from static assessment and structural calculations from fatigue assessment. Further verification and validation tests are on-bench static, on-bench fatigue, and on-track tests.

The structural calculations for static and fatigue assessment use a well-accepted numerical method, i.e., the finite element analysis (FEA), to calculate the resulting stress. The force vectors and their applied location are predetermined theoretically from operational load cases (LCs). Typically, they deviate from on-bench and on-track tests due to different boundary conditions at

the connection of the bogie frame with attached parts or equipment. Thus, the code requires verifying and validating the calculated stress with stress derived from attached strain gauges when the body frame is subjected to on-bench and on-track tests. The significant advantage of the on-bench and on-track tests is that we can measure the forces at attached equipment and thus its fatigue life.

Nevertheless, the suitable location to attach the strain gauge is still undetermined. Designers usually consult finite element analysis and multibody dynamics (MBD) to locate the positions. The on-bench test is necessary to assess the stress and force before assembling the train for the on-track test.

The last step of the complete design program is the on-track test. The test is formidable but inevitable if the bogie frame is the new design. According to the standard, manufacturers must perform twisted track tests and curve track tests on each test zone. One of the EN13749's objectives is the strain measurement. During the test, test engineers record, evaluate, and document the complete verification program to verify that there is no excessive plastic deformation during the test and no fatigue damage within an extrapolation method. If the bogie is an existing design bogie, reduced programs with only calculation and on-bench test programs are adequate.

Due to the development of multibody dynamics such as Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS), a widely used tool in the field, engineers simulate the dynamic behavior of mechanical systems under various loading conditions. ADAMS has proven effective in simulating bogie frame dynamics, facilitating the optimization of strain gauge placement during experimental tests [11]. Similarly, the integration of MBD with FEA has been successfully applied to refine bogie designs and predict structural durability under varying load conditions [12]. Engineers can reduce the product development time during the validation and

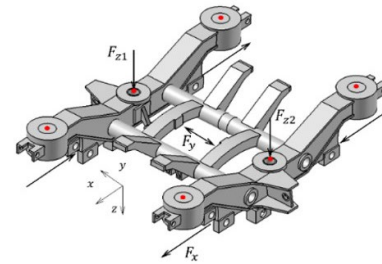
verification process. A virtual prototyping process using the software makes time reduction possible by building a model, testing the design, reviewing results, and finally improving the model through parameterized or optimized processes. When forces at each joint can be determined, we predict more precise loads and more accurate subsequent durability of the structure. In addition, the multibody dynamic with a flexible body approach suggests a high-stress location where the engineer should attach the strain gauges when the real on-bench test needs to be performed. In this paper, we compare stress using three different approaches: 1) finite element analysis using forces suggested in the code, 2) finite element analysis using forces at connecting joints from on-bench test simulated in ADAMS, and 3) finite element analysis using flexible body analysis from on-bench test simulated in ADAMS.

II. RESEARCH METHODOLOGY

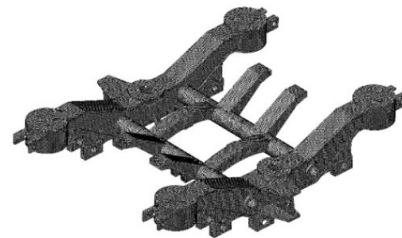
A. Bogie Model Definition

According to EN13749, the bogie frame (figure 1a) is considered as category B-I for mainline and inter-city passenger carrying rolling stock application in Thailand. It comprises an S355J2W welded plate for two side frames and an S355J2H plate for the two cylindrical pipes joining the side frames. The mechanical properties of the materials are provided in table 1.

Table 2 demonstrates mass system parameters used for numerical analysis. For subsequent finite element analysis, the same meshed bogie frame is used with tet10 element type having an average mesh size of 15 mm, as shown in figure 1b.



a) bogie frame geometry



b) meshed geometry

Figure 1: a) bogie frame geometry b) meshed geometry

Table 1: Materials' mechanical properties

Properties	Value	Unit
Poisson's ratio	0.3	-
Elastic Modulus	207	GPa
0.2% Yield strength	355	MPa
Ultimate tension strength	600	MPa

Table 2: System parameters used for numerical analysis

Mass parameters	Symbol	Value	Unit
Vehicle mass	M_V	41490	kg
Exceptional design payload	P_1	10899	kg
Normal design payload	P_2	7930	kg
Bogie mass	m	5000	kg
Bogie mass without any secondary spring mass	m^+	4856	kg
Bogie frame mass	m_t	1485	kg
Moment of inertia of bogie frame in roll	I_{tx}	754	kg · m ²
Moment of inertia of bogie frame in pitch	I_{ty}	683	kg · m ²
Moment of inertia of bogie frame in yaw	I_{tz}	1375	kg · m ²
Wheelset mass	m_w	932	kg
Moment of inertia of the wheelset – roll component	I_{wx}	272	kg · m ²

Table 2: System parameters used for numerical analysis (Cont.)

Mass parameters	Symbol	Value	Unit
Moment of inertia of the wheelset – pitch component	I_{wy}	73	$kg \cdot m^2$
Moment of inertia of the wheelset – yaw component	I_{wz}	272	$kg \cdot m^2$
Primary vertical spring mass per piece		30	kg
Primary vertical damper mass per piece		20	kg
Secondary spring and damper mass per piece		42	kg
Secondary lateral damper mass per piece		11	kg
Secondary yaw damper mass per piece		18	kg
Axle box and arm per set		85	kg
Air compressor		450	kg
Anti-roll torsion bar per set		116	kg
Traction rod		96	kg
Traction seat		163	kg
Adjust mass bogie		160	kg
Adjust mass car body		616	kg
Dimension parameters			
Half of the track gauge	a	0.5000	m
Bogie frame wheel base	l	2.3000	m
Wheel radius	r_o	0.4255	m
Spring and damper parameters			
Primary suspension - Vertical stiffness	K_{wz}	9.95E05	N/m
Primary suspension – Vertical damping	C_{wz}	Figure 2a	
Secondary suspension – Vertical stiffness	K_{tz}	4.50E05	N/m
Secondary suspension – Vertical damping	C_{tz}	Figure 2b	
Secondary suspension – Yaw damping	C_{tx}	Figure 2c	
Secondary suspension – Lateral damping	C_{ty}	Figure 2d	

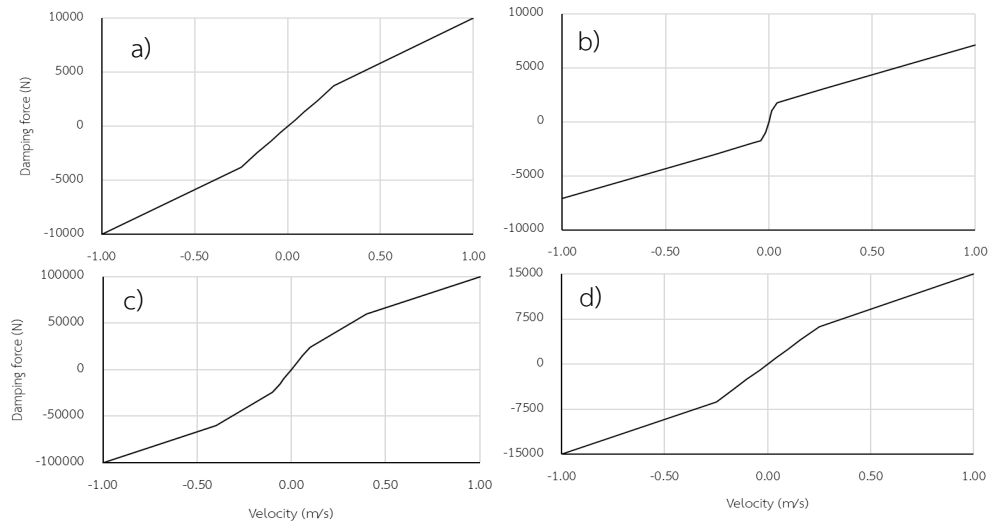


Figure 2: Damping coefficient curve

B. Structural Stress Analysis

There are two major computational assessments in the initial phase of the designing procedure, i.e., static stress analysis from exceptional loads and fatigue stress

analysis from normal service loads [5]. In addition, we add a normal static LC. The three load categories are as follows.

1) *Normal Static LC*: This case considers only normal LC having two vertical forces ($F_{z1,2}$), in Eq. (1), applying on each side frame (figure 1a) with appropriate displacement constraints.

$$F_{z1} = F_{z2} = \frac{F_z}{2} = \frac{G(M_V + 1.2P_2 - 2m^+)}{4} \quad (1)$$

2) *Exceptional Static LCs*: These loads are applied for static stress analysis to ensure limited plastic deformation in the frame and no exceeding critical forces at any attached equipment. The code requires four LCs combining vertical, transverse, longitudinal, longitudinal shunt, and twisted track forces.

Vertical force (F_z) derives from vehicle sprung mass, including design exceptional payload (P_1) with a vertical acceleration of 1.4 G as expressed in Eq. (2). According to EN 15663, P_1 is the summation of designed sitting and standing passenger mass, including their luggage.

$$F_{z1max} = F_{z2max} = \frac{F_{zmax}}{2} = \frac{1.4G(M_V + P_1 - 2m^+)}{4} \quad (2)$$

Transverse force (F_y) is the summation of lateral flange forces at wheel-rail contact patches when the vehicle negotiates a curve track. *Prud'homme* limit provides the formula for the contact force in Eq. (3).

$$F_{y1max} = F_{y2max} = \frac{F_{ymax}}{2} = 10^4 + \frac{(M_V + P_1)G}{12} \quad (3)$$

Other than the transverse force, when a vehicle passes a curve, longitudinal lozenging force (F_x) exist as in Eq. (4) to yaw the oppositely the bogie frame at each wheel.

$$F_{x1max} = 0.1(F_{zmax} + m^+G) \quad (4)$$

Additionally, the damping coefficient curve illustrated in figure 2 corresponds to the data presented in table 2, which represents the relationship between velocity and damping force. The primary suspension's vertical damping is shown in figure 2(a), while the secondary suspension's vertical damping, yaw damping, and lateral damping are depicted in figures 2(b), 2(c), and 2(d), respectively.

Longitudinal shunt forces in the analysis equal the bogie inertia force under an acceleration of 3G. Finally,

forces induced by a twisted track are considered in two cases, i.e., a track twisted 1% and a wheel completely unloaded. table 3 concludes the combination of the forces in each LC that the frame must pass the following regulation limit. The ratio of the 0.2% yield stress to the Von Mises stress in the whole structure is higher than 1 for the complete acceptance program and 1.5 for the reduced program.

Table 3: Force combination in each verified LC

Force type	LC01	LC02	LC03	LC04
Vertical force, F_{zmax}	✓	✓	✓	✓(*)
Transverse force, F_{ymax}	✓			
Longitudinal lozenging force, F_{x1max}		✓		
Longitudinal shunt load			✓	
Twisted loading	✓			
Wheel unloading				✓

*Empty Passenger Car

3) *Normal Fatigue LCs*. The applied forces are the same as in exceptional loads but less severe. The vertical forces in Eq. (1) are sprung masses. Transverse forces on each axle are stated in Eq. (5), and longitudinal forces on each wheel are shown in Eq. (6). The twisted track to be assessed is at 0.5%.

$$F_{y1} = F_{y2} = \frac{F_y}{2} = \frac{F_y + m^+G}{8} \quad (5)$$

$$F_{x1} = 0.05(F_y + m^+G) \quad (6)$$

The static test corresponding to the combinations of vertical and transverse forces is defined by the 9 cases in table 4. Roll and bouncing, which induce quasi-static and dynamic variations of vertical forces, are represented by the coefficients α and β , respectively. Typically, the values of these coefficients are 0.1 and 0.2 for α and β , respectively.

Fatigue LCs corresponding to vertical, transversal, and twisted track forces are combined into different load cases in table 2, and the additional combined vertical and longitudinal load sequence in table 5.

Table 4: Vertical and transverse force combination

LCs	F_{z1}	F_{z2}	F_y	Twisted
1	$F_z/2$	$F_z/2$	0	✗
2	$(1 + \alpha - \beta)F_z/2$	$(1 - \alpha - \beta)F_z/2$	0	✗
3	$(1 + \alpha - \beta)F_z/2$	$(1 - \alpha - \beta)F_z/2$	F_y	✓
4	$(1 + \alpha + \beta)F_z/2$	$(1 - \alpha + \beta)F_z/2$	0	✗
5	$(1 + \alpha + \beta)F_z/2$	$(1 - \alpha + \beta)F_z/2$	F_y	✓
6	$(1 - \alpha - \beta)F_z/2$	$(1 + \alpha - \beta)F_z/2$	0	✗
7	$(1 - \alpha - \beta)F_z/2$	$(1 + \alpha - \beta)F_z/2$	$-F_y$	✓
8	$(1 - \alpha + \beta)F_z/2$	$(1 + \alpha + \beta)F_z/2$	0	✗
9	$(1 - \alpha + \beta)F_z/2$	$(1 + \alpha + \beta)F_z/2$	$-F_y$	✓

Table 5: Vertical and longitudinal force combination

LCs	F_{z1}	F_{z2}	F_x
1	$F_z/2$	$F_z/2$	0
2	$F_z/2$	$F_z/2$	F_{x1}
3	$F_z/2$	$F_z/2$	$-F_{x2}$

C. Boundary Conditions

The location of displacement boundary conditions in the calculation is expressed in table 6. The displacement boundary conditions in x-, y-, and z-directions in exceptional LCs are shown in table 6, in which the blank means no displacement constraint. There are no rotation constraints. For normal LCs, the displacement boundary condition is the same as LC03 in table 6. In all cases, the self-weight of the bogie frame is considered with gravitational acceleration (G) of 9806.65 mm/s^2

D. Test Rig Model

The complete approached program performs the strength verification on the bogie test rig to verify the static and fatigue calculation from the strain measurement at determined spots that experience high-stress values. The loading resembles static and fatigue calculation cases but includes forces at attached equipment joints. A simulated test rig is a model with attached equipment such as an anti-roll bar, secondary suspension, and passenger loads on top of a pivot plate. The frame is connected to four axle boxes via primary suspension

systems and to a passenger car via secondary suspension systems. Suspension parameters are provided in table 2. As a result, a complete assembly of the bogie with an entire mass of 5000 kg is shown in figure 3.

Table 6: x-,y-,z-displacement constraint, <x, y, z>, for each exceptional LC

Force type	LC00	LC01	LC02	LC03	LC04
Front left spring	<0, ,0>	<0, ,1.15>	<0, ,0>	< , ,0>	< , , >
Front right spring	<0,0,0>	<0,0,0>	<0,0,0>	< , ,0>	<0,0,0>
Rear left spring	< , ,0>	< , ,1.15>	< , ,0>	< , ,0>	< , ,0>
Rear right spring	< , ,0>	< , ,0>	< , ,0>	< , ,0>	< , ,0>
Second spring left	< , , >	< , , >	< , , >	<0,0, >	< , , >
Second spring right	< , , >	< , , >	< , , >	<0,0, >	< , , >

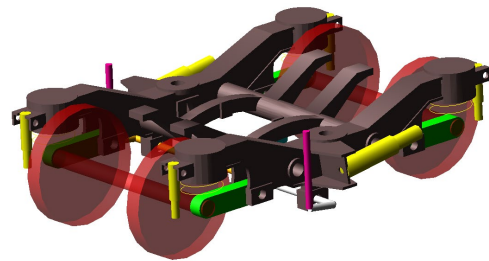


Figure 3: The bogie assembly.

E. Fatigue Strength Properties of the Materials

S-N curves can be approximately established on ultimate tension strength and elastic constant using a power relationship

$$S = 10^C N^b \quad (7)$$

In which S is stress, N is number of cycles, and C and b are material constants. Given the mechanical properties in table 1 with the derived parameter in table 7, the S-N curve of S355J2W is shown in figure 4.

Table 7: Fatigue strength properties of S355J2W

Parameter	Description	Value
SR1	Stress range at 1 cycles (MPa)	2726
SR1E6	Stress range at 1E6 cycles (MPa)	428
b1	First strength exponent	-0.1339

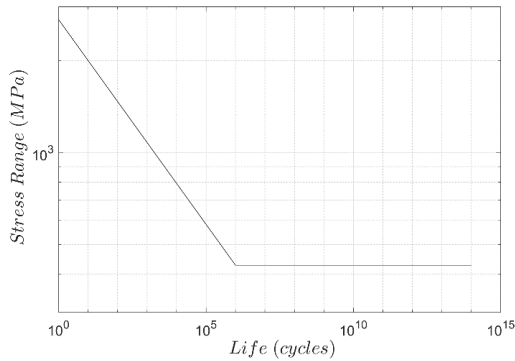


Figure 4: S-N curve

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Normal Static LC

1) *Finite Element Analysis Using Code Forces*: From Eq. (1), the calculated normal force (F_z) is 202478 N using normal payload (P_2) of 7930.19 kg. After we applied

boundary conditions (LC00 as shown in table 6), the maximum Von Mises stress is 97.9 MPa occurring at the connection of the spring pocket with the frame, as shown in table 8.

2) *Finite Element Analysis Using ADAMS-Derived Forces*:

The advantage of using multibody dynamics in the static LCs is the force determination at each joint (figure 3). The information allows us to calculate the resulting stress in the structure more precisely. To create a model resembling the above static analysis, we perform mass balance for an equivalent system to get the forces and moments at the following 21 locations (table 9). Their specific locations are demonstrated in figure 5. In this case, fixed x-, y-, and z-displacement boundary conditions are applied to the secondary suspension location on the side frames.

When the force from ADAMS on the FEA model is applied, the maximum Von Mises stress is 97.9 MPa at the same location as the above case, i.e., the connection of the spring pocket with the frame (table 8).

Table 8: Resulting Von Mises stress from LC00 using three different approaches

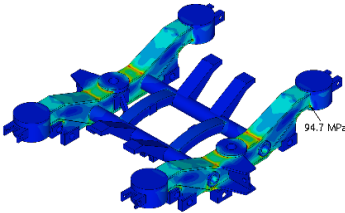
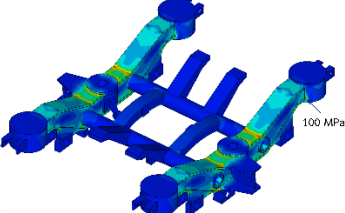
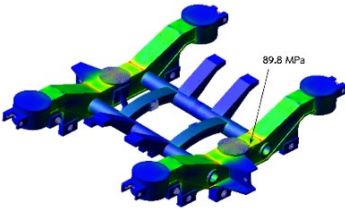
Description	FEA – code forces	FEA – ADAMS derived forces	FEA – Flex body analysis
Von Mises Stress	94.9 MPa	100.0 MPa	89.8 MPa
Location	Outer left of rear primary spring pocket	Outer left of rear primary spring pocket	Outer upper plate of the left side frame
Fringe plot			

Table 9: Force location on the bogie frame

Position	Description
1, 2	Primary spring front left/right
3, 4	Primary spring rear left/right
5, 6	Primary vertical damper front left/right
7, 8	Primary vertical damper rear left/right

Table 9: Force location on the bogie frame (Cont.)

Position	Description
9, 10	Axle box front left/right
11, 12	Axle box rear left/right
13, 14	Anti roll bar left/right
15, 16	Secondary lateral damper left/right
17, 18	Secondary yaw damper left/right
19, 20	Secondary spring left/right
21	Traction rod to bogie frame

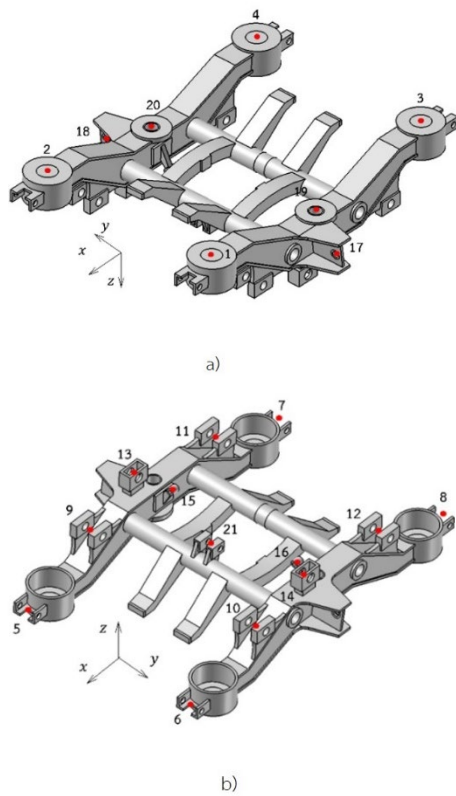


Figure 5: Applied force locations a) bottom view and b) top view.

3) *Finite Element Analysis Using Flexible Body Analysis*: ADAMS flex is based on modal theory to solve displacement problems in eq. (8) the result is valid if the linear superposition assumption is satisfied.

$$u = \sum_{i=1}^M q_i \phi_i \quad (8)$$

in which u is the structural displacement, q_i is the linearized matrix, ϕ_i is the mode shape function, M is the number of modes in consideration. A flexible body frame in modal neutral file format was first generated in MSC.PATRAN using Craig Bampton method, the

summation of constraint modes and fixed boundary normal modes. The flexible body replaces the rigid one on the simulated test rig in figure 3. We obtained the maximum Von mises stress at 89.8 MPa on the outer back of SS seat (table 8). The location is identified as the second maximum rank in the former two cases. Note that the initial modeling in ADAMS is a partial coupling that disables initial components 3, 4, 5, and 9 by default.

B. Exceptional Static LC

1) *Finite Element Analysis Using Code Forces*: From Eq. (2) to (4) and table 6, the force can be calculated (table 10) and applied at specific locations to obtain resulting stresses in table 11 using an exceptional payload (P_1) of 10899 kg. The result identifies a critical spot at the weld joint between connecting bar with side frames. The ratio of the 0.2% yield stress to the Von Mises resulting stress is 1.18. According to the code, the bogie frame is acceptable in the full program but in the reduced program.

Table 10: Calculated forces and loads

Parameter	Value	Unit
$F_{z1max} = F_{z2max}$	146481	N
$F_{z1empty} = F_{z2empty}$	109073	N
$F_{y1max} = F_{y2max}$	52813	N
$F_{x1max} = F_{x2max}$	34058	N

Table 11: Results of Von Mises stress for each exceptional LCs

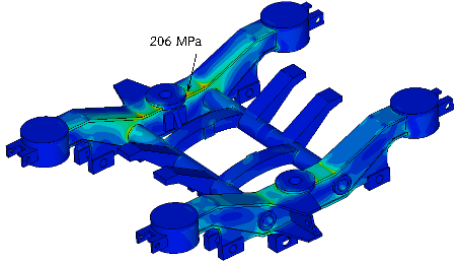
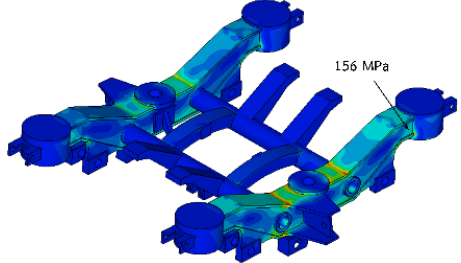
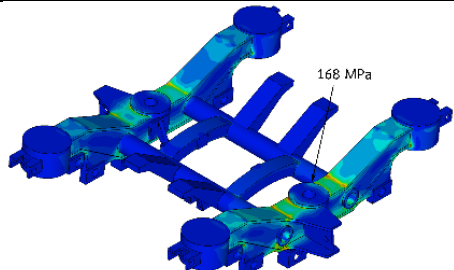
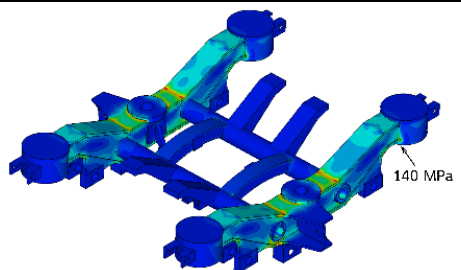
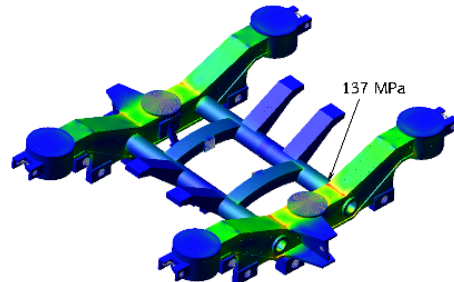
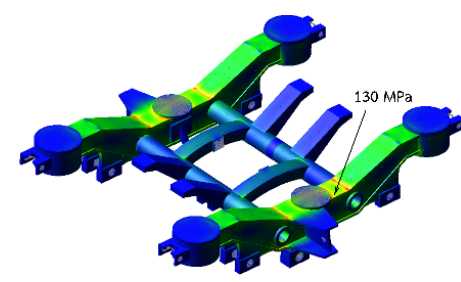
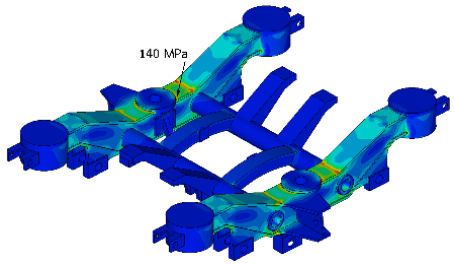
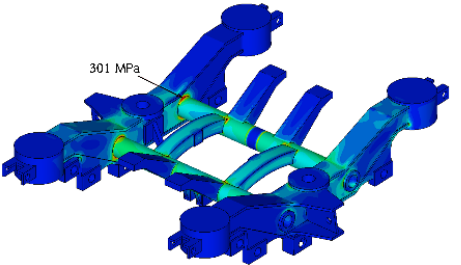
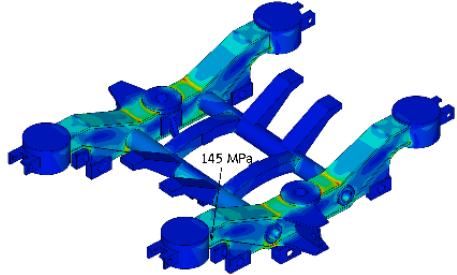
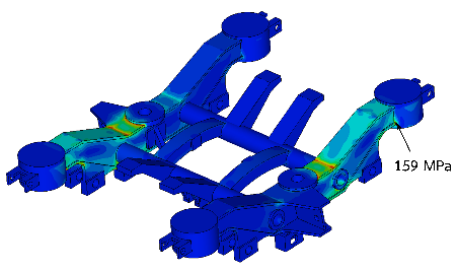
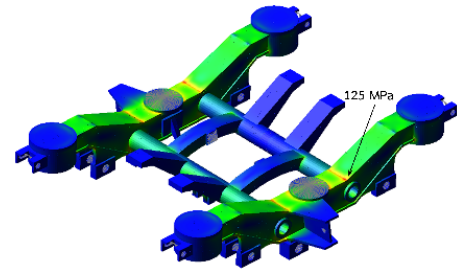
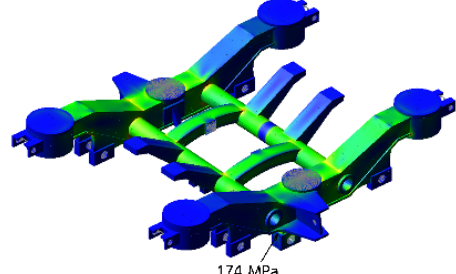
Description	LC11	LC12
FEA – code forces		
Max. Von Mises stress	206 MPa	156 MPa
Location	Inner back of right SS seat	Outer left of rear primary spring pocket
Fringe plot		
FEA – ADAMS derived forces		
Max. Von Mises stress	168 MPa	140 MPa
Location	Inner back of left SS seat	Outer left of rear primary spring pocket
Fringe plot		
FEA – Flex body analysis		
Max. Von Mises stress	137 MPa	130 MPa
Location	Inner upper plate of the left side frame	Outer back of left SS seat
Fringe plot		
Description	LC13	LC14
FEA – code forces		
Max. Von Mises stress	140 MPa	301 MPa
Location	Inner back of right SS seat	Inner right of connecting bar
Fringe plot		

Table 11: Results of Von Mises stress for each exceptional LCs (Cont.)

Description	LC13	LC14
FEA – ADAMS derived forces		
Max. Von Mises stress	145 MPa	159 MPa
Location	Outer right of front primary spring pocket	Outer left of rear primary spring pocket
Fringe plot		
FEA – Flex body analysis		
Max. Von Mises stress	125 MPa	174 MPa
Location	Outer upper plate of the left side frame	anti-roll bars connecting plate
Fringe plot		

2) *Finite Element Analysis Based on Resulting Forces Obtained from ADAMS*: As in the previous case of static normal load case, resulting forces at each connection from the rigid multibody calculation are applied to the meshed bogie frame at which dead weight is attached to using OD mass element. We used 50% sprung mass and 50% unsprung mass for components in the primary suspension system figure 3. The resulting stress and hot spot locations in each case are shown in table 11. When using this type of analysis, the maximum stress occurs in LC11 instead of LC14.

3) *Finite Element Analysis Using Flexible Body*: The maximum stresses in this type of analysis occur in LC14 but at different locations, i.e., the anti-roll bar support connection to the bogie frame. The behavior could not be captured in other analyses. The flexible frame body reacts with a rigid bar and induces a moment at the

support. This makes the shift of the hot spot location in the case.

It is obvious from the above results that inconsistent stress is associated with hot spot locations. Nevertheless, actual strain measurement must be conducted to verify the critical location from the results. In all cases, using the code forces is the most conservative analysis compared with other methods.

C. Normal Fatigue LC

1) *Finite element analysis using code force*: In this approach, we proposed fatigue-life analysis of the load cases stated in table 4 and table 5 simultaneously under static vertical loading, bouncing, and curve negotiate loading. Eight cases are identified as shown in table 12 with a loading sequence in figure 6 and figure 7.

Table 12: Quasi-static loading and result stress

LCs	Description	Number of cycles in a block load	Stress amplitude (MPa)
1	Normal static load	Static case	94.6 (mean)
2	Rolling	1	9.07
3	Bouncing	30	18.2
4	Fx	1	5.84
5	Twist track on left turn	0.5	2.45
6	Twist track on Right turn	0.5	2.36
7	Lateral load on Left turn	0.5	68.0
8	Lateral load on Right turn	0.5	68.0

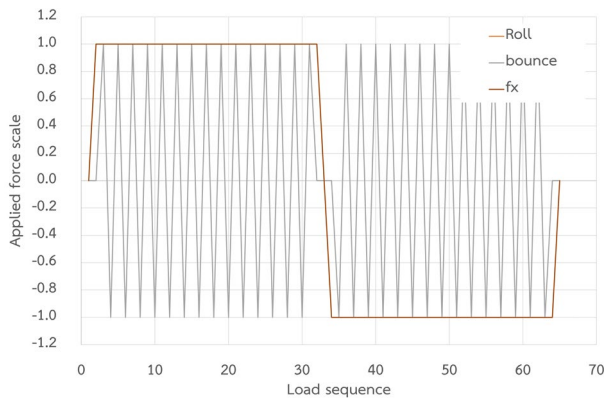


Figure 6: Loading sequence for LC 2, 3, and 4.

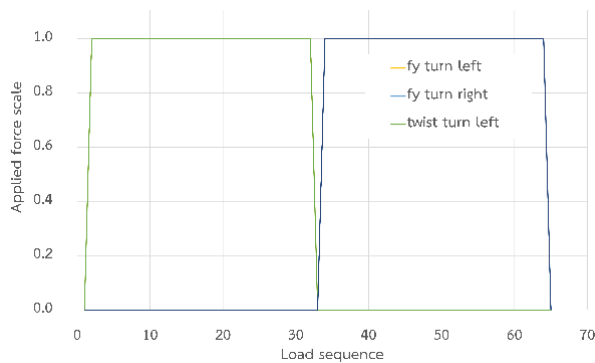


Figure 7: Loading sequence for LC 5, 6, 7, and 8

The accumulated damage due to combined stress at different time steps results in an infinite fatigue life when we consider the mean stress effect according to Goodman equation. The stress results from each load

case are presented in table 12, and the fatigue life from CAE fatigue 2024.1.1 is shown in figure 8.

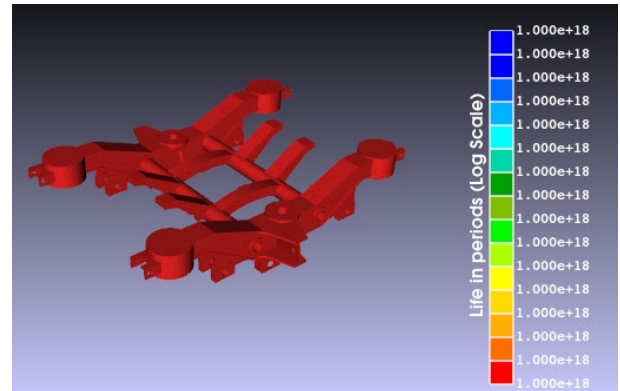


Figure 8: Fatigue life cycles, a quasi-static fatigue test.

The critical locations are identified at the anti-roll bar connection to the frame and the primary spring housing to the frame (figure 11). Nevertheless, the stress variation is in the range of 124-128 MPa which results in infinite life in accordance with the results from CAE fatigue 2024.1.1 under Goodman criteria.

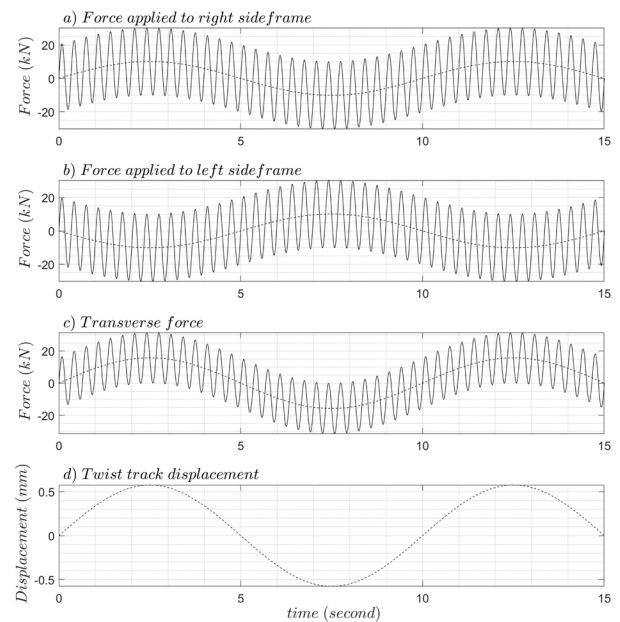


Figure 9: Applied fatigue loading profiles.

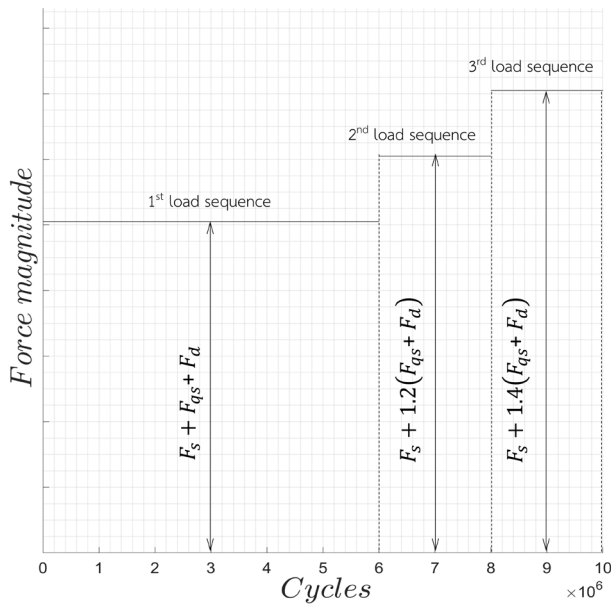


Figure 10: Fatigue loading sequences.

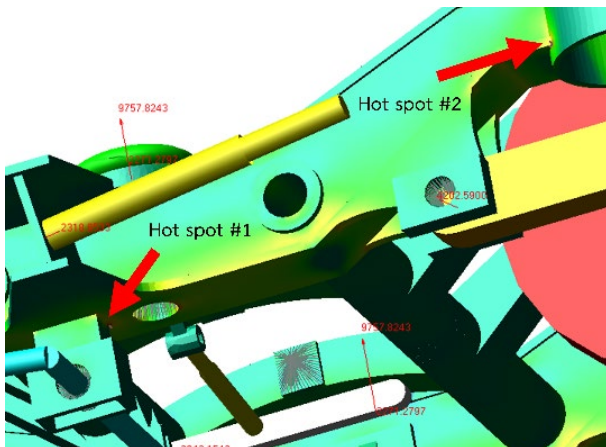


Figure 11: Critical stress locations.

V. CONCLUSION

A complete assessment of a passenger bogie is demonstrated by comparing the direct finite element approach and the multibody dynamic approach. The latter approach provides profound identification of critical locations.

In the normal static load case, a multi-body dynamic approach with a flex body results in the lowest stress level. On the contrary, the location of critical stress is different from the results of the others. The conclusions are the same in exceptional load cases. This indicates

that further validation of strain measurement might be necessary to certain results.

Fatigue analysis software has proven usefulness in evaluating fatigue life assessments when considering mean stress effect. Stress in each loading scenario resulting from finite element analysis is suitable for simple loading conditions, as in the case of static fatigue test rigs. For more complicated real loading, we should resort to CAE fatigue. Both approaches provide infinite fatigue life in our cases.

ACKNOWLEDGEMENT

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

REFERENCES

- [1] T. Talingthaisong, S. Sucharitpwatskul, A. Manonukul, and P. Kansuwan, "Sensitivity analysis of suspension parameters of the critical velocity of a railway bogie on a tangent track using standardized regression coefficients," *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 11, no. 1, pp. 88–98, 2023.
- [2] N. Tosangthum *et al.* "Dry rolling-sliding wear behavior of ER9 wheel and R260 rail couple under different operating conditions," *Wear*, vol. 518–519, Apr. 2023, Art. no. 204636, doi: 10.1016/j.wear.2023.204636.
- [3] A. Sukhom, T. Talingthaisong, S. Sucharitpwatskul, A. Manonukul, and P. Kansuwan, "Study of rolling contact fatigue mechanism of ER9 and R260 wheel/rail materials," in *Proc. 13th TSME Int. Conf. Mech. Eng. (TSME-ICoME)*, Chiang Mai, Thailand, Dec. 12–15, 2023, pp. 1–10.
- [4] P. Kansuwan, S. Sucharitpwatskul, and A. Manonukul, "Application of fast fourier transform to the synthesis of track irregularities," in *Proc. 8th Int. Conf. Eng., Appl. Sci. Technol. (ICEAST)*, Chiang Mai, Thailand, Jun. 2022, pp. 1–10.
- [5] *Railway applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames*, EN 13749:2011, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, Mar. 2011.

- [6] *Railway applications - Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Testing of running behaviour and stationary tests*, EN 14363:2005, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, Jun. 2005.
- [7] G. Mancini and A. Cera “Design of railway bogies in compliance with new EN 13749 European standard,” presented at the 7th World Congr. Railway Res. (WCRR), Montréal, Canada, Jun. 4–8, 2006.
- [8] *Passenger rolling stock - Trailer bogies - Running gear - General provisions applicable to the components of trailers bogies*, UIC Code 515-1, International Union of Railways, Paris, France, 2003.
- [9] *Motive power units - Bogies and running gear - Bogie frame structure strength tests*, UIC Code 615-4, International Union of Railways, Paris, France, 1994.
- [10] *Wagons - Strength testing of 2 and 3-Axle bogies on test rig*, UIC Code 510-3, International Union of Railways, Paris, France, 1989.
- [11] A. Ibrahim, M. A. Abdullah, and K. Hudha, “Multibody dynamics models of railway vehicle using ADAMS/Rail,” *Appl. Mechanics Mater.*, vol. 393, pp. 644–648, Sep. 2013.
- [12] E. Zhang, C. L. Pun, A. Hiew, and W. Yan, “Dynamic response and wear analysis of a swing nose crossing in heavy haul railways,” *Railway Eng. Sci.*, vol. 33, pp. 192–215, 2025.

การหาค่าพารามิเตอร์ที่ทนทานสำหรับกระบวนการบรรจุก๊าซผลิตภัณฑ์ สเปรย์ระงับกลิ่นกายด้วยเทคนิคทากูชิ

นพศักดิ์ ป้องภักดี¹ ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร^{2*}

^{1,2*} แขนงเทคโนโลยีการจัดการทางวิศวกรรม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช,
นนทบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : srisit.chi@stou.ac.th

รับต้นฉบับ : 21 กรกฎาคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 25 ตุลาคม 2567; ตอบรับบทความ : 9 พฤศจิกายน 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเครื่องสำอางรวมถึงสเปรย์ระงับกลิ่นกายมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว มีการแข่งขันที่สูงขึ้นในธุรกิจ ทำให้ผู้ผลิตต้องปรับตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยกระบวนการบรรจุก๊าซเป็นกระบวนการที่สำคัญเพราะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และต้นทุนในการผลิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทนทานต่ออุณหภูมิเพื่อให้ค่ามวลบรรจุก๊าซอยู่ในช่วงเป้าหมาย แม้ว่าจะมีปัจจัยภายนอกมารบกวนโดยกระบวนการทดลองนี้ใช้เทคนิคทากูชิและได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมประกอบด้วย 1) แรงดันบรรจุก๊าซ 2) ความเร็วในการบรรจุก๊าซ 3) ปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ เป็นตัวแปรควบคุม 3 ปัจจัย 3 ระดับ และ 4) อุณหภูมิสภาพแวดล้อม เป็นปัจจัยรบกวน 1 ปัจจัย 3 ระดับ การทดลองได้เลือกรูปแบบการจัดวางลำดับแบบแนวฉากทำการออกแบบปัจจัยที่ควบคุมได้ อะเรียภายใน และปัจจัยรบกวน อะเรียภายนอกจากนั้นนำทั้งสองอะเรียมารวมกันโดยการไขว้เมื่อได้การออกแบบอะเรียไขว้ แล้วจึงทำการทดลองบรรจุก๊าซลงผลิตภัณฑ์ และใช้โปรแกรมมินิแทบ มาช่วยคำนวณ โดยได้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ประเภทผลตอบสนองที่มีค่าตรงตามเป้าหมายเพื่อให้ค่ามวลอยู่ในช่วง 72 กรัมต่อกระป๋อง โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ 1) แรงดันบรรจุก๊าซ 2.0 เมกะปาสกาล 2) ความเร็วในการบรรจุก๊าซ 65 กระป๋องต่อนาที 3) ปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ 128 มิลลิลิตร ซึ่งผลลัพธ์หลังปรับปรุงเป้าหมายที่ได้อยู่ในช่วง 70.97–72.54 กรัมต่อกระป๋อง ลดลงจากเดิมร้อยละ 30.22 จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่งผลให้จำนวนของเสียและต้นทุนลดลงร้อยละ 52.20

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์สเปรย์ระงับกลิ่นกาย กระบวนการบรรจุก๊าซ การหาค่าพารามิเตอร์ที่ทนทาน เทคนิคทากูชิ

Determination of Robust Parameters for Deodorant Spray Gas Filling Process Using the Taguchi Technique

Noppasak Pongpakdee¹ Srisit Chianrabutra^{2*}

^{1,2*}*Division of Engineering Management Technology, School of Science and Technology,
Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: srisit.chi@stou.ac.th

Received: 21 July 2024; Revised: 25 October 2024; Accepted: 9 November 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

The cosmetics industry, including deodorant sprays, is experiencing rapid growth, with increasing competition driving manufacturers to adapt and enhance the efficiency of their production processes. The gas filling process is particularly crucial, as it impacts both product quality and production costs. This research aims to determine parameters that are robust against temperature variations, ensuring that the gas filling mass stays within the target range, even in the presence of external disturbances. The experimental process employs the Taguchi technique, with the following parameters controlled: 1) gas filling pressure, 2) gas filling speed, and 3) cylinder volume, each as control variables with three levels. Additionally, 4) environmental temperature is considered a noise factor with three levels. The experiment utilized an orthogonal array to design the layout, with internal arrays for controlled factors and external arrays for noise factors, combined in a cross arrangement. After designing the crossed array, the gas filling experiment was conducted, and Minitab software was used to analyze the results. The signal-to-noise ratio was selected for a "target is best" response type to maintain the gas mass within the target range of 72 grams per can. The optimal parameters identified were 1) gas filling pressure of 2.0 MPa, 2) gas filling speed of 65 cans per minute, and 3) cylinder volume of 128 mL. After adjustments, the results achieved a target mass range of 70.97–72.54 grams per can, with a 30.22% reduction in standard deviation, leading to a 52.20% reduction in waste and costs.

Keywords: Deodorant spray products, Gas filling process, Robust parameter determination, Taguchi technique

1) บทนำ

อุตสาหกรรมเครื่องสำอางไทยโดยในปี พ.ศ. 2565 กลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งหลังลดลงต่อเนื่องมาตั้งแต่เกิดโรค COVID-19 โดยเฉพาะตลาดหลักอย่างอาเซียน ออสเตรเลีย เกาหลีใต้ และจีน ซึ่งมีสัดส่วนตลาดรวมกันมากกว่าร้อยละ 50 ขยายตัวค่อนข้างดี สะท้อนว่า เครื่องสำอางของไทยเป็นที่ต้องการในตลาดต่างประเทศ ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนมีอุณหภูมิโดยทั่วไปค่อนข้างสูง ร่างกายจะมีการขับเหงื่อเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ตามมาคือกลิ่นกาย ปัจจุบันความต้องการผลิตภัณฑ์บำรุงสำหรับผิวกายและผิวหน้า ในเมืองไทยมีแนวโน้มการเติบโตที่ดี ซึ่งรวมถึงผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่นกาย ทำให้ผู้บริโภคหันมาใส่ใจดูแลบุคลิกภาพมากขึ้น เมื่ออุตสาหกรรมผลิตสเปรย์ระงับกลิ่นกายมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีการแข่งขันที่สูงขึ้น [1] ทำให้ผู้ประกอบการโรงงานในกรณีศึกษาจะต้องปรับตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยกระบวนการบรรจุก๊าซเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตเพราะจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และรวมถึงต้นทุนในการผลิต เพราะถ้ามวลของก๊าซที่บรรจุไม่ได้ตามค่ามาตรฐานที่กำหนด จะทำให้สินค้าไม่ได้คุณภาพ ทำให้เสียต้นทุน เกิดของเสียในกระบวนการผลิตและเสียเวลาในกระบวนการปรับตั้งค่าเครื่องจักร ทำให้กระบวนการผลิตไม่มีประสิทธิภาพ

สำหรับที่มาของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในโรงงานผลิตสเปรย์ระงับกลิ่นกายแห่งหนึ่งเริ่มต้นจากกระบวนการบรรจุก๊าซ จากถังผสมก๊าซมายังห้องบรรจุก๊าซ โดยพนักงานจะทำการเปิดมอเตอร์และปั๊มเพิ่มแรงดันบรรจุก๊าซ (filling pressure) หน่วยที่ใช้เมกะปาสกาล ตัวแปรควบคุมที่ 1 เพื่อจ่ายก๊าซเข้าไปในห้องก๊าซจากนั้นก๊าซจะถูกจ่ายเข้ายังห้องบรรจุก๊าซ โดยพนักงานในห้องบรรจุก๊าซปรับความเร็วในการบรรจุก๊าซ (gas filling speed) หน่วยที่ใช้การป้อนต่อนาที ตัวแปรควบคุมที่ 2 จากนั้นทำการปรับปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ (volume of gas cylinder) หน่วยที่ใช้มิลลิลิตร ตัวแปรควบคุมที่ 3 โดยปัญหาสำคัญที่พบคือ เมื่อพนักงานเริ่มทำงานในเวลา 8.00 น. พนักงานบรรจุก๊าซจะทำการปรับตั้งค่าก่อนการบรรจุก๊าซ ปรับค่าตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรทุกครั้งก่อนเริ่มงานโดยจะนำกระป๋องสเปรย์มาทำการทดสอบบรรจุก๊าซเพื่อให้ได้ค่าตามที่ต้องการ เมื่อได้ค่าที่ต้องการแล้ว พนักงานจะเริ่มเปิดสายพานลำเลียงกระป๋องเข้าสู่กระบวนการบรรจุก๊าซ โดยปัญหาจะเริ่มพบเมื่อผ่านไปค่ามวลที่บรรจุจะเปลี่ยนแปลงไปไม่ได้ค่าตามที่กำหนด หรือเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของวันนั้นเริ่ม

มีการเปลี่ยนแปลง และพนักงานจะต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรใหม่อีกรอบ

หลักการสำคัญที่นำมาใช้ในเรื่องของการควบคุมกระบวนการบรรจุก๊าซ และการหาค่าที่ทนทานของปัจจัยที่ควบคุม คือ พยายามกำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ 1) แรงดันบรรจุก๊าซ 2) ความเร็วในการบรรจุก๊าซ และ 3) ปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซเป็นตัวแปรควบคุม 3 ปัจจัย ปัจจัยนี้จะเรียกว่า พารามิเตอร์ (parameter) เพื่อให้ทนทาน (robust) ต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้หรือปัจจัยรบกวน (noise factors) คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยรบกวน 1 ปัจจัย 3 ระดับ ที่ทำให้ความหนาแน่นของก๊าซเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงนำไปสู่วิธีการออกแบบพารามิเตอร์ทนทาน (robust parameter design) โดยใช้เทคนิคทากูชิ [2], [3] ซึ่งเป็นเทคนิคการแก้ปัญหาที่สะดวกสามารถลดจำนวนการทดลองทำให้มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ต่ำ [4] ซึ่งต่างจากวิธีการควบคุมที่ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ [5] หรือเทคนิคการควบคุมเชิงเส้น (proportional-integral-derivative control) [6] เพื่อลดความแปรปรวนและเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการ

จากนั้นดำเนินการทดลองด้วยวิธีทากูชิเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทนทาน ของแต่ละระดับของปัจจัย การทดลองนี้จะมี 3 ปัจจัย ควบคุมแบ่งเป็น 3 ระดับ และปัจจัยรบกวน มี 1 ปัจจัยแบ่งเป็น 3 ระดับ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกรูปแบบการทดลองแบบ Orthogonal Array L9 เนื่องจากมี 4 ปัจจัย 3 ระดับ โดยทำการจัดวางลำดับแบบแนวฉาก (orthogonal array) ทำการออกแบบปัจจัยที่ควบคุมได้ อะเรียภายใน (inner array) และปัจจัยรบกวน อะเรียภายนอก (outer array) จากนั้นนำทั้งสองอะเรียมารวมกันโดยการไขว้เรียกว่าการออกแบบอะเรียไขว้ (crossed array design) เมื่อได้การออกแบบอะเรียไขว้แล้ว จึงทำการทดลองและคำนวณเพื่อหาค่าตอบ และหาผลตอบสนองของความผันแปรซึ่งหาได้จากตัววัดทากูชิ ซึ่งจะทำให้ความผันแปรโดยรวมของกระบวนการบรรจุก๊าซลดลง โดยงานวิจัยนี้ กำหนดให้การคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio: S/N) โดยได้เลือกใช้ค่า S/N ประเภทผลตอบสนองที่มีค่าตรงตามเป้าหมาย ค่ามวลที่บรรจุก๊าซ เข้าใกล้ค่ากลาง (nominal the best) สูตรที่ใช้คำนวณคือ $S/N = -\log(\frac{\bar{Y}^2}{S^2})$ ดังเช่น การประยุกต์วิธีการทากูชิ เพื่อลดชิ้นงานเสียในกระบวนการประกอบแผ่นวงจรพิมพ์ซีบี กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

[7] หรืองานวิจัยที่หาค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการ โดยการนำเทคนิคทางสถิติเข้ามาช่วยปรับปรุงกระบวนการ [8], [9]

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบรรจุก๊าซเพื่อทำให้ค่ามวลของก๊าซอยู่ในช่วงเป้าหมาย แม้ว่าจะมีปัจจัยภายนอกมารบกวน

2. เพื่อลดเวลาในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

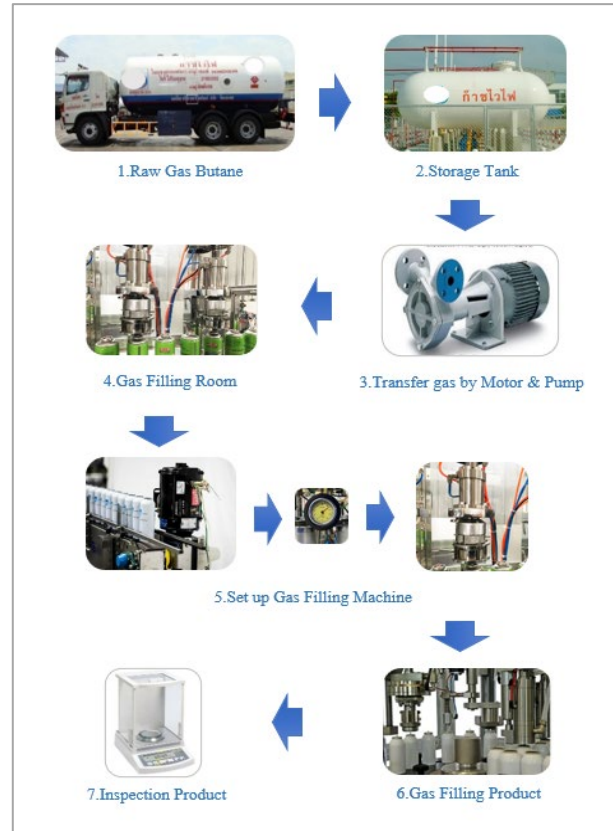
3. เพื่อลดของเสียและต้นทุนในกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่า อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีผลต่อความหนาแน่นและมวลของก๊าซที่บรรจุลงผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาทฤษฎีของก๊าซ [10] และได้นำเทคนิคทางสถิติ การออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เข้ามาปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพจากสภาวะปัจจุบัน โดยรวมทำให้ ค่ามวลบรรจุก๊าซอยู่ในค่าที่กำหนด ระยะเวลาปรับตั้งค่าลดลง และจำนวนของเสียลดลง

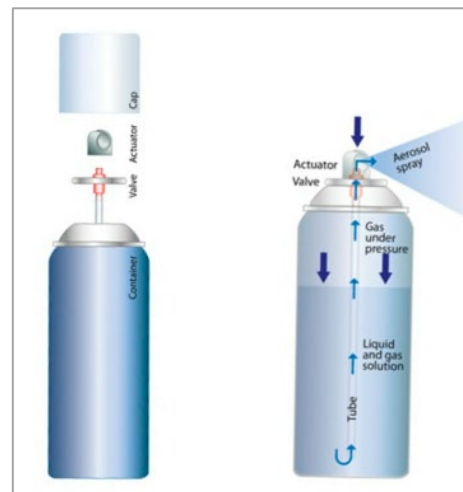
3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) สภาวะปัจจุบันของกระบวนการ

โรงงานกรณีศึกษาในกลุ่มผลิตภัณฑ์ดูแลเส้นผม หนังสือระบร่างกาย และสเปรย์ระงับกลิ่นกาย โดยการศึกษาปัญหาในครั้งนี้ ได้ศึกษาผลิตภัณฑ์สเปรย์ระงับกลิ่นกาย ซึ่งมียอดการผลิตประมาณ 4,250,000 กระป๋องต่อปี และได้ทำการปรับปรุงในส่วนของกระบวนการบรรจุก๊าซ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อสภาวะและส่งผลต่อการลดเวลาในการปรับตั้งค่าเครื่องจักร ยังช่วยลดจำนวนของเสียในกระบวนการบรรจุก๊าซ โดยรายละเอียดกระบวนการบรรจุก๊าซเริ่มต้นจาก 1) รถส่งก๊าซบิวเทน (Butane) มาส่งยังสถานที่เก็บก๊าซ 2) ทำการโหลดก๊าซบิวเทน มาเก็บยังถังเก็บก๊าซ (storage tank) 3) เมื่อก๊าซเก็บไว้แล้วพร้อมจ่ายก๊าซมายังห้องบรรจุ โดยทำการเพิ่มแรงดันบรรจุก๊าซ เพื่อจ่ายก๊าซมายังห้องบรรจุโดยใช้มอเตอร์และปั๊มทำหน้าที่จ่ายก๊าซ 4) เมื่อก๊าซถูกจ่ายมายังห้องบรรจุแล้ว 5) ทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักร ความเร็วในการบรรจุก๊าซ ปรับตั้งค่าปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ เพื่อให้ได้ค่ามวลของก๊าซตามค่ามาตรฐาน 6) จากนั้นทำการบรรจุก๊าซโดยปล่อยกระป๋องให้เข้าไปยังเครื่องบรรจุก๊าซ 7) หลังจากก๊าซถูกบรรจุลงกระป๋อง ทำการชั่งค่ามวลก๊าซเพื่อตรวจสอบคุณภาพให้ได้ตามค่าที่กำหนด หากไม่ได้ค่าที่กำหนด ให้ทำการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่อีกรอบ จนกว่าจะได้ค่าตามที่กำหนด ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : กระบวนการบรรจุก๊าซ



รูปที่ 2 : ส่วนประกอบกระป๋องสเปรย์ [11]

ผลิตภัณฑ์สเปรย์ระงับกลิ่นกายมีส่วนประกอบส่วนผสมภายในแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) สารขับเคลื่อน (propellants) เป็นองค์ประกอบที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนสินค้าออกจากบรรจุภัณฑ์ 2) ตัวทำละลาย (solvent) ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวกลางทำลายให้ส่วนผสมของสินค้าเข้ากับสารขับเคลื่อน 3) ส่วนผสมสินค้า (active ingredient)

ส่วนผสมที่บรรจุอยู่ภายใน กระป๋องแอโรซอล (aerosols can) และอธิบายส่วนประกอบผลิตภัณฑ์สเปรย์ระงับกลิ่นกาย ดังรูปที่ 2

3.2) ศึกษาปัญหาของกระบวนการ

จากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันในส่วนของกระบวนการบรรจุก๊าซมีการหยุดปรับตั้งค่าเครื่องจักรทำให้เสียเวลาและมีจำนวนของเสียเกิดขึ้นที่กระบวนการนี้ ทำให้ต้องทำการศึกษาและทำการแก้ไข ในการเริ่มต้นกระบวนการทำงานนั้นพนักงานจะทำการปรับตั้งค่ามวลก่อนการบรรจุก๊าซทุกครั้ง โดยจะนำกระป๋องสเปรย์มาทำการทดสอบบรรจุก๊าซเพื่อวัดค่าให้ได้ค่าตามมาตรฐานคือ ค่า 72.0 ± 1.0 กรัม/กระป๋อง เมื่อได้ค่าตามที่ต้องการแล้วพนักงานจะเริ่มเปิดสายพานลำเลียง (conveyor) ให้กระป๋องเข้าสู่กระบวนการบรรจุก๊าซ โดยปัญหาจะเริ่มพบเมื่อผ่านไปน้ำหนักของก๊าซที่บรรจุมีการเปลี่ยนแปลง โดยไม่ได้ค่ามวลตามที่กำหนดเนื่องจากสถานที่ปฏิบัติงานเริ่มจากถังจ่ายก๊าซมายังห้องบรรจุก๊าซทั้งบริเวณภายนอกและภายในห้องบรรจุก๊าซไม่ได้อยู่ในพื้นที่ปรับอากาศจึงทำให้อุณหภูมิ ความดัน ส่งผลต่อมวลของก๊าซโดยตรง จะพบว่าค่ามวลก๊าซของผลิตภัณฑ์ไม่ได้ตามค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ทำให้เกิดของเสียจากกระบวนการผลิต ส่งผลให้พนักงานต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรใหม่อีกรอบซึ่งทำให้อุณหภูมิเสียเวลาระหว่างกระบวนการทำงาน

จากข้อมูลในอดีตเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2566 พบว่ากระบวนการการบรรจุก๊าซ ในแต่ละเดือนรวมมีเวลาที่สูญเสีย 4,638 นาที ในการปรับตั้งค่าเครื่องจักร และจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพจำนวนทั้งหมด 16,671 กระป๋องที่เกิดจากค่ามวลก๊าซไม่ได้มาตรฐาน ดังตารางที่ 1 เพื่อนำข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการเปรียบเทียบและใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงครั้งนี้

ตารางที่ 1 : ข้อมูลกระบวนการบรรจุก๊าซ

เดือน	ยอดการผลิต (กระป๋อง)	เวลาหยุด เครื่องจักร (นาที)	จำนวน ของเสีย (กระป๋อง)	มูลค่า ของเสีย (บาท)
มกราคม	440,000	684	1,890	94,500
กุมภาพันธ์	350,000	380	1,530	76,500
มีนาคม	400,000	422	1,894	94,700
เมษายน	380,000	586	1,856	92,800
พฤษภาคม	350,000	369	1,653	82,650
มิถุนายน	420,000	495	1,564	78,200

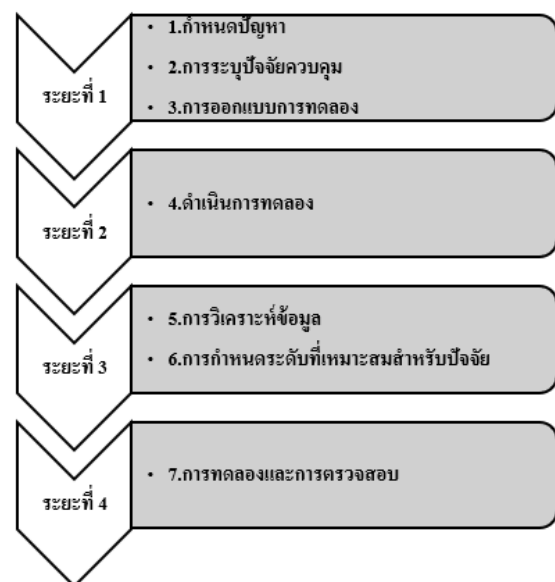
ตารางที่ 1 : ข้อมูลกระบวนการบรรจุก๊าซ (ต่อ)

เดือน	ยอดการผลิต (กระป๋อง)	เวลาหยุด เครื่องจักร (นาที)	จำนวน ของเสีย (กระป๋อง)	มูลค่า ของเสีย (บาท)
กรกฎาคม	380,000	442	1,465	73,250
สิงหาคม	412,000	420	1,695	84,750
กันยายน	422,000	430	1,715	85,750
ตุลาคม	422,000	410	1,409	70,450
รวม	3,976,000	4,638	16,671	833,550

โดยปัญหาที่ต้องทำการปรับปรุงแก้ไข คือค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้ค่ามวลอยู่ในช่วงเป้าหมายที่กำหนด โดยหลังการปรับปรุงจะส่งผลให้ เวลาในกระบวนการปรับตั้งค่าและจำนวนของเสียในกระบวนการลดลง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพหลังการปรับปรุงการผลิต

3.3) กำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหา

การกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาในกระบวนการบรรจุก๊าซผลิตภัณฑ์สเปรย์ระงับกลิ่นกายด้วยเทคนิคทากูชิ ได้กำหนดแผนการดำเนินงาน ตั้งแต่การเริ่มต้นกำหนดปัญหาของกระบวนการบรรจุก๊าซและได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตลอดจนถึงการทดลอง โดยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : ขั้นตอนในการดำเนินการ

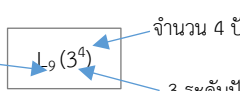
ตารางที่ 2 : พารามิเตอร์ระดับของปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	พารามิเตอร์	ค่าของระดับ
ควบคุม	1.แรงดันบรรจุก๊าซ (MPa)	3 ระดับ : 1.6, 1.8, 2.0 เมกะปาสกาล
	2. ความเร็วในการบรรจุก๊าซ (can/minute)	3 ระดับ : 60, 65, 70 กระป๋องต่อนาที
	3. ปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ (mL)	3 ระดับ : 128, 130, 132 มิลลิลิตร
รบกวน	1.อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)	3 ระดับ : 1, 2, 3 ช่วงของ อุณหภูมิห้องเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 3 : ตารางมาตรฐานทางสถิติ

จำนวน ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25
3	L4	L9	L16	L25
4	L8	L9	L16	L25
5	L8	L18	L16	L25
6	L8	L18	L32	L25
7	L8	L18	L32	L50
8	L12	L18	L32	L50
9	L12	L27	L32	L50
10	L12	L27	L32	L50
11	L12	L27	L32	L50
12	L16	L27	L32	L50
13	L16	L27	-	-
14	L16	36	-	-
15	L16	36	-	-
16	L32	36	-	-

L₉ จำนวนการทดลอง 9 การทดลอง



จำนวน 4 ปัจจัย
3 ระดับปัจจัย

ตารางที่ 4 : ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการทดลอง

รูปแบบการทดลอง	จำนวนทดลอง (ครั้ง)	เวลาปรับตั้งค่า (นาที)	เวลาการทดลอง (นาที)	จำนวนตัวอย่าง (กระป๋อง)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
Full Factorial Design	81 (3 ⁴ = 81)	810 (81×10)	648 (81×8)	972 (81×12)	29,160 (972×30)
Taguchi Orthogonal Array L9	27 (จากตารางทางสถิติ L9)	270 (27×10)	216 (27×8)	324 (27×12)	9,720 (324×30)
ค่าที่ใช้สำหรับคำนวณ	จำนวนปรับพารามิเตอร์	10 นาที/ครั้งค่าเฉลี่ย	8 นาที/ครั้งค่าเฉลี่ย	12 กระป๋อง/ครั้ง	30 บาท/กระป๋อง

การศึกษาโดยเริ่มต้นจากกระบวนการเพิ่มแรงดันก๊าซเพื่อจ่ายก๊าซยังห้องบรรจุ ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อมวลก๊าซ สำหรับช่วงระดับของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ได้ทำการแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังนี้ แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (low) อุณหภูมิประมาณ 25–30 °C ระดับกลาง (middle) 31–35 °C และระดับสูง (high) อุณหภูมิประมาณ 36–40 °C ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิปฏิบัติงานจริงของบริเวณ ห้องบรรจุ และสถานีจ่ายก๊าซ จากตารางที่ 2 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง หากทำการทดลองแบบ Full Factorial Design จะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น 3³×3¹ เท่ากับ 81 การทดลอง ซึ่งทำให้เสียเวลาและสูญเสียทรัพยากร เช่น วัสดุดิบ กระป๋อง ผลิตภัณฑ์สำหรับบรรจุก๊าซที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งไม่สามารถดำเนินการทดลองได้ทั้งหมดเนื่องจากกระทบกระบวนการผลิต

สำหรับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ จะต้องอาศัยในวันที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงที่จะทำการทดลองจึงจะสามารถทำการทดลองในชุดข้อมูลนั้นได้ ในการกำหนดตารางแผนการทดลอง Matrix Experiment โดยใช้ตารางมาตรฐาน Orthogonal Array L9 มาใช้ในงานวิจัยนี้ พิจารณาจากจำนวนปัจจัยในการทดลอง และระดับของปัจจัย การทดลองนี้มีทั้งหมด 4 ปัจจัย ประกอบด้วย ปัจจัยควบคุม 3 ปัจจัย ปัจจัยรบกวน 1 ปัจจัย แต่ละปัจจัย มี 3 ระดับ จากมาตรฐาน Orthogonal Array ใช้สัญลักษณ์ L พิจารณาจากตารางมาตรฐานทางสถิติ (standard orthogonal array) ดังตารางที่ 3 สาเหตุที่เลือกใช้เทคนิคทางสถิติมาออกแบบเพื่อลดจำนวนการทดลองทำให้ช่วยประหยัดทรัพยากร เวลา และค่าใช้จ่าย โดยได้ทำการเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 4 นอกจากนี้เทคนิคทางสถิติยังเหมาะสำหรับการหาค่าระดับของปัจจัยที่มีความทนทานต่อความแปรปรวนจากสภาพแวดล้อม ในการทดลองนี้ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้จึงเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลได้นำโปรแกรม Minitab มาใช้เพื่อลดเวลาและความผิดพลาดจากการคำนวณค่าสถิติที่มีความซับซ้อน

3.4) ดำเนินการปรับปรุงแก้ไข

แนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาโดยใช้เทคนิคทางสถิติ และใช้โปรแกรม Minitab เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ เริ่มต้นด้วยการแบ่งกลุ่มปัจจัยออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 คือ ปัจจัยควบคุมได้ สำหรับกระบวนการนี้คือ 1) แรงดันบรรจุก๊าซ (filling pressure) หน่วยที่ใช้ เมกะปาสกาล (MPa)

2) ความเร็วในการบรรจุก๊าซ (gas filling speed) หน่วยที่ใช้
กระป๋องต่อนาที (can/minute) 3. ปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ
(volume of gas cylinder) หน่วยที่ใช้มีลิลิตร (mL) ซึ่งเป็น
ปัจจัยที่ต้องควบคุมในขณะที่ทำการทดลองและเป็นค่าที่นำไปใช้
ในงานจริงในกระบวนการผลิต และกลุ่มที่ 2 ปัจจัยรบกวน ปัจจัย
นี้จะต้องสามารถควบคุมได้ขณะที่ทำการทดลอง แต่ไม่สามารถ
ควบคุมได้ขณะที่นำไปใช้ในกระบวนการผลิตคือ อุณหภูมิของ
สิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อก๊าซที่บรรจุ

จากนั้นทำการออกแบบการทดลองของแต่ละกลุ่มปัจจัยเป็น
2 ส่วนดังนี้ 1. ตารางการออกแบบสำหรับปัจจัยที่ควบคุมได้ หรือ
เรียกว่าอะเรียภายใน 2. ตารางการออกแบบสำหรับปัจจัยรบกวน
หรือเรียกว่า อะเรียภายนอก จากนั้นนำทั้งสองอะเรียมารวมกัน
โดยการไขว้เรียกว่า การออกแบบอะเรียไขว้ เมื่อได้การออกแบบ
อะเรียไขว้แล้วจึงทำการทดลอง ตามรูปแบบการออกแบบ โดยมี
ปัจจัยที่ควบคุมได้ 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ เมื่อได้ทำการ
กำหนดค่าของพารามิเตอร์ครบแล้ว ในส่วนของการเก็บข้อมูลและ
การทดลองนั้น จะต้องตรวจสอบว่า อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในวัน
นั้นอยู่ใน Zone ไດ (Zone 1: 25–30 °C, Zone 2: 31–35 °C,
Zone 3: 36–40 °C) เช่น อุณหภูมิของวันที่ทำการทดลองอยู่ใน
ช่วง 27 องศาเซลเซียส จะอยู่ใน Zone 1 จะทำการทดลองและ
เก็บข้อมูลค่ามวลบรรจุก๊าซ เพื่อบันทึกข้อมูลลงในช่องของค่า
 Y_{11} , Y_{21} , Y_{31} , Y_{41} , Y_{51} , Y_{61} , Y_{71} , Y_{81} , และ Y_{91} โดยค่าที่ได้ คือ
ค่ามวลเฉลี่ย 6 หัวบรรจุ นำค่าที่ได้ทั้ง 6 หัวบรรจุ มาหาค่าเฉลี่ย
แล้วบันทึกลงในตารางการทดลอง พร้อมทั้งทำการปรับค่า
พารามิเตอร์ ตามค่า Run 1 ถึง Run 9 สำหรับใน Zone 2 และ
Zone 3 การเก็บข้อมูลทำรูปแบบเดียวกับการเก็บข้อมูล Zone 1
ดังตารางที่ 5

หลังจากได้ทำการเก็บข้อมูลลงในตาราง Orthogonal Array L9
จากนั้นวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเทคนิคทากูชิ เพื่อหาค่าที่ทนทาน
สำหรับกระบวนการบรรจุก๊าซ และหาผลตอบสนองอิทธิพลของ
ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความผันแปร ซึ่งจะทำให้ความผันแปรโดยรวม
ของกระบวนการบรรจุก๊าซลดลง กำหนดให้การคำนวณเป็นค่า
อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยได้เลือกใช้ค่า S/N
ประเภทผลตอบสนองที่มีค่าตรงตามเป้าหมาย ค่ามวลที่บรรจุ
ก๊าซ เข้าใกล้ค่ากลาง (nominal the best) มากที่สุด

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม แล้วนำ
ค่าที่ได้ไปทำการทดลองใช้ในกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์
ของค่ามวลบรรจุก๊าซว่า เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละ

วันที่มีการผลิต ค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานหรือไม่ และ
เปรียบเทียบเวลาในการปรับตั้งค่า จำนวนครั้ง และจำนวนของ
เสียในกระบวนการผลิต

ตารางที่ 5 : รูปแบบตารางการเก็บข้อมูลการทดลอง

Run	Control Factors			Noise Factors		
	Pressure (MPa)	Speed (can/min)	Volume (mL)	Z.1 (°C)	Z.2 (°C)	Z.3 (°C)
1	1.6	60	128	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}
2	1.6	65	130	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}
3	1.6	70	132	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}
4	1.8	60	130	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}
5	1.8	65	132	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}
6	1.8	70	128	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}
7	2.0	60	132	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}
8	2.0	65	128	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}
9	2.0	70	130	Y_{91}	Y_{92}	Y_{93}

4) ผลการวิจัย

4.1) ดำเนินการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทนทาน

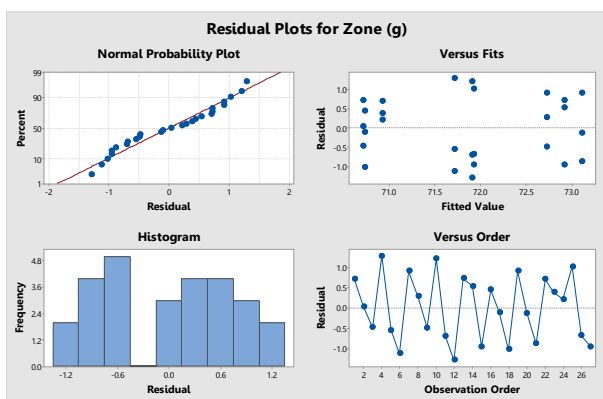
เริ่มทำการทดลองและเก็บข้อมูลในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ
โดยแบ่งการเก็บข้อมูลออกเป็น 3 Zone จากนั้นทำการบันทึกข้อ
มูลค่ามวลก๊าซแต่ละหัวบรรจุ ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปลง
ข้อมูลในตารางที่ 6 เพื่อจะนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่า
ระดับของพารามิเตอร์ที่ทนทาน

ตารางที่ 6 : ข้อมูลผลการทดลองรูปแบบอะเรียไขว้

Run	Control Factors			Noise Factors (°C)		
	MPa	Can/min	mL	Z. 1	Z. 2	Z. 3
1	1.60	60.00	128.00	71.43	70.74	70.24
2	1.60	65.00	130.00	73.00	71.16	70.59
3	1.60	70.00	132.00	73.63	73.00	72.23
4	1.80	60.00	130.00	73.12	71.21	70.62
5	1.80	65.00	132.00	73.64	73.45	71.97
6	1.80	70.00	128.00	71.18	70.62	69.70
7	2.00	60.00	132.00	74.02	72.98	72.23
8	2.00	65.00	128.00	71.63	71.31	71.14
9	2.00	70.00	130.00	72.96	71.24	70.97

4.2) วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

นำค่าที่ได้จากตารางที่ 6 ไปทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าปัจจัยที่ทนทาน เริ่มต้นจากการทวนสอบข้อมูลของกราฟที่ได้จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติโดยวิเคราะห์กราฟ Residual Plots for Zone พบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่มดังกราฟ Versus Order และมีการแจกแจงแบบปกติดังกราฟ Normal Probability Plot และ Histogram ในส่วนความผันแปรภายในกลุ่มย่อยมีค่าไม่แตกต่างกันจากกราฟ Versus Fits สรุปได้ว่า ข้อมูลชุดนี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ต่อได้ กราฟทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 : กราฟแสดงส่วนตกค้างค่ามวลบรรจุภัณฑ์ทุกโซน

สำหรับค่าของแต่ละปัจจัยโดยใช้ค่า S/N ในการคำนวณเมื่อเรียงลำดับความสำคัญแล้ว (rank) พบว่าปัจจัย Volume มีอิทธิพลสูงสุด รองลงมาคือ ปัจจัย Pressure และปัจจัย Speed ตามลำดับ ดังตารางที่ 7 และ รูปที่ 5 ดังนั้น โดยหลักการแล้ว เพื่อให้ได้สภาวะที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ควบคุมไม่ได้จึงเลือกใช้ค่า S/N ที่มีค่าสูงสุดจากผลวิเคราะห์ ผลที่ได้ คือ ค่า Volume 128 mL, Pressure 2.0 MPa และ Speed 65 can/minute

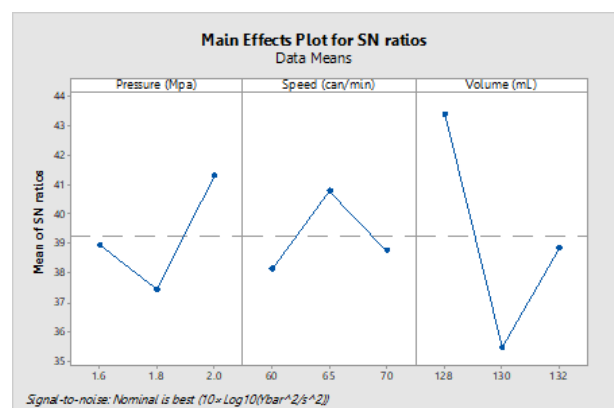
ผลที่วิเคราะห์ได้จากตารางที่ 8 และรูปที่ 6 พบว่าค่าอิทธิพลของ Volume มีอิทธิพลสูงสุดที่ระดับ 2 รองลงมา คือ ค่า Pressure ที่ระดับ 3 และ ค่า Speed ที่ระดับ 2 ตามลำดับ ดังนั้นค่าของ Volume มีค่าอิทธิพลสูงที่สุด รองลงมา คือ ค่า Pressure ที่ระดับ 3 และ ค่า Speed ที่ระดับ 2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเป็นจริง ตามทฤษฎีและจากประสบการณ์ทำงานโดยนำมาเปรียบเทียบกับตารางความสอดคล้องกับมวลบรรจุภัณฑ์ ดังตารางที่ 9

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ผลจากกราฟปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละโซนที่ทำให้ค่าเข้าใกล้ค่าที่กำหนดมากที่สุด ได้ดังนี้

โซนที่ 1, 2, 3 ค่า Volume 128, 130 และ 132 mL ค่า Pressure 2.0, 2.0 และ 1.8 MPa ค่า Speed 65, 70 และ 65 can/minute ตามลำดับ ดังรูปที่ 9, 10 และ 11 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 : ค่าอิทธิพลด้าน S/N ของแต่ละปัจจัย

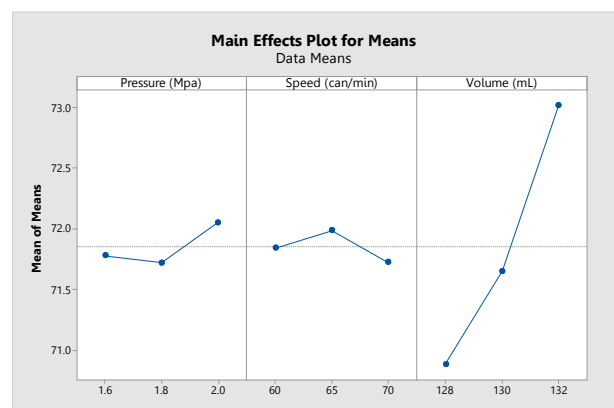
Level	Pressure (Mpa)	Speed (can/min)	Volume (mL)
1	38.94	38.13	43.40
2	37.43	40.79	35.45
3	41.31	38.76	38.84
Delta	3.88	2.66	7.95
Rank	2	3	1



รูปที่ 5 : กราฟแสดงค่าอิทธิพลด้าน S/N ของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 8 : ผลตอบสนองสำหรับค่าเฉลี่ย

Level	Pressure (Mpa)	Speed (can/min)	Volume (mL)
1	71.78	71.84	70.89
2	71.72	71.99	71.65
3	72.05	71.72	73.02
Delta	0.33	0.26	2.13
Rank	2	3	1



รูปที่ 6 : กราฟแสดงค่าอิทธิพลด้านค่าเฉลี่ย

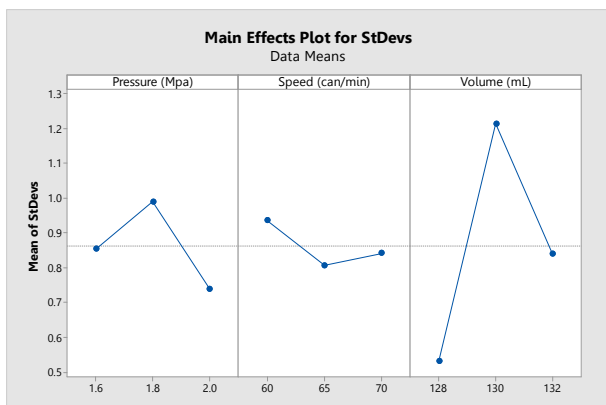
ตารางที่ 9 : ผลวิเคราะห์ความสอดคล้องค่าพารามิเตอร์กับค่ามวลบรรจุก๊าซ

ค่าพารามิเตอร์	การปรับค่า	ค่ามวล ก๊าซ	อัตราการเปลี่ยนแปลง
Pressure	มากขึ้น (+)	เพิ่มขึ้น (+)	แปรผันตรงกับค่ามวล ก๊าซ
	ลดลง (-)	ลดลง (-)	
Speed	มากขึ้น (+)	ลดลง (-)	แปรผกผันกับค่ามวล ก๊าซ
	ลดลง (-)	เพิ่มขึ้น (+)	
Volume	มากขึ้น (+)	เพิ่มขึ้น (+)	แปรผันตรงกับค่ามวล ก๊าซ
	ลดลง (-)	ลดลง (-)	

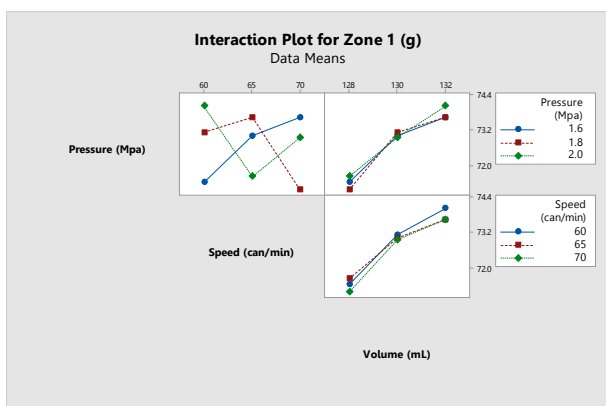
Response Table for Standard Deviations

Level	Pressure (Mpa)	Speed (can/min)	Volume (mL)
1	0.8547	0.9364	0.5309
2	0.9907	0.8072	1.2146
3	0.7403	0.8421	0.8401
Delta	0.2505	0.1292	0.6837
Rank	2	3	1

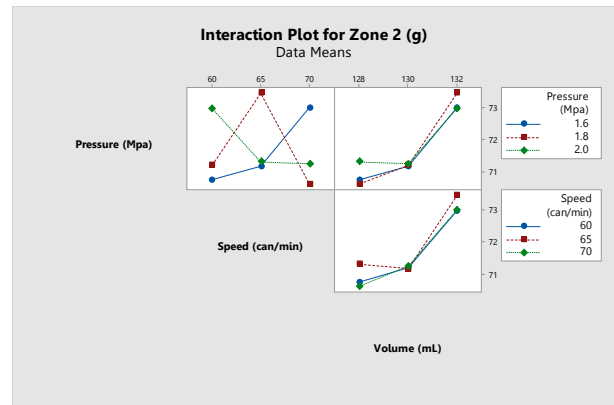
รูปที่ 7 : ผลตอบสนองสำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



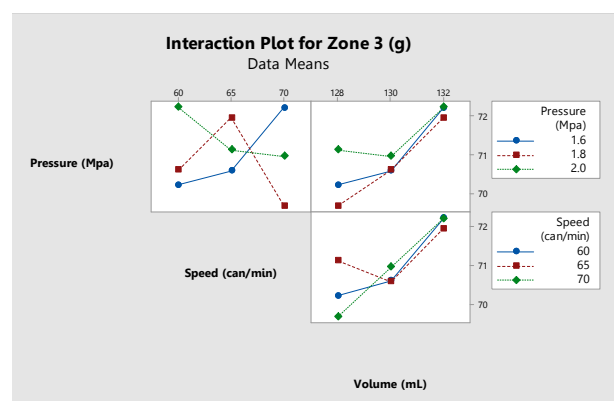
รูปที่ 8 : กราฟแสดงค่าอิทธิพลด้านค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 9 : กราฟปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยโซนที่ 1



รูปที่ 10 : กราฟปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยโซนที่ 2



รูปที่ 11 : กราฟปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยโซนที่ 3

4.3) ทำการทดลองและเก็บผลข้อมูลก่อนและหลังปรับปรุง

ขั้นตอนนี้จะทำการเก็บข้อมูลก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงหลังจากนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ ค่า Volume ที่ระดับ 128 mL ค่า Pressure ที่ระดับ 2.0 MPa และค่า Speed ที่ระดับ 65 can/minute นำไปใช้ในกระบวนการเพื่อทำการปรับปรุงดังตารางที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

ตารางที่ 10 : ข้อมูลก่อนปรับปรุง

วันที่	ยอดการผลิต (กระป๋อง)	หยุด ไลน์ (ครั้ง)	เวลา หยุด (นาที)	ของเสีย (กระป๋อง)	มวลก๊าซ เฉลี่ย (กรัม)
1	33,200	2	22	93	71.49
2	32,150	3	34	151	71.91
3	32,000	3	32	133	71.70
4	32,500	3	34	115	72.06
5	32,480	2	23	74	71.76
6	31,880	4	42	123	71.76
7	32,150	1	10	18	71.51

ตารางที่ 10 : ข้อมูลก่อนปรับปรุง (ต่อ)

วันที่	ยอดการผลิต (กระป๋อง)	หยุด ไลน์ (ครั้ง)	เวลา หยุด (นาท)	ของเสีย (กระป๋อง)	มวลก๊าซ เฉลี่ย (กรัม)
8	33,150	4	44	125	71.69
9	33,150	2	22	53	71.51
10	32,300	3	40	123	71.93
11	32,400	4	42	155	72.79
12	32,500	3	33	113	72.06
13	32,140	3	32	133	72.01
รวม	422,000	37	410	1,409	71.78

ตารางที่ 11 : ข้อมูลหลังปรับปรุง

วันที่	ยอดการผลิต (กระป๋อง)	หยุด ไลน์ (ครั้ง)	เวลา หยุด (นาท)	ของเสีย (กระป๋อง)	มวลก๊าซ เฉลี่ย (กรัม)
1	32,800	2	20	58	71.58
2	32,500	2	20	59	71.59
3	31,500	2	20	60	71.63
4	32,800	1	12	18	71.43
5	31,250	1	13	18	71.45
6	32,450	2	30	61	71.54
7	33,800	2	30	67	71.60
8	33,500	2	22	62	71.63
9	32,600	2	24	64	71.65
10	32,200	2	27	70	71.64
11	32,200	1	12	18	71.41
12	32,400	2	23	50	71.69
13	32,000	2	24	71	71.65
รวม	422,000	23	277	676	71.58

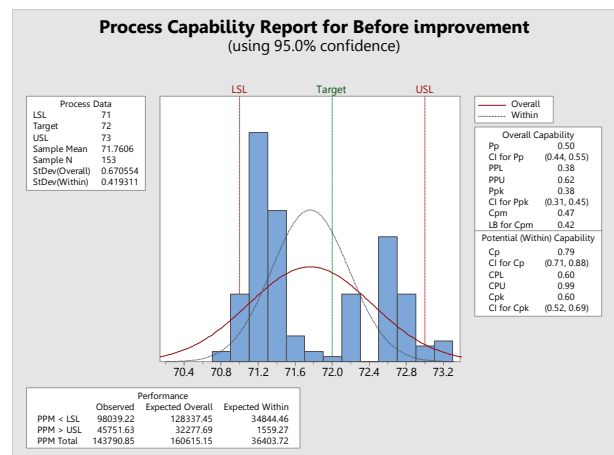
พบว่าหลังปรับปรุงค่าของ Cp และ Cpk มีค่าที่เพิ่มขึ้นดังนั้นค่า
ของความสามารถของกระบวนการดีขึ้น ดังตารางที่ 13 และรูปที่
12 และรูปที่ 13

ตารางที่ 12 : ข้อมูลเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง

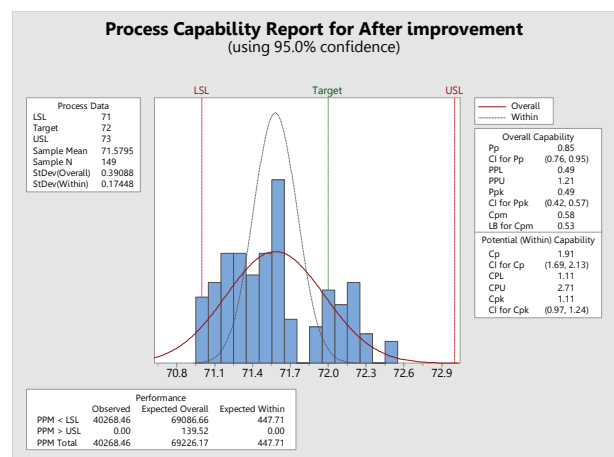
รายการเปรียบเทียบ (กรัม)	ก่อน ปรับปรุง	หลัง ปรับปรุง	เปรียบเทียบ (%)
ค่ามวลต่ำสุด-สูงสุด	70.87– 73.12	70.97– 72.54	30.22
ค่าพิสัย	2.25 g	1.57 g	30.22
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.67	0.39	41.79

ตารางที่ 13 : เปรียบเทียบค่าความสามารถของกระบวนการ

ค่าความสามารถ กระบวนการ	ก่อน ปรับปรุง	หลัง ปรับปรุง	เปรียบเทียบ (%)
Cp	0.79	1.91	141.77
Cpk	0.60	1.11	85



รูปที่ 12 : ค่าความสามารถกระบวนการก่อนปรับปรุง



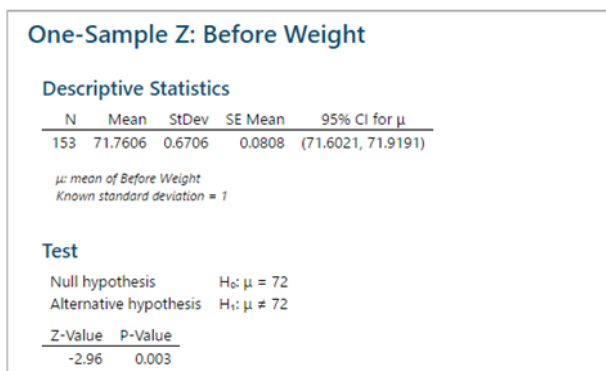
รูปที่ 13 : ค่าความสามารถกระบวนการหลังปรับปรุง

4.4) วิเคราะห์ผลหลังการปรับปรุง

หลังจากทำการปรับปรุง ส่งผลให้ลดเวลาการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์และจำนวนของเสียลดลง เมื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับก่อนและหลังปรับปรุง โดยเก็บข้อมูลจำนวน 13 วันและยอดการผลิต 422,000 กระป๋อง ที่เท่ากัน ได้ค่าดังนี้ 1) ค่าค่ามวลสูงสุด-ต่ำสุด (กรัมต่อกระป๋อง) 2) ค่าพิสัย (กรัม) 3) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กรัม) พบว่าลดลง ตามลำดับทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของค่าเฉลี่ยมวลบรรจุภัณฑ์ที่ลดลง จะต้องทำการปรับปรุงเพื่อให้ค่าเข้าใกล้ค่ากลางที่ 72 กรัม ดังตารางที่ 12

เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าความสามารถของกระบวนการ ได้ทำการวิเคราะห์ค่า Process Capability ได้ค่า Cp, Cpk ของค่ามวลบรรจุภัณฑ์ 72±1 กรัมต่อกระป๋องก่อนและหลังปรับปรุง

จากนั้นทำการทดสอบสมมติฐานว่ากระบวนการก่อนและหลังปรับปรุงดีขึ้นหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยได้ทำการทดสอบค่า z-value และค่า p-value พบว่า ค่าที่ได้ก่อนและหลังปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ผลที่ได้ คือ ปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานทางเลือก H_1 เนื่องจากผลที่ได้มีค่าไม่เท่ากับค่ามาตรฐานที่กำหนดคือ 72 ทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลักทั้งคู่แต่หลังปรับปรุงพบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลง ดังรูปที่ 14 และ รูปที่ 15 ทำให้ต้องทำปรับปรุงกระบวนการต่อเพื่อให้ได้ค่าที่ยอมรับสมมติฐานหลัก H_0



รูปที่ 14 : ผลการทดสอบสมมติฐานก่อนปรับปรุง



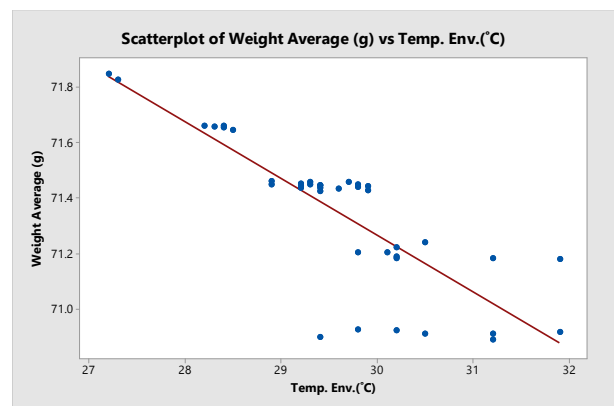
รูปที่ 15 : ผลการทดสอบสมมติฐานหลังปรับปรุง

5) อภิปรายผลและสรุปผล

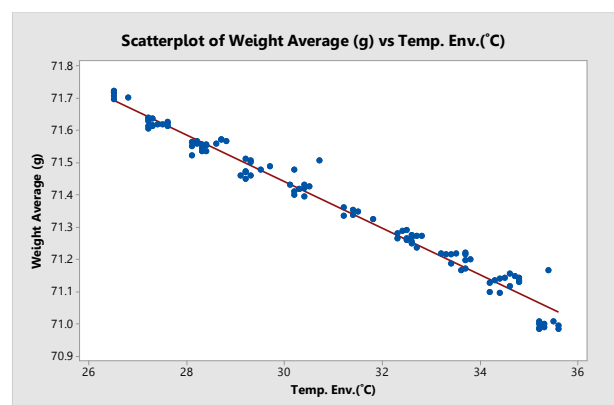
งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการบรรจุก๊าซเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทนทานสำหรับกระบวนการบรรจุก๊าซ ด้วยเทคนิคทากูชิ โดยมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยรบกวน ที่ทำให้ไม่ได้ค่ามาตรฐานตามที่กำหนดและ ใช้เทคนิคทากูชิ ออกแบบตารางการทดลอง Orthogonal Array L9 และวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีอิทธิพลต่อปัจจัยด้วยโปรแกรม Minitab หลังจากได้ค่าทั้ง 3 ปัจจัย คือ 1) ปัจจัยปริมาตรบรรจุก๊าซที่ระดับ

128 mL 2) ปัจจัยแรงดันบรรจุก๊าซ ที่ระดับ 2.0 MPa และ 3) ปัจจัยความเร็วในการบรรจุก๊าซ ที่ระดับ 65 can/min ซึ่งเป็นค่าที่ นำไปใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อทำให้ค่า อยู่ในช่วงเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ 71.00–73.00 g/can

เมื่อพิจารณาก่อนปรับปรุงพบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 29.4 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งมีความทนทานน้อยกว่าหลังปรับปรุงดังรูปที่ 16 หลังจากได้นำค่าพารามิเตอร์ไปใช้ในกระบวนการบรรจุก๊าซพบว่าค่าที่บรรจุ อยู่ในช่วงของค่าเป้าหมายในช่วงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ 26.5–35.6 องศาเซลเซียส แต่หลังจากอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 35.6 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดดังรูปที่ 17



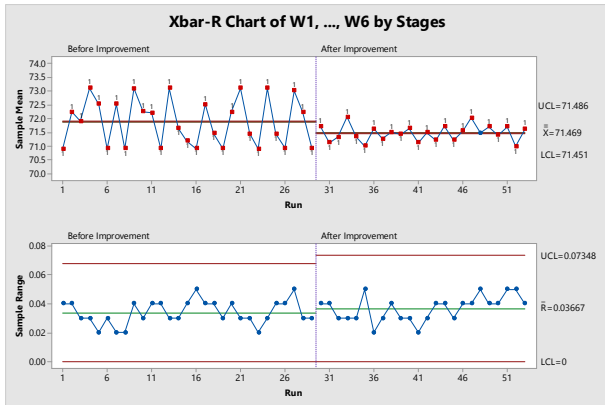
รูปที่ 16 : ค่ามวลบรรจุก๊าซและอุณหภูมิก่อนปรับปรุง



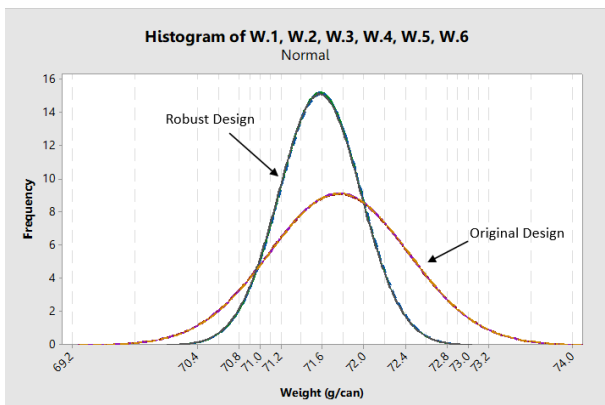
รูปที่ 17 : ค่ามวลบรรจุก๊าซและอุณหภูมิหลังปรับปรุง

หลังการปรับปรุงเมื่อค่ามวลบรรจุก๊าซต่ำกว่าค่ามาตรฐาน พนักงานบรรจุก๊าซจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ ค่าปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ ที่ระดับ 130 mL จากเดิมที่ระดับ 128 mL ทำให้ค่ามวลบรรจุก๊าซได้ตามค่ามาตรฐานตามที่กำหนด ในช่วงของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันที่มีการผลิต จาก

ข้อมูลหลังการปรับปรุง พบว่าค่าของ มวลก๊าซมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 70.97–72.54 g/can จากเดิมก่อนปรับปรุงที่มีช่วงค่ามวลที่กว้างกว่า คือ ช่วง 70.87–73.12 g/can ดังรูปที่ 18 และ รูปที่ 19



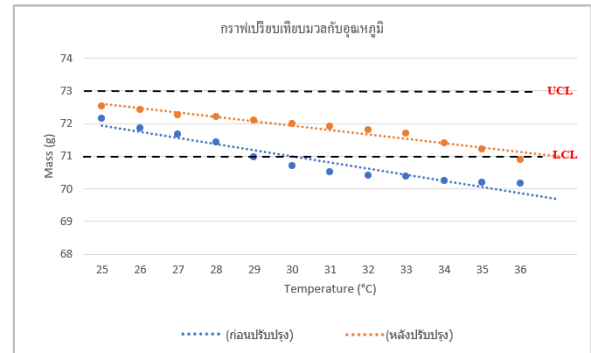
รูปที่ 18 : ค่ามวลก๊าซก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง



รูปที่ 19 : ค่ามวลก๊าซก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

สาเหตุที่ทำให้กระบวนการบรรจุก๊าซมีค่าที่ไม่คงที่เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลทำให้อุณหภูมิของก๊าซที่อยู่ในถังผสมและในท่อจ่ายก๊าซ มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำให้ปริมาตรและความหนาแน่นของก๊าซเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับ กฎของชาร์ล (Charles's Law) กล่าวว่า ปริมาตรของก๊าซที่มีมวลหนึ่ง ในความดันคงตัวจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาตรเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงส่งผลให้ค่ามวลก๊าซลดลงด้วย และเมื่ออุณหภูมิลดลงปริมาตรลดลงทำให้ความหนาแน่นของก๊าซเพิ่มขึ้นส่งผลให้มวลเพิ่มขึ้น จากผลที่ได้หลังปรับปรุงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทนทาน พบว่าทำให้ค่ามีความทนทาน ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เนื่องจากแรงดันที่ปรับเพิ่มขึ้น ช่วยทำให้ค่า

ความหนาแน่นมีค่าที่คงที่ในระดับที่ส่งผลให้การบรรจุก๊าซอยู่ในช่วงค่าเป้าหมายได้ แต่จากผลที่ได้พบว่ายังไม่สามารถทนทานต่อค่าของอุณหภูมิที่มากกว่า 35.6 องศาเซลเซียส ได้แสดงรูปภาพก่อนและหลังปรับปรุง โดยหลังปรับปรุงมีความทนทานมากขึ้น ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 : กราฟเปรียบเทียบมวลกับอุณหภูมิก่อนและหลังปรับปรุง

สำหรับประโยชน์ในงานวิจัยนี้ สามารถนำหลักการและวิธีการไปใช้ในหน่วยงานที่มีกระบวนการผลิตที่คล้ายคลึงกับกระบวนการบรรจุก๊าซ เพื่อช่วยปรับปรุงกระบวนการให้ค่ามวลอยู่ในค่าเป้าหมาย อีกทั้งยังสามารถประยุกต์สร้างโมเดลสมการถดถอย (Regression Equation of Model) แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้กับค่ามวลบรรจุก๊าซแต่ละผลิตภัณฑ์ที่มีค่าที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้สร้างรูปแบบของสมการในแต่ละโซน ดังแสดงในสมการที่ (1), (2), และ (3)

โซนที่ 1: อุณหภูมิ 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส

$$W = -2.83 + 0.499P - 0.271S + 0.5886V \quad (1)$$

โซนที่ 2: อุณหภูมิ 31 ถึง 35 องศาเซลเซียส

$$W = -2.10 + 0.520P - 0.0019S + 0.5620V \quad (2)$$

โซนที่ 3: อุณหภูมิ 36 ถึง 40 องศาเซลเซียส

$$W = 11.60 + 1.080P - 0.0062S + 0.4460V \quad (3)$$

โดยที่ W คือ มวลบรรจุก๊าซ

P คือ แรงดันบรรจุก๊าซ

S คือ ความเร็วบรรจุก๊าซ

V คือ ปริมาตรกระบอกบรรจุก๊าซ

จากนั้นเริ่มทำการทดสอบสมการเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเกินกว่าค่าที่ควบคุมได้ โดยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สมการที่ได้ไปหาค่าในแต่ละโซนดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 : ค่าพารามิเตอร์ที่ทนทานแต่ละช่วงอุณหภูมิ

Temperature of Zone (°C)	Mass (g)	Parameter Setting		
		Pressure (MPa)	Speed (can/minute)	Volume (mL)
Zone 1	72.00	2.00	65.00	128.60
Zone 2	72.00	2.00	65.00	130.22
Zone 3	72.00	2.00	65.00	131.50

เมื่อได้ค่าแล้วจากนั้นทำการตรวจสอบว่าค่าที่ได้ใช้งานได้หรือไม่ทำการทดสอบ พบว่าค่ามวลที่บรรจุอยู่ในช่วงที่กำหนดดังตารางที่ 15

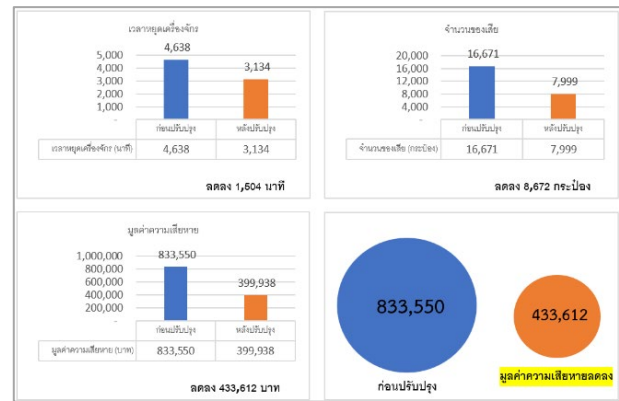
ตารางที่ 15 : ผลการทดสอบค่ามวลบรรจุก๊าซ

Zone	Gas Filling Mass (g/can)						
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	Aver.
1	72.05	72.06	72.02	72.04	72.03	72.06	72.04
2	72.12	72.08	72.09	72.06	72.10	72.07	72.09
3	72.04	72.05	72.01	72.06	72.09	72.06	72.05

ซึ่งทำให้พนักงานในห้องบรรจุก๊าซ นำสมการนี้ไปใช้ปรับตั้งค่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ทำให้ช่วยลดการลองผิดลองถูก ส่งผลให้ระยะเวลาการคืนสภาพ (recovery time) และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบลดลงดังตารางที่ 16 และเมื่อได้นำค่าร้อยละที่ลดลงหลังปรับปรุงไปเปรียบเทียบกับยอดการผลิตในอดีตที่ผ่านมา โดยคิดจาก 1) ยอดจำนวนของเสีย 2) เวลาปรับตั้งค่า และ 3) มูลค่าความเสียหาย ซึ่งช่วยให้สามารถประหยัดลงได้ 433,612 บาท ดังแสดงในรูปที่ 21

ตารางที่ 16 : ระยะเวลาการคืนสภาพก่อนและหลังปรับปรุง

ทดสอบครั้งที่	ระยะเวลาคืนสภาพ (นาท)		ผลิตภัณฑ์ทดสอบ (กระป๋อง)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1	11.83	5.50	14	6
2	12.43	6.43	14	7
3	12.33	5.70	16	6
4	11.80	5.76	18	8
5	11.60	5.42	16	6
ค่าเฉลี่ย	12.00	5.76	15.60	6.60
ร้อยละ	52.00 หลังปรับปรุง		57.69 หลังปรับปรุง	



รูปที่ 21 : เปรียบเทียบมูลค่าความเสียหายที่ลดลง

สำหรับอุปกรณ์สำคัญในงานวิจัยครั้งนี้ คือ ค่าความดันของเครื่องจักรไม่สามารถเพิ่มเกิน 2.0 MPa ได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของเครื่องจักร ส่งผลให้ไม่สามารถทดสอบความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นหากมีการทดลองเพิ่มเติมในอนาคต อาจจำเป็นต้องพิจารณาการเปลี่ยนเครื่องจักรเพื่อรองรับค่าความดันที่สูงขึ้น

ในด้านการแก้ไขปัญหา งานวิจัยนี้สามารถควบคุมน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดีผ่านการควบคุมพารามิเตอร์ในกระบวนการบรรจุก๊าซ ซึ่งสามารถทนต่อความแปรปรวนจากปัจจัยรบกวนของอุณหภูมิแวดล้อมได้ ทำให้มั่นใจว่ากระบวนการผลิตสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังช่วยให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว ลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร ทำให้ปริมาณการเติมก๊าซมีความสม่ำเสมอ ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ ลดความสูญเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพด้านต้นทุน

เทคนิคของทากูชิที่ใช้ในการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องลงทุนในเครื่องจักรใหม่ เพียงแค่ใช้การออกแบบการทดลองตามแนวทางของทากูชิเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทนทาน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการหรืออุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ใกล้เคียงต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ หลักสูตรเทคโนโลยีการจัดการทางวิศวกรรม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช สนับสนุนโปรแกรม Minitab สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

REFERENCES

- [1] T. Wijit, "Business plan of cooling spray 'Cool time' for athlete," (in Thai), M.S. thematic paper, College Manage., Mahidol Univ., Bangkok, Thailand, 2019. [Online]. Available: <https://archive.cm.mahidol.ac.th/bitstream/123456789/3745/1/TP%20EM.033%202562.pdf>
- [2] K. Dehnad, *Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method*. Pacific Grove, CA, USA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1989.
- [3] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1988.
- [4] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*, 2nd ed. Dearborn, MI, USA: Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [5] M. K. Ardakani, R. Noorossana, S. T. A. Niaki, and H. Lahijanian, "Robust parameter design using the weighted metric method - The case of 'the smaller the better'," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 59–68, 2009.
- [6] A.-W. A. Saif and M. A. Akram, "A Robust-Gain-Scheduled methodology for process parameter design and control with application to a carbonated beverage filling process," in *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Eng. and Eng. Manage.*, Singapore, Dec. 2011, pp. 1670–1674.
- [7] S. Vongpeang and A. Prasanjai, "Application of Taguchi method for defect reduce assembly process on printed circuit board a case study of an electronics part factory," (in Thai), *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 7, no. 2, pp. 26–35, 2019.
- [8] S. Phutthasorn and P. Choungthong, "A study of optimized parameter for nickel based superalloys with abrasive waterjet cutting," *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 5, no. 1, pp. 1–4, 2017.
- [9] W. Chen, J. K. Allen, K.-L. Tsui, and F. Mistree, "A procedure for robust design: minimizing variations caused by noise factors and control factors," *J. Mech. Des.*, vol. 118, no. 4, pp. 478–485, 1996.
- [10] R. Chang, *General Chemistry*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [11] European Aerosol Federation. "About Aerosols." AEROSOL.org. <https://www.aerosol.org/about-aerosols> (accessed Jul. 1, 2024).

Effect of Cutout Eccentricity on the Elastic Stability of Square Perforated Plates

Ek-u Thammakornbunjut¹ Sombat Tamna² Pongkorn Meelapchotipong³
Jongsak Pakpia⁴ Paiboon Limpitipanich^{5*}

^{1,3,4}AMM Research Laboratory, Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, KhonKaen, Thailand

^{5*}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: paiboonl@eng.buu.ac.th

Received: 31 October 2024; Revised: 26 March 2025; Accepted: 25 April 2025

Published online: 27 June 2025

Abstract

This research investigates an elastic stability, in a form of buckling load, of a square plate with an eccentric square cutout by considering the effects of eccentricity and size of a cutout and loadings. Three size of square cutouts, three eccentric positions along x- and y-axes, and three type of loadings are considered. For boundary conditions, a simple support on all edges of the plates is prescribed. The problems are modeled and simulated by finite element program, Ansys. In most cases, the results show that larger holes decrease the stability of the plates, while loading the plate in compression along both axes causes the plate to be the most vulnerable. However, loading the plate in one axis and pulling it in the other results in the best stability or buckling capacity. It also shows that the eccentricity of the cutout in relation to the load affects the stability of the plate. In the case of uniaxial and biaxial compressive loads, the eccentric hole along the main compressive load increases plate stability. In contrast, the stability of the plates are decreased in the case of biaxial tension-compression load no matter direction of eccentricity along the loads. For the buckling mode, as expected, a higher mode, a higher buckling capacity can be achieved.

Keywords: Biaxial loading; Buckling; Eccentric cutout; Finite element method; Square plate

I. INTRODUCTION

Many structures in various areas of civil, marine, aerospace, mechanical, and automotive engineering have used plates in their design and construction. Many of those designs usually made an opening in the plate to reduce weight, pipe and wire passage, inspection, and maintenance purposes. Because of this perforation, the distribution of the membrane stress near the hole will be changed and a reduction in load-carrying capacity can then be expected. For practical design in which high safety and lowest cost are primary considerations, it is important to understand the behavior of perforated plates subjected to in-plane compressive forces. This kind of problem is buckling in which the plate loses stability of its equilibrium after the in-plane load reaches the critical value.

Numerous investigations into plate stability have been conducted and documented [1]–[3]. Stability criteria are usually associated with the load-carrying capacity of the structures. In the case of plate-type structures, this means the ability of a plate to withstand the compressive or shear loads that act parallel to its plane. Geometry of the plates are mainly influence to their stability or buckling loads. With a presence of a cutout or an opening, the problems are much more difficult to analyze in theoretical approach compared to experimental and numerical investigations. To author's knowledge, research on the buckling behavior of square or rectangular plates with cutouts dates back to 1947 [4]. Nemeth [5] and Shanmugam [6] have offered in-depth insights into the stability of perforated plates. Meanwhile, Narayanan and Chow [7], [8] and Paik [9], [10] have conducted significant studies on this topic, extending their research to the ultimate strength of square and rectangular plates.

Analyzing the buckling of perforated plates typically entails placing the holes at the plate's center and subjecting it to uniaxial, biaxial, or shear loads. Numerous experimental investigations and theoretical

formulations have been employed for this purpose. However, handling biaxial loading conditions poses challenges in experimentation, and devising precise formulas or theoretical models becomes intricate. The accuracy of results often diminishes as the size of cutouts increases or when holes are misaligned. Consequently, researchers have increasingly relied on the computational methods such as finite element method to analyze this issue due to its widely acknowledged accuracy and precision.

Previous research has mainly focused on the effects of hole shapes, positions, and load characteristics [7]–[16]. Only a few have focused on eccentricity of a hole [17], [18]. However, the specific impact of hole eccentricity on the buckling load of plates under biaxial compression or biaxial tension-compression, especially with square holes, has not been clearly addressed. This research aims to assess how cutout eccentricity influences the buckling load of square plates with square cutouts under both uniaxial and biaxial in-plane loads, using the finite element analysis.

II. RESEARCH METHODOLOGY

A. Modeling of Perforated Square Plates

This study used the finite element software Ansys to compute the buckling loads of square plates with eccentric cutout under three uniform in-plane loads: uniaxial compressive load along the x-axis, biaxial compressive loads in both x- and y-axes, and biaxial compression and tension in the x- and y-axes, respectively. As shown in Figure 1, this research evaluated a square plate of $300 \times 300 \text{ mm}^2$ with a modulus of elasticity of 211 GPa and a Poisson's ratio of 0.3. A square cutout with dimensions expressed as a ratio (d/b) of 0.1, 0.2, and 0.3 relative to the panel size were introduced. Regarding the eccentricity (e_x or e_y), they were defined as 15, 45, and 75 mm along x- and y-axes and were considered relative to the plate size (e_x/a or e_y/a).

Additionally, the boundary conditions were defined as simply supported on all edges.

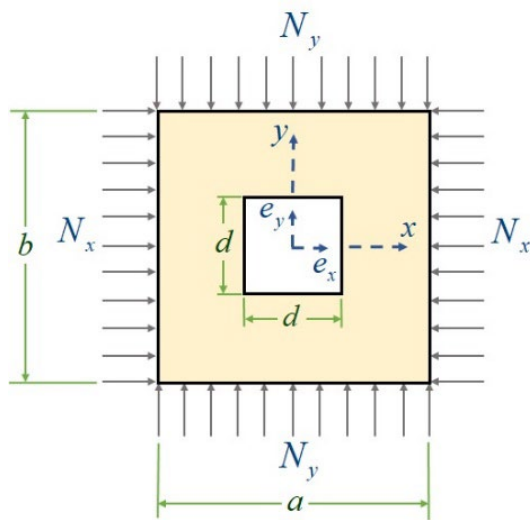


Figure 1: Plate and cutout geometries with load characteristic

B. Loading Conditions

The applied load consists of a uniformly distributed force acting along the edge of the plate, measured in kN/m and directed perpendicular to the edge. As shown in Figure 1, the buckling load is determined by the calculated force in the x-direction, which is always a compressive force. Meanwhile, the force in the y-direction will be zero, compression, or tension representing the uniaxial, compression-compression, and tension-compression cases, respectively. Note that the magnitude of the force on the y-axis will be equal to the one on the x-axis at the buckling state.

C. Numerical Analysis

In present work, a finite element program, Ansys, was employed for analysis. An element size of 0.01 m was specified at the distance from the hole and decreased to 0.002 m at the edge of the hole. The computations based on linear buckling assumption was performed using eigenvalue buckling analysis. A simply supported condition on all four edges was assigned.

The convergence of the solutions were tested by increasing the number of elements until the change in the calculated value is less than 1%. In each case, it was varied between 1369 and 2721, depending on the cutout size and the eccentricity. In addition, some case of plates without holes were examined by comparing with the experimental results to verify the accuracy of the program as shown in [15].

III. RESULTS AND DISCUSSION

At first, we consider the effects of size and eccentricity of the cutout under three loading conditions to the buckling loads. It is obviously, as shown in Figure 2 to 6, that the buckling loads were less as the hole size increased at any type of loads and eccentricity of the hole. From Figure 2 and 3, when considering the effect of hole eccentricity in the case of uniaxial compression loading, it was found that the buckling load decreased slightly when the hole was slightly eccentric. However, when the hole was more eccentric and approached the edge of the plate, the buckling load increased in the case of hole eccentricity in the x-direction. While the eccentricity in the y-direction the buckling load did not increase significantly at hole sizes of $d/b = 0.1$ and $d/b = 0.2$, the buckling load decreased significantly at hole size of $d/b = 0.3$. This means that if the plate is necessary to make a perforation, especially in a square shape, a cutout position should be placed near the loading edge to remain buckling resistant. From this calculation result, further analysis should be conducted by increasing the hole size.

In Figure 4, in the case of a square plate subjected to biaxially compressive loads, the hole eccentricity in the x-direction and y-direction is the same. A larger hole eccentricity will result in a slightly larger buckling load of the plate.

In the case of biaxial tension-compression, as shown in Figure 5 and 6, the effect of hole eccentricity in either the x-direction or the y-direction has a similar trend, that is, the greater the eccentricity, the lower the buckling load, and the greater the decrease as the hole size increases. It can be said that in the case of biaxial tension-compression, the holes should not be offset from the center of the plate to provide the greatest resistance to buckling.

Apart from that, when considering the results of the three types of loading (see Figures 2–6), it can be seen that in the case of uniaxial loading, the buckling load

will be in the range of 50–65 kN/m, in the case of biaxial compression-compression loading, the buckling load will be in the range of 25–35 kN/m, and in the case of biaxial tension-compression loading, the buckling load will be in the range of 70–140 kN/m. It can be said that if you want the perforated plate to resist buckling well, it should be designed to withstand tensile force in the direction perpendicular to the compression load. And if the structure of the perforated plate needs to withstand biaxial compression loads, special care should be taken when using it or a reinforcement may be added to make the panel stronger.

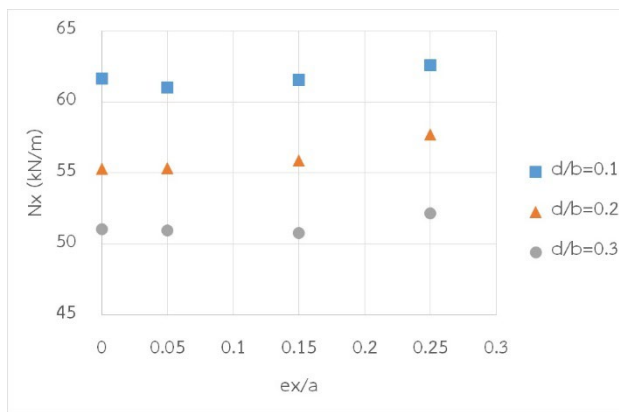


Figure 2: Buckling loads of plates with eccentric cutouts in x-direction subject to uniaxial loading

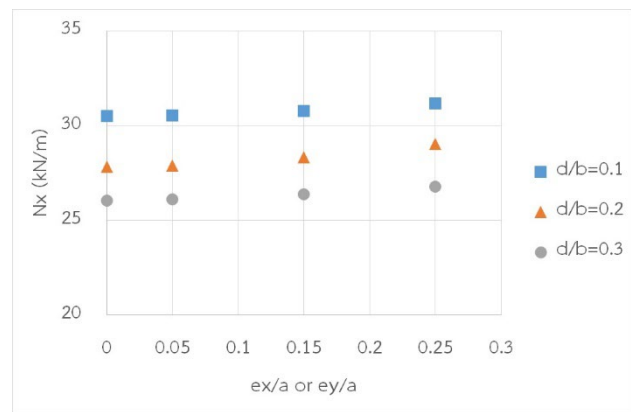


Figure 4: Buckling loads of plates with eccentric cutouts in x- or y-directions subject to biaxial compression-compression loading

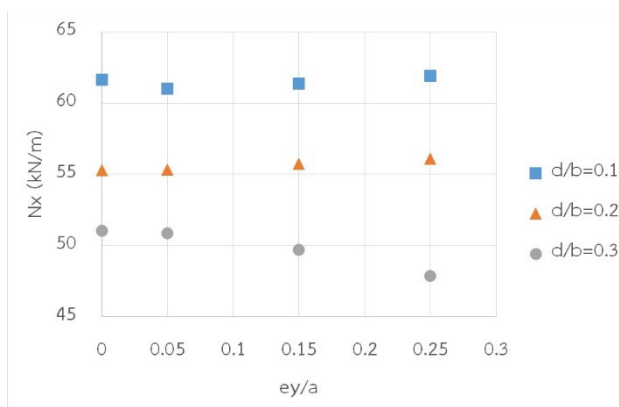


Figure 3: Buckling loads of plates with eccentric cutouts in y-direction subject to uniaxial loading

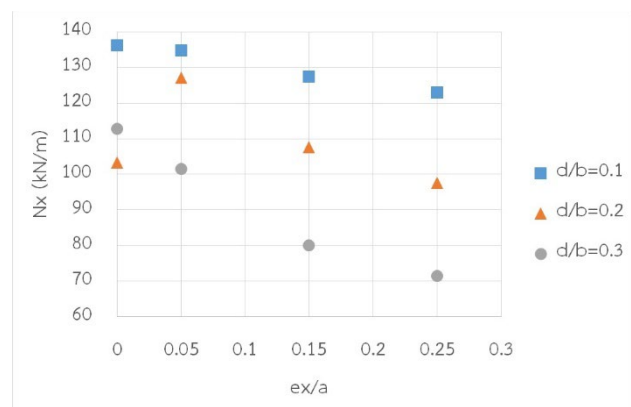


Figure 5: Buckling loads of plates with eccentric cutouts in x-directions subject to biaxial tension-compression loading

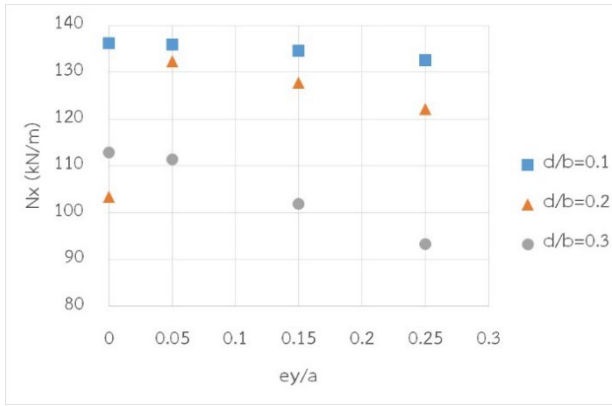


Figure 6: Buckling loads of plates with eccentric cutouts in y-directions subject to biaxial tension-compression loading

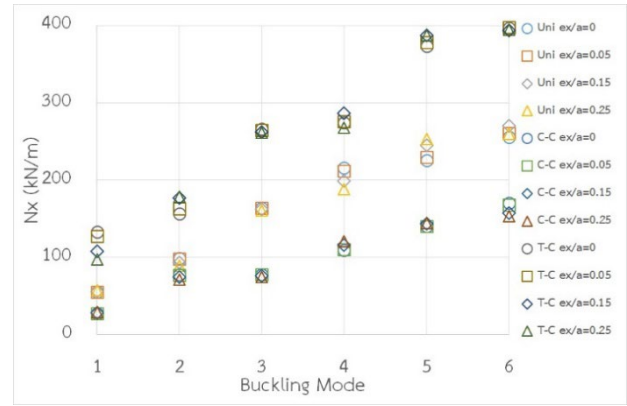


Figure 8: Buckling mode of plates with eccentric cutouts in x-direction at $d/b = 0.2$ subject to three loadings

Unlike the buckling of columns, after the in-plane compressive force reaches the buckling load, the plate can still withstand higher loads, and bending behavior of the plate will change from mode 1 to higher modes in sequence. From Figures 7–12, which are the buckling loads of perforated plates at different modes receiving three types of loading, with the eccentricity of the holes in x- and y-directions, it can be seen that the buckling load increases along the mode, which tends to be consistent with the theory of non-perforated plates.

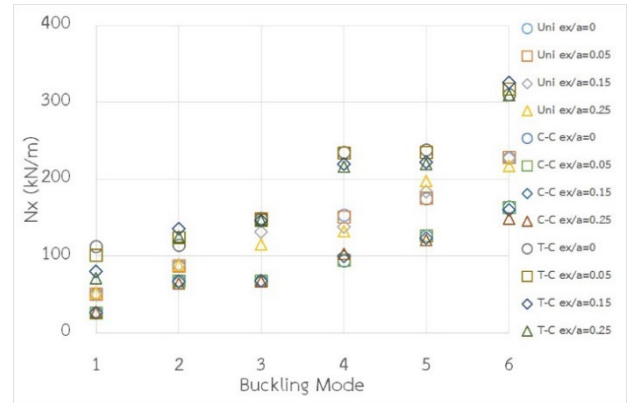


Figure 9: Buckling mode of plates with eccentric cutouts in x-direction at $d/b = 0.3$ subject to three loadings



Figure 7: Buckling mode of plates with eccentric cutouts in x-direction at $d/b = 0.1$ subject to three loadings

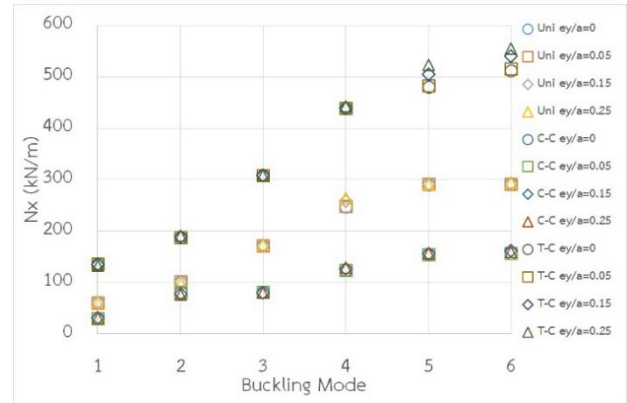


Figure 10: Buckling mode of plates with eccentric cutouts in y-direction at $d/b = 0.1$ subject to three loadings



Figure 11: Buckling mode of plates with eccentric cutouts in y-direction at $d/b = 0.2$ subject to three loadings

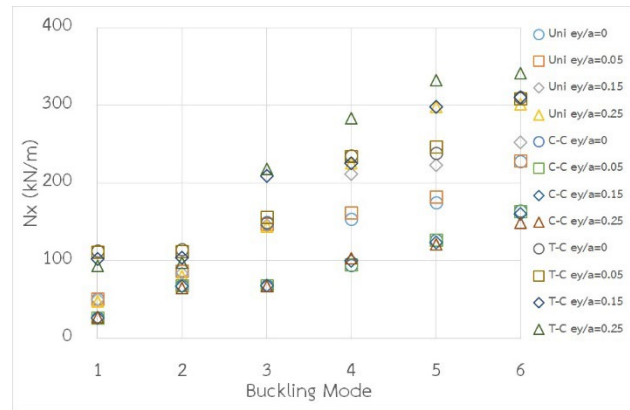
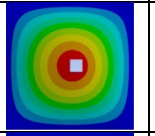
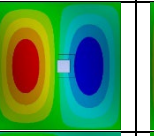
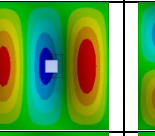
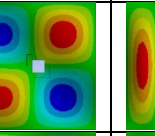
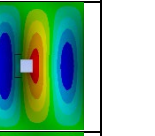
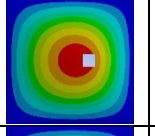
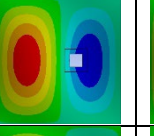
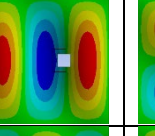
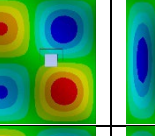
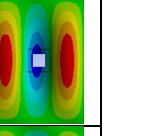
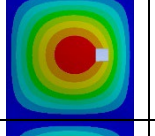
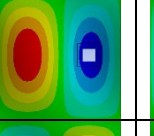
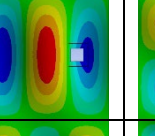
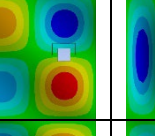
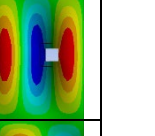
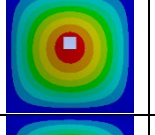
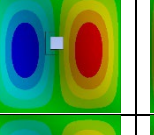
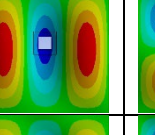
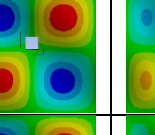
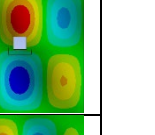
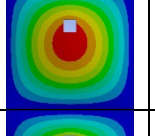
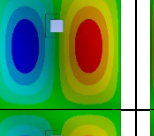
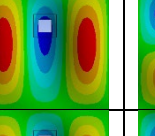
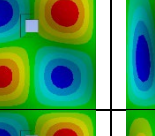
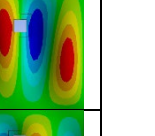
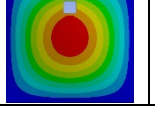
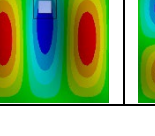
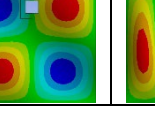
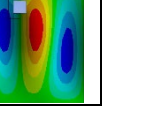


Figure 12: Buckling mode of plates with eccentric cutouts in y-direction at $d/b = 0.3$ subject to three loadings

Table 1: Buckling Modes of a Square Plate with an Eccentric Square Hole Subject to Uniaxial Load

Load Type	d/b	ex	ey	Mode Number				
				1	2	3	4	5
Uniaxial	0.1	15	0					
		45	0					
		75	0					
		0	15					
		0	45					
		0	75					

In addition, an out of plane deformations of 5 buckling modes of square plates with eccentricity at $d/b = 0.1$ subject to uniaxial load, biaxial compressive loads, and biaxial tension-compression loads are illustrated, just for example, in Table 1–3, respectively. In the case of biaxial tensile and compressive loads, the mode shapes in any cases look different from the other

two load types. Due to the characteristics of deflection in each mode, which in some cases may be similar but in some cases are different, if a sensor is to be installed to detect the deflection of the perforated plate, the engineers should consider the appropriate location in order to be able to predict the value and mode of buckling correctly.



Table 2: Buckling Modes of a Square Plate with an Eccentric Square Hole Subject to Biaxial Compressive Load

Load Type	d/b	ex	ey	Mode Number				
				1	2	3	4	5
Biaxial Compression-Compression	0.1	15	0					
		45	0					
		75	0					
		0	15					
		0	45					
		0	75					

Table 3: Buckling Modes of a Square Plate with an Eccentric Square Hole Subject to Tensile-Compressive Load

Load Type	d/b	ex	ey	Mode Number				
				1	2	3	4	5
Biaxial Tension-Compression	0.1	15	0					
		45	0					
		75	0					
		0	15					
		0	45					
		0	75					

IV. CONCLUSION

This work examines the buckling load of a square plate with an eccentric square cutout. By considering the effect of the eccentricity of the cutout in x- and y-axes, the size of the hole, and three different types of load, it can be concluded that the larger the hole size, the lower the buckling resistance of the plate. The load that compresses the plate on both axes will make the plate weakest. While applying one axis of tension and one axis of compression, the plate can resist buckling the best. In terms of eccentricity, it relates to the type of loading, that is, when the load is acting in a uniaxial direction and biaxial compression, eccentricity of the hole in a direction parallel to the load will increase the value of the buckling load. In other words, the plate has a higher buckling resistance. But when the plate is subjected to tensile and compressive loads perpendicular to each other the eccentricity of the hole in the direction parallel to the compression results in a reduction in the buckling resistance no matter which direction the eccentricity goes. In this work, the cutout size were limited to the d/b ratio of 0.3 which will be studied further. However, under this limitation, the cutout eccentricity should be placed in the direction of a main compressive load (x-axis), which will increase the buckling resistance in the case of uniaxial or compressive-compressive loads otherwise, the eccentricity is not recommended. In addition, buckling loads of the mode shapes up to the fifth mode are demonstrated, which show that a higher mode will be achieved with a higher buckling load. The mode shapes in the case of $d/b = 0.1$ are shown as examples for an opportunity to use plate's buckling mode shape as a sensor or an actuator in MEMs, mechatronics, and related works.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Faculty of Engineering, Burapha University, Thailand through research grant no. 29/2548 which is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] P. S. Bulson, *The Stability of Flat Plates*. London, UK: Chatto & Windus, 1970.
- [2] F. Bloom and D. Coffin, *Handbook of Thin Plate Buckling and Postbuckling*. New York, NY, USA: Chapman & Hall/CRC, 2001.
- [3] R. M. Jones, *Buckling of Bars, Plates, and Shells*. Blacksburg, VA, USA: Bull Ridge Publishing, 2006.
- [4] S. Levy, R. M. Woolley, and W. D. Kroll, "Instability of simply supported square plate with reinforced circular hole in edge compression," *J. Res. Nat. Bureau of Standards*, vol. 39, pp. 571–577, Dec. 1947.
- [5] M. P. Nemeth, "Buckling and postbuckling behavior of laminated composite plates with a cutout," National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA, NASA Tech. Rep. 3587, 1996.
- [6] N. E. Shanmugam, "Thin-walled structural elements containing openings," in *Proc. 3rd Int. Conf. Thin-Walled Struct.*, Cracow, Poland, Jun. 2001, pp. 37–51.
- [7] R. Narayanan and F. Y. Chow, "Ultimate capacity of uniaxially compressed perforated plates," *Thin-Walled Struct.*, vol. 2, no. 3, pp. 241–264, 1984.
- [8] F.-Y. Chow and R. Narayanan, "Buckling of plates containing openings," in *Proc. 7th Int. Specialty Conf. Cold-Formed Steel Struct.*, St. Louis, MO, USA, Nov. 1984, pp. 39–53.
- [9] J. K. Paik, "Ultimate strength of perforated steel plates under edge shear loading," *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, no. 3, pp. 301–306, Mar. 2007.
- [10] J. K. Paik, "Ultimate strength of steel plates with a single circular hole under axial compressive loading along short edges," *Ships and Offshore Struct.*, vol. 2, no. 4, pp. 355–360, 2007.
- [11] 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.
- [12] Y. Fujita, K. Yoshida, and H. Arai, "Instability of plates with holes (2nd Report)," (in Japanese), *J. Soc. Naval Architects Japan*, vol. 1969, no. 126, pp. 285–294, 1969.



- [13] K. M. El-Sawy and A. S. Nazmy, "Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, no. 12, pp. 983–998, Dec. 2001.
- [14] K. M. El-Sawy and M. I. Martini, "Elastic stability of bi-axially loaded rectangular plates with a single circular hole," *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, no. 1, pp. 122–133, Jan. 2007.
- [15] E. Thammakornbunjut, P. Meelapchotipong, J. Pakpia, S. Tammapattaragul, and P. Limpitipanich, "Buckling of square plates with different central cutouts," *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 10, no. 2, pp. 13–20, 2022.
- [16] A. Milazzo *et al.*, "Buckling and post-buckling of variable stiffness plates with cutouts by a single-domain Ritz method," *Thin-Walled Struct.*, vol. 182, 2023, Art. no. 110282, doi: 10.1016/j.tws.2022.110282.
- [17] J. Blesa Gracia and F. G. Rammerstorfer, "Increase in buckling loads of plates by introduction of cutouts," *Acta Mech.*, vol. 230, no. 8, pp. 2873–2889, 2019.
- [18] K. S. Subash Chandra, T. Rajannac, and K. Venkata Rao, "A parametric study on the effect of elliptical cutouts for buckling behavior of composite plates under non-uniform edge loads," *Latin Amer. J. Solids Struct.*, vol. 17, no. 8, 2020, Art. no. e330.

การป้องกันการกัดเซาะพื้นที่ลาดเอียงในกรณีฝนตกหนักมากด้วยแผ่นยางรีไซเคิล

วิจิตร อธิวิวงศ์กุล^{1*} วิทยกุล สิทธิสาร² ศิวโรดม ศิริลักษณ์³

^{1*,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, เชียงใหม่, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : wijit_i@rmutl.ac.th

รับต้นฉบับ : 19 มิถุนายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 21 กันยายน 2567; ตอรับบทความ : 11 ตุลาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

การกัดเซาะดินเป็นปัญหาต่อระบบนิเวศและมีค่าใช้จ่ายในการจัดการ โดยมีปัจจัยหลักคือ ปริมาณน้ำฝนต่อหน่วยเวลา งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวัดสูญเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่มาใช้งานแทนวัสดุสังเคราะห์ด้านงานดิน โดยเลือกใช้ยางสายพานที่ผ่านการใช้งานแล้วและไม่มีมูลค่า ซึ่งมีภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการเพื่อกำจัด มาใช้แทนวัสดุสังเคราะห์สำหรับงานป้องกันการกัดเซาะภายใต้สภาวะฝนตกหนักมาก ปริมาณ 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยจำลองการทดลองแบบเอียง ผลการทดลองจาก 8 เงื่อนไขการศึกษาที่แตกต่างกันในด้าน มุมเอียง ความหนาแน่นของดิน และการนำแผ่นยางมาใช้ในการปกป้อง พบว่า การใช้ยางสายพานสามารถป้องกันการกัดเซาะดินจากฝนตกได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ยางสายพาน นอกจากนี้ยังพบว่าความลาดชันมีผลต่อปริมาณดินที่ถูกกัดเซาะ เมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดินถูกกัดเซาะมากขึ้นตาม แต่เมื่อความลาดชันถึง 45 องศา การใช้ยางสายพานมีประสิทธิภาพการป้องกันการกัดเซาะดินใกล้เคียงกับไม่ใช้ยางสายพาน ปัจจัยการเพิ่มความหนาแน่นของดินจะช่วยให้ดินเกิดการกัดเซาะน้อยลง และเมื่อใช้ยางสายพานร่วมจะช่วยให้ลดการกัดเซาะได้ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ด้วยประสิทธิภาพนี้สามารถประยุกต์ใช้ในพื้นที่กองทิ้งดิน คั่นดิน และผนังบ่อเหมืองได้

คำสำคัญ : เหมืองแร่ การป้องกันการกัดเซาะ ปริมาณน้ำฝนต่อหน่วยเวลา การกัดเซาะดิน วัสดุเหลือทิ้ง

Heavy Rainfall-induced Slope Erosion Prevention by Recycled Rubber Textile

Wijit Itthiwongkul^{1*} Wittayakul Sittisarn² Siwarote Siriluck³

^{1*,2,3}*Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand*

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

Received: 19 June 2024 Revised: 21 September 2024; Accepted: 11 October 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

Soil erosion is a significant problem for ecosystems and management costs. The main factor affecting the amount of soil eroded is rainfall intensity. This study investigated waste materials from the mining industry as alternatives to geosynthetic materials in soil applications. The rubber that had been used, which is otherwise valueless and costly to handle for disposal, was selected as a geosynthetic material for erosion prevention under very heavy rainfall conditions, with a rainfall intensity of 120 mm/hr. The study conducted a tilted bed slope experiment to compare eight different conditions, including slope angle, soil density, and the use of rubber. The results showed that the use of rubber can effectively protect soil erosion, by up to 60%, compared to conditions without rubber under very heavy rainfall. It was found that the slope angle influences the amount of soil eroded; as the slope angle increases, the soil erosion also increases. Notably, at a slope of 45°, the effectiveness of rubber exhibited a similar result in preventing erosion as without rubber. It is worth noting that increasing soil density leads to a decrease in soil erosion. This is more clearly demonstrated in terms of combined rubber, resulting in up to a 35% reduction in soil erosion. Future studies on recycling rubber could focus on waste dumping areas, earthworks and mine pit walls.

Keywords: Mining, Preventing erosion, Rainfall intensity, Soil erosion, Waste materials

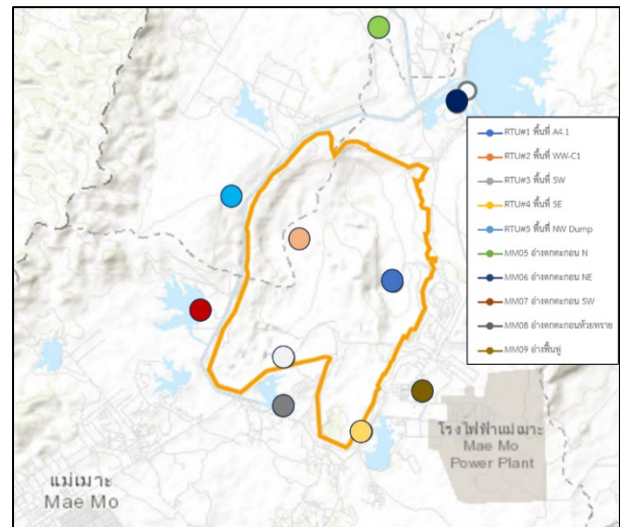
1) บทนำ

การกัดเซาะหน้าดินด้วยน้ำฝนถือว่าเป็นปัญหาต่อระบบนิเวศ สิ่งแวดล้อมและงานวิศวกรรมในพื้นที่ที่มีความลาดชันได้แก่ งาน พื้นที่เหมือง งานไหลทาง งานปรับทัศนียภาพ งานเขื่อน เป็นต้น ปริมาณหน้าดินที่ถูกกัดเซาะนอกเหนือจากปริมาณน้ำฝนยังมี ปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความลาดเอียง ความขรุขระของผิวดิน การระบายน้ำ การไหลของน้ำใต้ดิน และการเพาะปลูก [1]–[4] บริเวณที่มีการกัดเซาะหน้าดินส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและ ลักษณะภูมิประเทศ การป้องกันมักจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ปริมาณดินที่ถูกกัดเซาะและพัดพาไปทำให้บริเวณนั้นต้องมีดินมา ทดแทน นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายอื่น ๆ เช่น ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การสิ้นเปลืองน้ำมัน และค่าดำเนินการ เป็นต้น

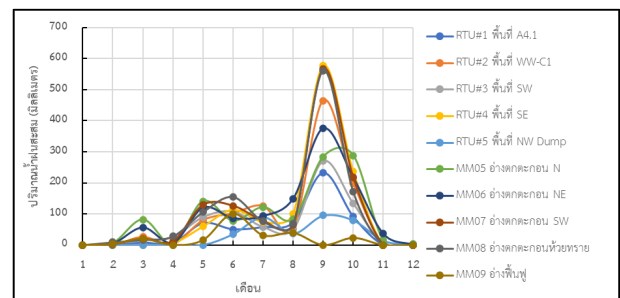
ในช่วงฤดูฝนถือว่าเป็นช่วงที่มีฝนตกมากกว่าฤดูอื่น ทำให้มี ปริมาณน้ำฝนสูงจนเกิดการกัดเซาะหน้าดิน และทำให้ตะกอนดิน ถูกพัดพาด้วยน้ำฝนไปยังบริเวณอื่น งานวิจัยนี้ทำการเลือกตัวอย่าง พื้นที่ทำการศึกษากองมูลดินทิ้งและปริมาณน้ำฝนจากข้อมูลย้อน หลัง 5 ปี ในพื้นที่บ่อเหมืองของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (รูปที่ 1) ตามตำแหน่งจุดวัด ปริมาณน้ำฝนในรูปที่ 2 โดยมีปริมาณน้ำฝนสูงสุดในช่วงฤดูฝนดัง รายละเอียดปี พ.ศ. 2566 ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3 ซึ่งมี ปริมาณน้ำฝนสะสมสูงสุดตลอดทั้งปีประมาณ 1,400 มิลลิเมตร ต่อปี และมีปริมาณน้ำฝนสูงสุด 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง [5] หาก ดูข้อมูลรอบปีการเกิดซ้ำย้อนหลัง 500 ปี พบว่าปริมาณน้ำฝนใน พื้นที่จังหวัดลำปาง บริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่บ่อเหมืองอยู่ที่ 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงดังรายละเอียดแสดงในรูปที่ 4 [6] ซึ่งมี ปริมาณน้ำฝนจัดอยู่ในระดับฝนตกหนักมาก [7], [8]



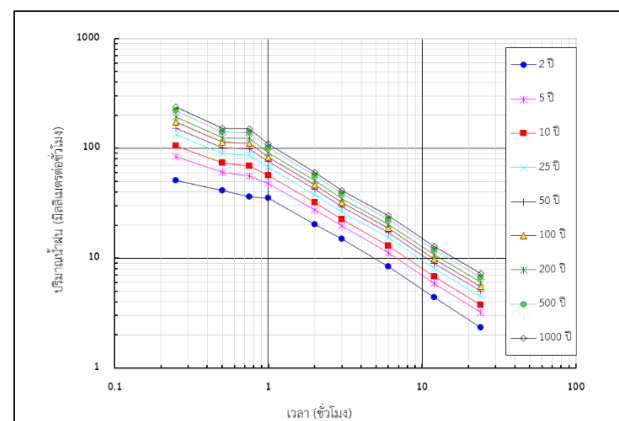
รูปที่ 1 : ตำแหน่งเหมืองแม่เมาะที่ทำการศึกษาข้อมูลปริมาณน้ำฝน



รูปที่ 2 : ตำแหน่งจุดวัดปริมาณน้ำฝน [5]



รูปที่ 3 : ปริมาณน้ำฝนสะสมในพื้นที่บ่อเหมืองแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2566 [5]



รูปที่ 4 : กราฟแสดงปริมาณน้ำฝนกับเวลาในรอบปีการเกิดซ้ำ [6]

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติอันดับ 1 ของโลกที่มี คุณภาพและมาตรฐานสูง [9] และมีการใช้อย่างธรรมชาติในการ ผลิตสายพานลำเลียง เมื่อสายพานลำเลียงหมดอายุการใช้งาน กลายเป็นขยะเหลือทิ้งที่ไม่เกิดประโยชน์

จากความสำคัญดังกล่าว จึงเกิดแนวคิดในการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีต้นทุนต่ำในการดำเนินการ และสามารถประยุกต์ใช้ได้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ได้ โดยการสร้างแบบจำลองเสมือนพื้นที่จริง และศึกษาทางสายพานสำหรับป้องกันการกัดเซาะดินจากน้ำฝน

2) ทบทวนวรรณกรรม

ในปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการป้องกันการกัดเซาะดินเป็นอย่างมากโดยให้ความสนใจกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ปัจจัยจากดิน ปริมาณน้ำฝน และความลาดชัน แต่อย่างไรก็ตาม นักวิจัยได้พยายามใช้วัสดุต่าง ๆ เพื่อช่วยป้องกันการกัดเซาะดิน งานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

Zhao and Yin [1] ได้ทำการศึกษาเส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายเปรียบเทียบกับ การปล่อยดินไปตามธรรมชาติด้วยการทดสอบความลาดชันต่อการกัดเซาะหน้าดินภายใต้สภาวะฝนตก พบว่าการใช้เส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งมีส่วนช่วยป้องกันการกัดเซาะหน้าดินน้อยลง และความดันจากน้ำฝนที่ซึมไหลผ่านเส้นใยสังเคราะห์ลดลง ทำให้เสถียรภาพของดินเพิ่มขึ้น Song *et al.* [10] ทดลองเพื่อช่วยให้พืชมีการเจริญเติบโตในความลาดชันจากการทดลองพบว่า การใช้เส้นใยสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างแบบตาข่ายรังผึ้งและใส่ฟางข้าวผสมด้วยจะช่วยให้ลดการเคลื่อนตัวของดินและยังคงสภาพดีกว่าแบบธรรมชาติที่ไม่เสริมวัสดุ โดยเฉพาะดินที่เกิดแบบธรรมชาติไม่เสริมวัสดุ เมื่อฝนตกดินจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวระหว่างส่วนบนและส่วนล่างทำให้เกิดรอยแตกอย่างเห็นได้ชัดบริเวณส่วนบน นอกจากนี้นักวิจัยอื่น ๆ ยังมีการใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) จำลองและศึกษาปัจจัยที่มีลักษณะซับซ้อน โดยใช้โปรแกรมประเภท วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการผลต่างสลับเนื่อง เช่น โปรแกรม Ansys โปรแกรม ABAQUS และโปรแกรม FLAC เป็นต้น โปรแกรมช่วยในการจำลองการใช้วัสดุเส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงผลพารามิเตอร์ อาทิ ระยะเวลาฝนตก (rain duration) การเคลื่อนตัวของดิน (displacement) ความเค้นภายในดิน (stress) การพิบัติ (failure) ค่าความปลอดภัย (factor of safety) แรงกดทับจากปัจจัยภายนอก (loading) [1], [11]–[13] หลังจากฝนตกปริมาณความชื้นในดินจะมีการเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ดินมีการอิ่มตัว (saturation) ด้วยแรงดันน้ำนี้ทำให้ลดค่าความเชื่อมแน่นระหว่าง

เม็ดดินจึงทำให้เกิดการกัดเซาะและพัดพาตะกอนไปตามน้ำ โดยส่วนที่สูงกว่าจะเกิดการกัดเซาะของเม็ดดินและไหลไปตามความลาดชัน เม็ดดินที่มีการพัดพามาจะทำให้เกิดการทับถมบริเวณส่วนล่างของแบบจำลอง [14], [15] ตะกอนเหล่านี้ในสภาพจริงจะถูกพัดพาไปตามแม่น้ำและทับถมกันโดยส่วนใหญ่ที่อ่างเก็บน้ำ ตะกอนนี้สร้างปัญหาต่อระบบนิเวศ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการจัดการ Panagos *et al.* [16] ได้ประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดการที่เกี่ยวข้องดินที่ถูกกัดเซาะโดยเก็บตัวอย่างจากตะกอนดินในอ่างเก็บน้ำ พบว่าค่าใช้จ่ายประมาณ 700 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศในทวีปยุโรป

ในปัจจุบันการใช้วัสดุในงานดิน (geosynthetic materials) เป็นที่นิยมมากขึ้นในงานแก้ไขปัญหาดินกันเซาะ วัสดุประเภทวัสดุเส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้ง (geocell) เป็นวัสดุพอลิเมอร์แบบ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene) หรือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene) มีหลายขนาดและมีคุณสมบัติป้องกันการกัดเซาะได้ดี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงในการรับแรงกดและแรงดึงสูง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ทำให้เสถียรภาพและความปลอดภัยเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ใช้วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ [17]

รูปที่ 5 แสดงวัสดุคลุมดินแบบเส้นใยสังเคราะห์มีลักษณะด้านทานการไหลของน้ำตามแนวความลาดชัน วัสดุคลุมดินแบบตาข่ายรังผึ้งมีจำหน่ายทั่วไป โดยมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการใช้งาน โดยทั่วไปมีความกว้าง 25–35 เซนติเมตร ยาว 20–28 เซนติเมตร สูง 5–20 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 1.2 มิลลิเมตร และความหนาแน่นโดยประมาณ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [18]–[20]



รูปที่ 5 : วัสดุสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งจากโครงการซ่อมแซมคันดินอ่างเก็บน้ำตาตมพู่ จังหวัดเชียงใหม่

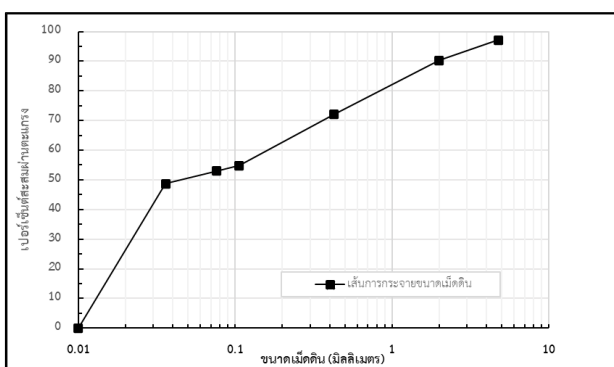
วัสดุสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งใช้ได้ผลดีและมีประสิทธิภาพในการป้องกันในเรื่องของการกัดเซาะดินเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทั่วไป เช่น หินเรียงยาแนว (stone pitching) วัสดุคลุมดิน (mulch mat) และกำแพงกันดิน (crib walls) วิธีเหล่านี้มีการดำเนินงานที่ยุ้งยากและมีประสิทธิภาพป้องกันการกัดเซาะดินต่ำ [21]

นักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณการกัดเซาะจากการวัดปริมาตรหรือซึ่งน้ำหนักดินแห้ง เนื่องจากเม็ดดินมีขนาดเล็ก ด้วยการทดลองการกัดเซาะในห้องปฏิบัติการ ส่วนใหญ่จะทำการทดลองแบบความเครียดระนาบ 2 มิติ (plane strain) [22], [23] และแบบเอียง (tilted bed slope) [2], [24]–[26]

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) ตัวอย่างและแผนการทดลอง

3.1.1) ดิน สำหรับการทดลองนี้เป็นเปลือกดินที่เหมือนถ่านหินแม่เมาะ ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุและมีการกระจายขนาดเม็ดดินดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 6 ขนาดเม็ดดินใหญ่สุด 5 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) และสัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_c) เท่ากับ 13 และ 0.2 ตามลำดับ ดินมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 [27] จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของดินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี XRF (X-Ray Fluorescence) พบว่าดินประกอบด้วย 3 ธาตุหลัก ได้แก่ ซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก มีปริมาณธาตุ 27.4 7.9 และ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังรายละเอียดในตารางที่ 1



รูปที่ 6 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สะสมผ่านตะแกรงกับขนาดเม็ดดิน

ตารางที่ 1 : ผลวิเคราะห์ดินด้วย XRF (X-Ray Fluorescence)

ลำดับ	สารประกอบ	ธาตุหลัก	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์)
1	SiO ₂	ซิลิกอน	27.4
2	Al ₂ O ₃	อะลูมิเนียม	7.9
3	Fe ₂ O ₃	เหล็ก	5.6
4	MgO	แมกนีเซียม	3.9

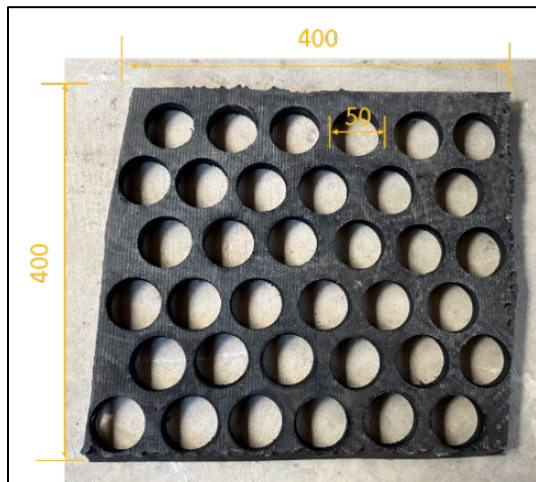
3.1.2) สายพาน ใช้วัสดุสายพานที่หมดอายุจากการใช้งาน ลำเลียงแร่ในเหมืองเป็นตัวเลือกในการทำการศึกษสำหรับการป้องกันการกัดเซาะหน้าดิน โดยออกแบบสายพานในรูปแบบตาข่ายรังผึ้งเป็นรูปแบบที่ป้องกันการกัดเซาะของดินได้ดี ซึ่งมีส่วนช่วยกระจายแรงและมีส่วนลดน้ำหนักแผ่นยางต่อพื้นที่ ขนาดแผ่นยางสายพานที่ใช้ในการทดลองความกว้าง 400 มิลลิเมตร ความยาว 400 มิลลิเมตร และความหนา 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 ความหนาแน่นเดิม 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และถูกลดความหนาแน่นลงเหลือ 0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยการเจาะรูใกล้เคียงกับกระถางต้นไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร การลดน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่จะทำให้ขนย้ายสะดวก ง่ายต่อการบริหารจัดการ และระบายน้ำได้ดีขึ้น ทำให้ดินไม่มีการเจริญเติบโตได้ดี

3.1.3) แผนการทดลอง การทดลองการกัดเซาะหน้าดินโดยใช้และไม่ใช้ยางสายพานในสภาวะฝนตกจะแบ่งออกเป็น 8 ตัวอย่างการทดลอง ภายใต้เงื่อนไขปริมาณน้ำฝน 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ที่ความลาดชันและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 2

3.2) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

โมเดลการทดลองประกอบด้วยกล่องทดลองที่สร้างด้วยแผ่นไม้ 4 ด้าน และแผ่นอะคริลิกที่มีลักษณะใสไว้สำหรับสังเกตการระหว่างการทดลอง กล่องทดลองมีขนาดกว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยมีช่องระบายน้ำด้านบนพร้อมต่อท่อความยาว 150 เซนติเมตร สำหรับเก็บตัวอย่างดินที่ได้จากการกัดเซาะของหน้าดิน ส่วนระบบฝนเทียมด้วยการติดตั้งสปริงเกอร์แบบฝอยมีระยะห่างของแต่ละตำแหน่งประมาณ 13 เซนติเมตร สูงจากดิน 250 เซนติเมตร ซึ่งมีมีมน้ำดีระบบควบคุมและปรับระดับปริมาณน้ำฝน 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตลอดระยะเวลาทำการทดลอง การทดสอบการกัดเซาะของหน้าดินด้วยการจำลองแบบเอียง (tilted bed slope) จากการปรับ

องศาความลาดชันของดินด้วยการใช้อุปกรณ์ระบบไฮดรอลิกเพิ่มตามระยะความสูง [28] ดังแสดงในรูปที่ 8

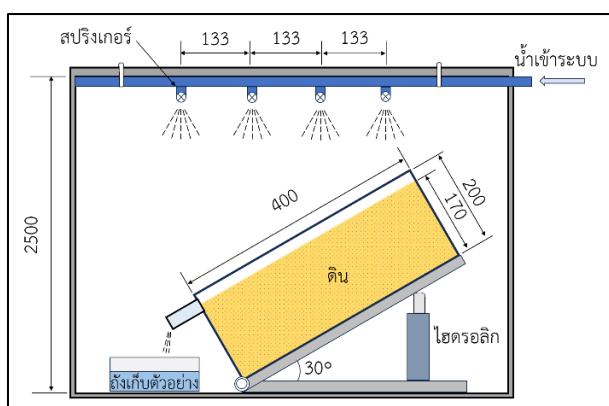


รูปที่ 7 : การออกแบบยางสายพานในรูปแบบตาข่ายรังผึ้ง (หน่วยมิลลิเมตร)

ตารางที่ 2 : แผนการทดลอง

การทดลอง	ความลาดชัน (องศา)	ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)	เงื่อนไข*
1	15	17	ใช่
2	15	17	ไม่ใช่
3	30	15	ใช่
4	30	15	ไม่ใช่
5	30	17	ใช่
6	30	17	ไม่ใช่
7	45	17	ใช่
8	45	17	ไม่ใช่

*หมายเหตุ: ใช่ หมายถึง ใช้ยางสายพานในการทดลอง และ ไม่ใช่ หมายถึง ไม่ใช้ยางสายพานในการทดลอง



รูปที่ 8 : เครื่องมือการทดลอง (หน่วยมิลลิเมตร)

3.3) วิธีทดลองและการเก็บข้อมูล

วิธีการทดลองเริ่มจากการเตรียมกล่องโมเดลที่ออกแบบมีช่องเปิดออกด้านบน ส่วนช่องว่างของแต่ละด้านถูกปิดด้วยซิลิโคนกันน้ำเพื่อป้องกันน้ำไหลออกจากกล่อง จากนั้นนำตัวอย่างดินและผสมน้ำให้เข้ากัน แล้วเทตัวอย่างดินที่ผสมเสร็จในกล่องทดลอง โดยแบ่งเป็นชั้นละ 5 เซนติเมตร แล้วทำการอัดให้ได้ความหนาแน่นตามที่กำหนดด้วยการควบคุมความหนาแน่นจากความสัมพันธ์มวลและปริมาตรด้วยการใช้สมการ (1) และ (2) [29] ทำการติดตั้งระบบไฮดรอลิกและปรับระยะขึ้นลงในแนวตั้งตามองศาความลาดชัน จากนั้นเปิดระบบฝนเทียมและทำการทดลองจนครบ 1 ชั่วโมง

ในส่วนของการเก็บข้อมูลดินที่ถูกกัดเซาะจะถูกเก็บไว้ในถังเพื่อรอการตกตะกอนดิน หลังจากนั้นทำการอบดินในตู้อบเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักดินที่ถูกกัดเซาะของแต่ละการทดลอง

$$D_d = \left(\frac{D_w}{w+100} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\%w = \left(\frac{M_w - M_d}{M_d} \right) \times 100 \quad (2)$$

คำอธิบายสมการ

D_d คือ ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

D_w คือ ความหนาแน่นเปียก (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

$\%w$ คือ ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

M_w คือ น้ำหนักมวลเปียก (กิโลกรัม)

M_d คือ น้ำหนักมวลแห้ง (กิโลกรัม)

3.4) การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลการกัดเซาะหน้าดินที่มีปริมาณน้ำฝน 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาฝนตก 1 ชั่วโมง การวิเคราะห์ข้อมูลจะทำการเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณการกัดเซาะต่อพื้นที่ฝนตกมีดังนี้

(1) เปรียบเทียบปริมาณการกัดเซาะจากการใช้กับไม่ใช้ยางสายพาน

(2) ความลาดชัน 15 30 และ 45 องศา ที่ส่งผลต่อปริมาณการกัดเซาะหน้าดิน

(3) ความหนาแน่นดินแห้ง 15 และ 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรต่อปริมาณการกัดเซาะหน้าดิน

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1) ปัจจัยวัสดุ

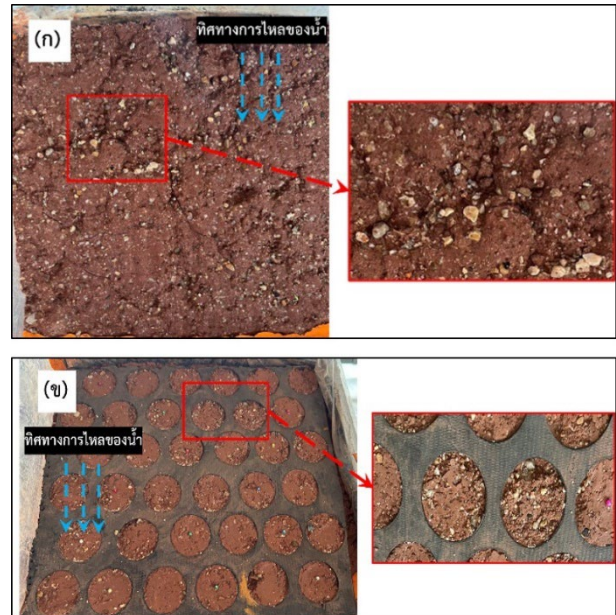
จากผลการทดลองพบว่าน้ำหนักดินถูกกัดเซาะแบบปล่อยให้ไปตามธรรมชาติกับใช้วัสดุยางสายพานปิดหน้าดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะผิวดินจากน้ำฝนส่งผลต่อปริมาณน้ำหนักดินถูกกัดเซาะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน อัตราส่วนน้ำหนักดินถูกกัดเซาะระหว่างไม่ใช้กับใช้ยางสายพานป้องกันอยู่ในช่วง 60 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความลาดชัน 15 ถึง 45 องศา โดยพบว่าที่ความลาดชันน้อยการใช้ยางสายพานจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันได้ดีกว่าไม่ใช้ยางสายพานแต่อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วนน้ำหนักดินที่ถูกกัดเซาะจะเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความลาดชันมากกว่า 45 องศาจะมีแนวโน้มแบบใช้ยางสายพานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับไม่ใช้ยางสายพานดังรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : อัตราส่วนน้ำหนักดินถูกกัดเซาะแบบไม่ใช้ยางสายพานกับใช้ยางสายพาน

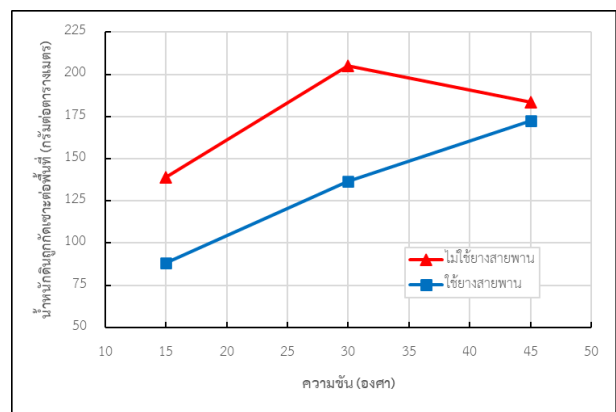
ความลาดชัน (องศา)	น้ำหนักดินถูกกัดเซาะ (กรัมต่อตารางเมตร)		อัตราส่วนไม่ใช้ต่อ ใช้ยางสายพาน (เปอร์เซ็นต์)
	ไม่ใช้	ใช้	
15	139	88	60
30	205	136	50
45	183	173	10

หมายเหตุ: ความหนาแน่นดินแห้ง 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 9 (ก) เป็นการทดสอบตัวอย่างที่ 5 ของการกัดเซาะแบบไม่ใช้ยางสายพานที่ความลาดชัน 30 องศา เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าผิวดินมีการกัดเซาะเป็นร่องลึก จะเห็นได้ชัดเจนในส่วนบนของแบบจำลอง ในส่วนของ รูปที่ 9 (ข) เป็นการทดสอบตัวอย่างที่ 6 ของการใช้ยางสายพานป้องกันการกัดเซาะ พบว่าสภาพของการกัดเซาะมีร่องที่ตื้นกว่าแบบไม่ใช้ยางสายพาน และในส่วนบนของวงกลมเกิดการกัดเซาะที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนล่างของวงกลม แบบจำลองทั้งสองมีลักษณะการกัดเซาะเหมือนกันเริ่มจากอนุภาคเม็ดดินจะเริ่มหลุดแล้วไหลไปตามกระแสน้ำจากที่สูงไปที่ต่ำ แต่เนื่องด้วยแผ่นยางช่วยลดแรงต้านของน้ำ ทำให้การกัดเซาะจะน้อยกว่าไม่ได้ใช้แผ่นยางป้องกัน



รูปที่ 9 : สภาพผิวดินถูกกัดเซาะ (ก) ไม่ใช้ยางสายพาน (ข) ใช้ยางสายพาน



รูปที่ 10 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณดินถูกกัดเซาะกับความลาดชันที่ไม่ใช้ยางสายพานและใช้ยางสายพาน

4.2) ปัจจัยความลาดชันหน้าดิน

รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณน้ำหนักดินที่ถูกกัดเซาะกับความลาดชันหน้าดินแบบไม่ใช้และใช้ยางสายพานพบว่าที่ระดับความลาดชันที่น้อยจะมีปริมาณการกัดเซาะของหน้าดินน้อยกว่าที่ระดับความลาดชันมากและปริมาณการกัดเซาะของหน้าดินจะเพิ่มขึ้นตามความลาดชันที่เพิ่มขึ้นทั้งไม่ใช้และใช้ยางสายพาน

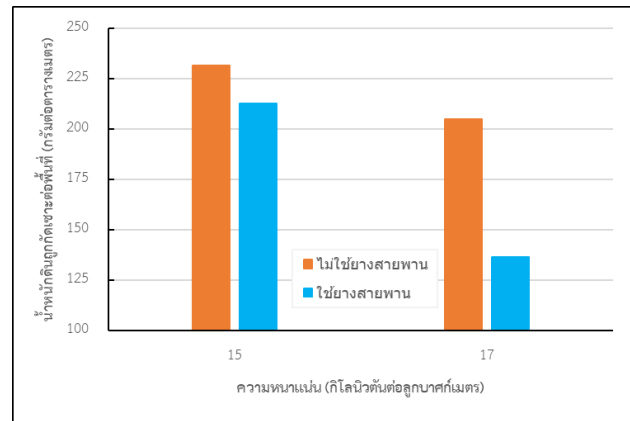
ปริมาณน้ำหนักดินถูกกัดเซาะแบบไม่ใช้และใช้ยางสายพานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะคงที่เมื่อความลาดชันน้อยกว่า 30 องศาแต่อย่างไรก็ตามเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นเลยจากมุมเสียดทานภายในของดินจะเห็นได้ว่าที่ ความลาดชัน 45 องศา การกัด

เซาะของดินระหว่างไม่ใช้กับใช้ยางสายพานป้องกันมีผลลัพธ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าการใช้ยางสายพานป้องกันการกัดเซาะหน้าดินจะมีประสิทธิภาพได้ดีเมื่อระดับความลาดชันน้อยกว่า 45 องศา อัตราการการกัดเซาะจากปัจจัยความลาดชันสามารถอธิบายได้จากการตกกระทบของน้ำฝนกับอนุภาคเม็ดดิน ที่ระดับความลาดชันน้อยการเคลื่อนตัวของอนุภาคเม็ดดินจะถูกจำกัดด้วยอนุภาคข้างเคียง ส่วนแรงดันน้ำที่เคลือบบนผิวอนุภาคดินจะมีค่าน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเม็ดดิน จึงทำให้มีแนวโน้มที่น้ำมีโอกาสซึมลงในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้และลงไปตามชั้นดินแบบช้า ๆ ส่งผลให้ปริมาณการกัดเซาะจะน้อยกว่า แต่หากเพิ่มความลาดชันจนถึงจุดวิกฤต อนุภาคเม็ดดินจะสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและถูกแทนที่ด้วยแรงดันจากน้ำอนุภาคดินนี้จะถูกกัดเซาะออกไป ส่วนอนุภาคชั้นลึกลงมาเริ่มกระบวนการการกัดเซาะใหม่ [30]

4.3) ปัจจัยความหนาแน่นของดิน

จากผลการทดลองการกัดเซาะดินที่ความลาดเท่ากับ 30 องศา มีปริมาณน้ำหน้าดินถูกกัดเซาะต่อพื้นที่ค่อนข้างสูงและใช้เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบความหนาแน่นของดินกับปริมาณดินถูกกัดเซาะดังแสดงในรูปที่ 11 ความลาดชันหน้าดิน 30 องศา ความหนาแน่น 15 กับ 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ของการทดลองแบบไม่ใช้กับใช้สายพาน พบว่าปัจจัยความหนาแน่นดินจะส่งผลต่อปริมาณน้ำหน้าดินถูกกัดเซาะด้วยน้ำฝนอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยภาพรวมจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณน้ำหน้าดินถูกกัดเซาะน้อยลง ความหนาแน่นดินที่ 15 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร แบบธรรมชาติจะมีการกัดเซาะหน้าดินสูงกว่าแบบใช้สายพาน แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นเป็น 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จะพบว่าไม่ใช้และใช้สายพานมีการเปลี่ยนแปลงการกัดเซาะลดลงจากเดิมอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การเพิ่มความหนาแน่นของดินจะเป็นการลดช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินลง ส่งผลให้ช่องว่างนี้ถูกแทนที่ด้วยอนุภาคเม็ดดิน ดังนั้นความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอัตราการซึมและการแทนที่ของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะมีโอกาสน้อยลงจึงส่งผลให้การกัดเซาะดินน้อยลงตาม ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลองจากการเพิ่มความหนาแน่น 15 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ดินถูกกัดเซาะน้อยลง



รูปที่ 11 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณดินถูกกัดเซาะกับความหนาแน่นที่ใช้ในการทดสอบ

5) สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการใช้แผ่นยางรีไซเคิลที่ผ่านการใช้งานในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งไม่มีมูลค่าและใช้ประโยชน์ในกระบวนการอื่น ๆ จึงได้มีการจำลองการทดลองใช้งานแทนวัสดุสังเคราะห์งานดินให้เสมือนกับสภาพกับการใช้งานจริงในป้องกันการกัดเซาะหน้าดินด้วยเงื่อนไขฝนตกระดับสูงสุด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การกัดเซาะหน้าดินภายใต้สภาวะฝนตกหนักมากพบว่าการประยุกต์ใช้ยางสายพานมาใช้งานจะช่วยลดปริมาณดินถูกกัดเซาะได้ดี ส่งผลให้ลดการกัดเซาะได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยลักษณะร่องของการกัดเซาะจะตื้นกว่าไม่ใช้ยางสายพาน แผ่นยางมีส่วนช่วยลดความเร็วของน้ำ

ส่วนปัจจัยความลาดชันของหน้าดินมีส่วนให้เกิดการกัดเซาะที่แตกต่างกัน โดยระดับความลาดชันที่น้อยจะส่งผลต่อการกัดเซาะที่น้อยกว่าความลาดชันที่มาก มุมของการกระทบของน้ำฝนและอนุภาคเม็ดดินมีส่วนช่วยให้อนุภาคดินเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวและเกิดการกัดเซาะ ที่ความลาดชันต่ำน้ำมีโอกาสซึมเข้าไปในอนุภาคดินจากชั้นบนลงชั้นล่างแบบช้า ๆ จึงส่งผลให้การกัดเซาะดินน้อย แต่ถ้าความลาดชันเพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤตจะส่งผลให้น้ำมีการซึมลงไปในช่องว่างของอนุภาคเม็ดดินจากชั้นบนลงชั้นล่างได้น้อยลง เมื่ออนุภาคดินชั้นบนถูกการกัดเซาะ ชั้นดินถัดไปก็เกิดกระบวนการเริ่มต้นใหม่ในการซึมของน้ำเข้าไปในอนุภาคเม็ดดินจากการทดลองพบว่าความลาดชันที่ระดับ 45 องศาจะเป็นช่วงจำกัดของประสิทธิภาพการป้องกันของยางสายพาน

ความหนาแน่นดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการกัดเซาะจากการลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้น้ำฝนมีโอกาสซึมเข้าไปใน

เนื้อดินน้อยลง ซึ่งดินที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการกัดเซาะหน้าดินน้อยลง การเพิ่มความหนาแน่นดิน 13 เปอร์เซ็นต์จาก 15 เป็น 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ส่งผลให้ปริมาณดินถูกกัดเซาะลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้ามีการใช้ยางสายพานร่วมจะสามารถลดการกัดเซาะหน้าดินได้ถึง 35 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการการใช้ยางสายพานสามารถป้องกันการกัดเซาะดินจากน้ำฝนได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่กองทิ้งดิน คันดิน และผนังบ่อเหมืองได้ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือและสถานที่ห้องปฏิบัติการทดลองงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

REFERENCES

- [1] F. Zhao and Y. Yin, "Research on the stability of the geocell protected bank slope under rainfall," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1168, 2019, Art. no. 022052.
- [2] S. Bahddou, W. Otten, W. R. Whalley, H.-C. Shin, M. El Gharous, and R. J. Rickson, "Changes in soil surface properties under simulated rainfall and the effect of surface roughness on runoff, infiltration and soil loss," *Geoderma*, vol. 431, Mar. 2023, Art. no. 116341.
- [3] A. A. Dofee and F. Goshu, "Soil erosion impacts on crop productivity and its implications on food security in Kechabira District, Southern Ethiopia," *Agricultural Biol. Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 1–11, 2024, doi:10.21203/rs.3.rs-3588343/v1.
- [4] W. Hou, J. Gao, and S. Wu, "Quantitative analysis of the influencing factors and their interactions in runoff generation in a karst basin of southwestern China," *Water*, vol. 12, no. 10, Oct. 2020, Art. no. 2898.
- [5] EGAT, "Mae Moh EGAT Telemetry System: Rainfall Data," (in Thai), 2024. [Online]. Available: <https://watertele.egat.co.th/maemoh/>
- [6] Upper Northern Region Irrigation Hydrology Center. "Rainfall intensity of upper northern region river basin." (in Thai), HYDRO-1.net. <https://www.hydro-1.net> (accessed May 16, 2024).
- [7] Ang Thong Provincial Agriculture and Cooperatives Office. "Rainfall intensity classification." (in Thai), OPSMOAC.go.th. https://www.opsmoac.go.th/angthong-local_wisdom-prev-iew-441591791908 (accessed May 16, 2024).
- [8] Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation. "Rainfall frequency analysis." (in Thai), ROYALRAIN.go.th. <https://www.royalrain.go.th/royalrain/ShowDetail.aspx?DetailId=10384> (accessed May 10, 2024).
- [9] Department of International Trade Promotion. "Rubber." (in Thai), DITP.go.th. <https://www.ditp.go.th> (accessed Jun. 14, 2024).
- [10] G. Song *et al.*, "The use of geocell as soil stabilization and soil erosion countermeasures," *Geomatics, Natural Hazards Risk*, vol. 12, no. 1, pp. 2155–2169, 2021.
- [11] N. A. Bhanghe and T. K. Rao, "Slope stability analysis of geocell supported embankment," *Int. J. Civil Eng. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 1049–1057, Apr. 2018.
- [12] G. Y. Wang, J. P. Zhang, and J. W. Zhao, "Numerical analysis of geocell protective slope stability," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 353, pp. 635–639, 2013.
- [13] I. Mehdipour, M. Ghazavi, and R. Ziaie Moayed, "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect," *Geotextiles Geomembranes*, vol. 37, pp. 23–34, Apr. 2013.
- [14] Z. Arbanas *et al.*, "Impact of gravity retaining wall on the stability of a sandy slope in small-scale physical model," in *Proc. 5th Regional Symp. Landslides in Adriatic-Balkan Region*, Mar. 2022, pp. 193–200.
- [15] W. Tan, Q. Huang, and X. Chen, "Physical model test on the interface of loess fill slope," *Land*, vol. 11, no. 8, Aug. 2022, Art. no. 1372.
- [16] P. Panagos *et al.*, "Understanding the cost of soil erosion: An assessment of the sediment removal costs from the reservoirs of the European Union," *J. Cleaner Prod.*, vol. 434, Jan. 2024, Art. no. 140183.
- [17] S. G. Thallak, S. Saride, and S. K. Dash, "Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds," *Geotech. Geolog. Eng.*, vol. 25, pp. 509–524, May 2007.
- [18] Keymay. "Geocell." KEYMAY.com. <https://www.keymay.com/geocell-1> (accessed May 16, 2024).
- [19] Greeninspired. "Enviro Grid™ (Soil stabilization system-Geocell)." (in Thai), GREENINSPIRED.co.th. <https://www.greeninspired.co.th/products/geocell> (accessed May 16, 2024).



- [20] KSB. "Geocell." (in Thai), KSBPRODUCT.co.th. <https://www.ksbproduct.co.th> (accessed May 16, 2024).
- [21] A. Verma, S. Suman, and S. K. Sharma, "Use of geocells for controlling soil erosion at slopes and its comparison with other methods of slope protection," in *Proc. All India Seminar Adv. Eng. and Technol. Sustain. Develop.*, Pantnagar, India, Jun. 2015, pp. 411–416.
- [22] Z. Zhang, L. Qin, G. Ye, W. Wang, and J. Zhang, "Physical modeling and intelligent prediction for instability of high backfill slope moisturized under the influence of rainfall disasters," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 7, Mar. 2023, Art. no. 4218.
- [23] A. Vijay and A. R. Sudha, "Effect of use of geocell and rice straw in slope stability," *Int. J. Adv. Res. Sci., Commun. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 242–250, Jul. 2022, doi: 10.48175/IJARSCT-5674.
- [24] X. Song *et al.*, "Erosion control treatment using geocell and wheat straw for slope protection," *Adv. Civil Eng.*, vol. 2021, no. 1, Apr. 2021, Art. no. 553221.
- [25] D.-y. Wang, J.-l. Hu, J. Wang, and Q.-j. Zun, "Experimental study on anti-eroding effect of slope protected by degradable geocell," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 634, no. 1, 2021, Art. no. 012026.
- [26] M. D. Ricks, W. T. Wilson, W. C. Zech, X. Fang, and W. N. Donald, "Evaluation of hydromulches as an erosion control measure using laboratory-scale experiments," *Water*, vol. 12, no. 2, Feb. 2020, Art. no. 515.
- [27] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM D854-14, May 2014. [Online]. Available: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/astm/2d902b8f-b0e5-48db-96e0-2d14f9e355bf/astm-d854-14?rsrltid=AfmBOopaFZ5nl-QGjDGCdyGJrZAkmHU1LU1t_PZHYHdfRnm99NQ7cT7y
- [28] *Standard Test Method for Determination of Erosion Control Products (ECP) Performance in Protecting Slopes from Sequential Rainfall-Induced Erosion Using a Tilted Bed Slope*, ASTM D8297/D8297M-22, Nov 2023. [Online]. Available: https://store.astm.org/d8297_d8297m-22.html
- [29] *Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop*, T 99-21, 2018. [Online]. Available: <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/m46-01/t99.pdf>
- [30] G. Larionov *et al.*, "Effect of impact angle on the erosion rate of coherent granular soil, with a chernozemic soil as an example," *Eurasian Soil Sci.*, vol. 51, pp. 251–254, 2018.

การเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่น ที่ใช้แผ่นออริฟิซสำหรับอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชั่น

นพรัตน์ อมัตริรัตน์¹ ธนกฤต นนท์ชนะ^{2*} อธิธิพล วรพันธ์³ ประชาสันติ ไตรยสุทธิ⁴ กุลเชษฐ์ เพียรทอง⁵

^{1,3}คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา, ประเทศไทย

²คณะบริหารงานและการขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา, ประเทศไทย

^{4,5}คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : thanakrit.no@rmu.ac.th

รับต้นฉบับ : 25 กรกฎาคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 21 ตุลาคม 2567; ตอรับบทความ : 9 พฤศจิกายน 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่นชนิดใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชั่น โดยใช้ น้ำผิวดินที่มีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำเริ่มต้นต่ำเพียง 1.5 ppm ซึ่งไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบแผ่นออริฟิซ 6 แบบที่มีรูปแบบแตกต่างกันเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชั่น ตัวแปรในการศึกษาได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูบนของแผ่นออริฟิซ (2 และ 4 มิลลิเมตร) จำนวนรูที่เจาะบนแผ่นออริฟิซ (3 4 และ 5 รู) และระยะเวลาในการบำบัดช่วง 5 ถึง 90 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 นาที จากผลการทดลองพบว่าปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่น ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแผ่นออริฟิซทุกแผ่นที่ทำการศึกษา สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้เกินกว่า 5 ppm ซึ่งเป็นระดับที่เพียงพอสำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ที่ระยะเวลาบำบัด 10 นาที โดยพบว่าแผ่นออริฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้เร็วและสูงที่สุด กล่าวคือสามารถเพิ่มจาก 1.5 ppm เป็น 9.5 ppm ที่ระยะเวลาบำบัด 5 นาที และสูงสุด 11.5 ppm ที่ระยะเวลาดำเนินการ 25 นาที กล่าวคือปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจะเพิ่มขึ้นในช่วง 30 นาทีแรกของการทดลอง จากนั้นมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบแผ่นออริฟิซสามารถนำมาใช้เพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่นแบบแผ่นออริฟิซเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ควรมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำและระยะเวลาที่น้ำอยู่ในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำ เพื่อให้ได้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่เพียงพอ

คำสำคัญ : ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชั่น แผ่นออริฟิซ

Increasing Dissolved Oxygen in Water Using an Orifice Cavitation-induced Hydrodynamics Cavitation Reactor

Nopparat Amattirat¹ Thanakrit Nonchana^{2*} Ittiphon Woraphun³ Prachasanti Triyasuit⁴
Kulachate Pianthong⁵

^{1,3}Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

^{2*}Faculty of Railway Systems and Transportation, Rajamangala University of Technology Isan,
Nakhon Ratchasima, Thailand

^{4,5}Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: thanakrit.no@rmuti.ac.th

Received: 25 July 2024; Revised: 21 October 2024; Accepted: 9 November 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

This study examines dissolved oxygen enhancement in water using a hydrodynamic cavitation reactor equipped with an orifice plate. The orifice plate is used as a device to induce cavitation. The study uses surface water with an initial dissolved oxygen level of 1.5 ppm, which is insufficient to support aquatic life. The study compares six different types of orifice plates with varying designs to induce cavitation. The variables considered include the diameter of the holes on the orifice plates 2 millimeters and 4 millimeters, the number of holes 3, 4, and 5 holes, and the treatment duration ranging from 5 to 90 minutes; samples were taken every 5 minutes. The experimental results showed that the hydrodynamic cavitation phenomenon induced by all studied orifice plates could increase the dissolved oxygen level to more than 5 ppm, which is sufficient for aquatic life, within a treatment duration of 10 minutes. It was found that the orifice plate with a 4-millimeter hole diameter and 4 holes increased the dissolved oxygen level the fastest and to the highest level, raising it from 1.5 ppm to 9.5 ppm in 5 minutes and reaching a maximum of 11.5 ppm in 25 minutes. The dissolved oxygen level increased during the first 30 minutes of the experiment, then tended to decrease due to the rising water temperature. In conclusion, controlling water temperature and residence time is crucial for effective DO enhancement using an orifice plate hydrodynamic cavitation reactor. Temperature influences the solubility of oxygen in water, and prolonged residence times beyond an optimal point may lead to decreased DO due to temperature rise.

Keywords: Dissolved oxygen (DO), Hydrodynamics cavitation, Orifice plate

1) บทนำ

ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ โดยทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำ ที่มีอิทธิพลในหลาย ๆ แง่มุม เช่น ความเหมาะสมในการอยู่อาศัยของสัตว์น้ำ ความหลากหลายทางชีวภาพ การหมุนเวียนสารอาหาร และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [1] โดยมีการศึกษาที่ใช้ระดับปริมาณ DO เป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินผลกระทบของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและชุมชนต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ นอกจากนี้ DO ยังมีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำธรรมชาติ และในแง่การเป็นดัชนีบ่งชี้ความสมบูรณ์ของระบบนิเวศ โดยระดับของ DO ส่งผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและคุณภาพน้ำโดยรวม นอกจากนี้ DO ยังทำหน้าที่เป็นเครื่องมือวัดสุขภาพแม่น้ำ ซึ่งแสดงถึงบทบาทในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตและพืชน้ำ [2]–[4] ทั้งนี้ความพร้อมใช้งานของออกซิเจนที่ละลายในน้ำนั้น มีบทบาทอย่างมากในการทำงานที่เหมาะสมของระบบนิเวศทางน้ำ โดยความสมดุลของปริมาณออกซิเจน มีอิทธิพลต่อการผลิตขั้นต้นและพลวัตรการหายใจ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพน้ำโดยรวม [5] ความสำคัญของ DO นั้นยังครอบคลุมไปถึงการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ การสืบพันธุ์ของปลา รวมทั้งการเจริญเติบโตและสุขภาพของระบบนิเวศโดยรวม [6] ได้มีการศึกษาการนำเอาปริมาณ DO มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองโดยใช้ machine learning เพื่อใช้ในการพยากรณ์ และจัดการคุณภาพน้ำรวมถึงใช้ในการจัดการสภาพแวดล้อมทางน้ำ [5] นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ DO กับอุณหภูมิของน้ำแล้ว การย่อยเศษซากอินทรีย์ก็ส่งผลกระทบต่อระดับ DO ด้วย จึงเป็นการตอกย้ำถึงพลวัตที่ซับซ้อนของออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำ [7] นอกจากนี้ระดับ DO ถูกนำมาใช้ในการประเมินและควบคุมสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมถึงระดับสุขภาพน้ำจืดในแม่น้ำ ทะเลสาบ และลำธาร [8] โดยสรุปแล้วออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวแปรพื้นฐานในการประเมินคุณภาพน้ำ โดยระดับของออกซิเจนทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้หลัก ของสุขภาพของระบบนิเวศ และการบอกประสิทธิภาพทำงานของสภาพแวดล้อมทางน้ำ ดังนั้นการทำความเข้าใจและการตรวจวัดความเข้มข้นของ DO จึงจำเป็นอย่างยิ่งต่อการรักษาความหลากหลายทางชีวภาพ การหมุนเวียนสารอาหาร รวมทั้งคุณภาพน้ำโดยรวมในระบบน้ำจืด โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิของแหล่งน้ำที่สูงขึ้นจะทำให้ ออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยลง โดยปกติจะมีปริมาณ DO ประมาณ 5–7 ppm และน้ำที่มีคุณภาพดี

จะมีปริมาณ DO ประมาณ 5–8 ppm ในขณะที่น้ำเสียจะมีปริมาณ DO ต่ำกว่า 3 ppm [9]

คาวิเตชัน (cavitation) คือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (liquid) ไปเป็นไอ (vapor) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal) โดยการลดความดันลงจนต่ำกว่าความดันไอ (vapor pressure) โดยเฉพาะผ่านอุปกรณ์ที่ลดหน้าตัดการไหลลง เช่น แผ่นออริฟิซ (orifice plate) และหลอดเวนจูรี (venturi tube) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำจึงมีการศึกษานำมาใช้ในงานด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะประยุกต์นำเอาไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชัน (Hydrodynamics Cavitation: HC) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย [10] โดยเทคโนโลยี HC ถูกนำเอาไปใช้ในงานหลาย ๆ ประเภท เช่น การเพิ่มการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย การทำให้ไขมันบริสุทธิ์โดยการฆ่าเชื้อ การแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ของน้ำมัน และช่วยเร่งการสังเคราะห์ไบโอดีเซล HC ยังถูกศึกษาเพื่อนำมาปรับปรุงผลิตก๊าซชีวภาพ (biogas) โดยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายกากตะกอนของเสียและน้ำเสียจากโรงกลั่น [11] นอกจากนี้ยังถูกใช้เพื่อบำบัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อทำงานร่วมกับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advance oxidation) [12] จากหลาย ๆ งานวิจัยพบว่า HC เป็นเทคโนโลยีที่สามารถลดระดับความเน่าเสีย และช่วยลดระดับความเป็นพิษของน้ำเสียได้ [13]–[16] มากกว่าการปล่อยให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันตามธรรมชาติ [17] นอกจากนี้ HC ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งจากครัวเรือนซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย [15] การใช้เทคนิค HC ร่วมกับเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง ได้รับการยอมรับว่าเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำเสีย และมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น [18] นอกจากนี้ยังพบว่า HC ยังถูกนำมาใช้ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำ และในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13] ในทางกายภาพคาวิเตชันจะสามารถสร้างไมเซลล์ที่มีความหนืดสูง (highly viscoelastic micelles) ที่จะสามารถยับยั้งเชื้อโรคในน้ำเสียได้ [19]

โดยสรุปแล้ว HC มีการศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้หลากหลาย และมีแนวโน้มการนำไปใช้บำบัดน้ำเสีย เช่น การย่อยสลายมลพิษ การเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพความสามารถในการฆ่าเชื้อโรค และเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายผงซักฟอก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษานำเอาเทคนิค HC ที่เหนี่ยวนำปรากฏการณ์คาวิเตชันจากแผ่นออริฟิซ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของแผ่นออริฟิซ

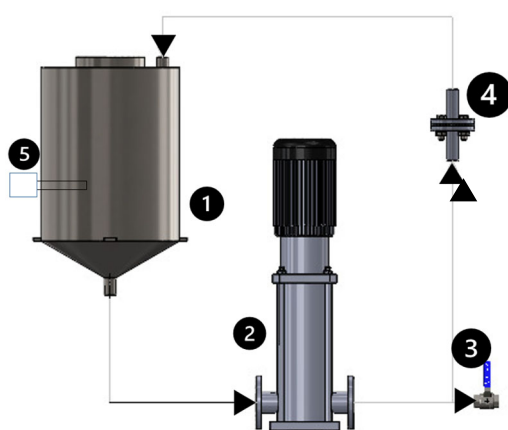
ระยะเวลาในการบำบัด และผลของอุณหภูมิของน้ำต่อปริมาณของปริมาณ DO

2) อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

2.1) ชุดทดลองถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชันที่ใช้แผ่นออริฟิซเหนี่ยวนำควิเตชัน

ชุดทดลองถึงปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 โดยชุดทดลองประกอบด้วยปั๊มไฮดรอลิกแรงดันสูง (multistage centrifugal pump) (หมายเลข 2) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับเพิ่มแรงดันให้กับของเหลวก่อนเข้าถึงปฏิกรณ์ โดยปั๊มที่ใช้เป็นแบบ vertical multistage pump รุ่น MV - 8 มีแรงดันใช้งานสูงสุด 0.8 MPa ใช้ดูดน้ำจากถังพักที่ทำจากสแตนเลส SUS304 ขนาด 50 ลิตร (หมายเลข 1) ซึ่งทำหน้าที่ในการพักน้ำก่อนเข้าปั๊ม และรองรับน้ำที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์ภายในถังพักมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล type K สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำ (หมายเลข 5) และมีจุดสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำออกมาวัดปริมาณ DO

น้ำจากถังพักจะถูกปั๊มดูดและส่งไปยังถังปฏิกรณ์ HC ชนิดแผ่นออริฟิซ (หมายเลข 4) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเตชัน โดยประกอบด้วยส่วนที่เป็นท่อที่ติดตั้งแผ่นออริฟิซและด้านท้ายของถังปฏิกรณ์มีวาล์วสำหรับควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าสู่ถังพัก ดังแผนผังอุปกรณ์และทิศทางการไหลของน้ำของเครื่อง HC ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 : ผังการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ HC แบบใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชัน

สำหรับแผ่นออริฟิซที่ใช้ในการศึกษานี้มีจำนวนทั้งหมด 6 แบบ โดยแต่ละแบบมีอัตราส่วนของความยาวรวมเส้นรอบวงของรูเจาะ

บนแผ่นออริฟิซ ต่อพื้นที่การไหลรวมของรูเจาะ (α) อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดรวมของรูเจาะต่อพื้นที่การไหลของท่อ (β) และเลขควิเตชัน (K) เนื่องจากขนาดและจำนวนรูของแผ่นออริฟิซจะส่งผลโดยตรงต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งความเร็วในการไหล และความดันของของไหล โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแผ่นทำจากโลหะแผ่นวัสดุ SS400 ความหนา 3 มิลลิเมตร โดยขนาดและการวางตำแหน่งของแผ่นขอบคมดังรูปที่ 2 ในส่วนแผ่นออริฟิซจะถูกติดตั้งเข้าระหว่างหน้าแปลนขนาด DN25 – 10K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด 30 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของวงรูเจาะเท่ากับ 20 มิลลิเมตร โดยลักษณะการวางตำแหน่งของรูเจาะบนแผ่นออริฟิซ แบบ 3 รู แบบ 4 รู และแบบ 5 รู ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) รูปที่ 2 (ข) และรูปที่ 2 (ค) ตามลำดับ โดยแผ่นขอบคมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ใช้ตำแหน่งของรูเจาะเดียวกัน

ทั้งนี้ตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการศึกษาการเกิดควิเตชันคือ เลขควิเตชัน (Cavitation number, K) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 [20] และผลของการคำนวณเลขควิเตชัน ของแผ่นขอบคมต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

$$K = \frac{P_u - P_d}{P_d - P_v} \quad (1)$$

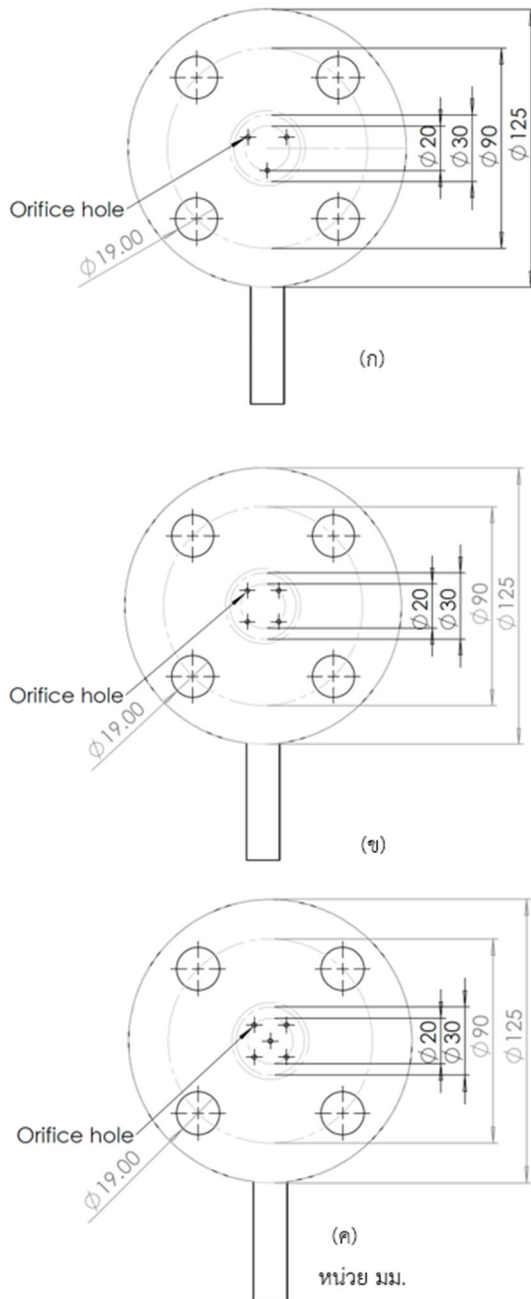
โดยที่ คือ K เลขควิเตชันนัมเบอร์ เป็นตัวแปรไร้มิติ, P_u คือความดันทางเข้าแผ่นของคม (Pa), P_d คือความดันทางออกจากแผ่นของคม และ P_v คือความดันไอของน้ำ

ตารางที่ 1 : ขนาดของแผ่นออริฟิซที่ใช้ในการทดลอง และผลการคำนวณเลขควิเตชัน

แบบแผ่นออริฟิซ	เส้นผ่านศูนย์กลางรู (มม.)	จำนวนรู (รู)	α (ม.ล.)	β	เลขควิเตชัน (K)
OR01	2	3	0.708	0.017	6.4
OR02	2	4	0.943	0.023	6.2
OR03	2	5	1.179	0.028	6.0
OR04	4	3	1.415	0.068	4.8
OR05	4	4	1.887	0.090	4.1
OR06	4	5	2.359	0.113	3.5

จากตารางที่ 1 รูปแบบของแผ่นออริฟิซจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่กลุ่มของแผ่นออริฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 2 มิลลิเมตร (OR01, OR02, OR3) และกลุ่มของแผ่น

ออร์ฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 4 มิลลิเมตร (OR04, OR05, OR6)



รูปที่ 2 รูปแบบการวางตำแหน่งของรูเจาะบนแผ่นออร์ฟิซแบบ 3 รู (ก) แบบ 4 รู (ข) และแบบ 5 รู (ค)

2.2) น้ำผิวดินที่ใช้ในการทดลอง

น้ำที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นน้ำจากแหล่งน้ำผิวดิน ที่รองรับน้ำทิ้งจากโรงอาหารอาหารกลางภายใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา โดยน้ำดังกล่าวมีปริมาณ DO เริ่มต้นเท่ากับ 1.5 ppm อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 23 °C

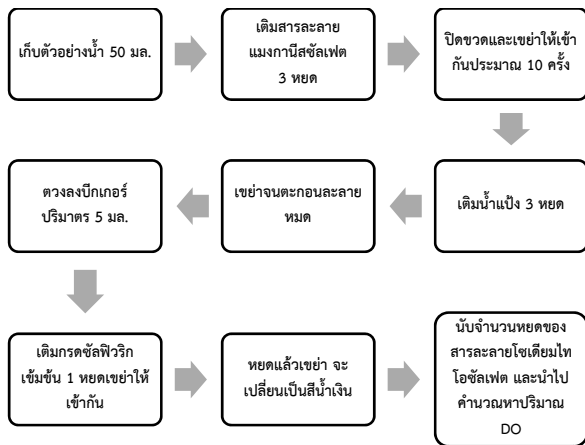
2.3) สารเคมีในการทดสอบปริมาณ DO

การตรวจวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณ DO (โซเดียมไทโอซัลเฟต, กรดซัลฟิวริก) ใช้ชุดทดสอบ สำเร็จรูปของ บริษัท แอ็ดวานซ์ ฟาร์มา จำกัด

2.4) ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

2.4.1) การทดลองเพิ่มปริมาณ DO เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ HC ดังนั้นในขั้นตอนการทดลองจะเริ่มโดยการนำน้ำเสียจำนวน 30 ลิตรที่เก็บจากแหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นำมาพักไว้ที่อุณหภูมิ 23 °C จากนั้นเติมลงในถังพักน้ำ จากนั้นติดตั้งแผ่นออร์ฟิซที่ต้องการศึกษา และเดินปั๊มเพื่อให้น้ำไหลผ่านถังปฏิกรณ์ HC เมื่อน้ำไหลผ่านแผ่นออร์ฟิซจะเกิดควิเตชั่น และเมื่อไหลออกจากบริเวณความดันต่ำ ฟองอากาศทั้งหมดจะควบแน่นกลับเป็นของเหลว จากนั้นน้ำจะหมุนเวียนกลับมาถึงถังพักอีกครั้ง โดยไม่มีการให้ความร้อนหรือควบคุมอุณหภูมิ เมื่อครบระยะเวลาทุก ๆ 5 นาที จะมีการวัดอุณหภูมิและเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวัดปริมาณ DO จนกระทั่งครบ 90 นาที

2.4.2) การวิเคราะห์ปริมาณค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำโดยใช้ชุดทดสอบ ในการวิเคราะห์ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการไทเทรตแบบนับหยด ทั้งนี้เป็นวิธีที่สะดวกและนิยมใช้ในการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ เริ่มจากนำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดที่เก็บได้ในขวด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดจุกขวดเพื่อเติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 3 หยด ตามด้วยสารละลายอัลคาไลน์-ไอโอดีน-แอไซด์ (Alkaline-iodide-azide reagent) 3 หยด แล้วปิดขวดน้ำตัวอย่างให้สารละลายเข้ากันโดยการเขย่าประมาณ 10 ครั้ง (จะมีตะกอนเกิดขึ้น) หลังจากนั้นเติมน้ำแอมโมเนีย 3 หยด แล้วผสมสารละลายให้เข้ากันโดยการเขย่าขวดจนกระทั่งตะกอนละลายจนหมด จากนั้นเทสารละลายจากขวดน้ำตัวอย่างลงในบีกเกอร์ จนกระทั่งได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกแบบเข้มข้น 1 หยดลงในบีกเกอร์ เขย่าให้เข้ากัน (สารละลายจะเป็นสีน้ำเงินเข้ม) เติมสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตลงในบีกเกอร์ทีละหยด แล้วเขย่าให้เข้ากัน จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มเป็นไม่มีสี จากนั้นนับจำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยสามารถคำนวณค่า DO ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2 ผังกระบวนการไทเทรตแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : แผนภาพขั้นตอนการไทเทรตเพื่อหาปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ

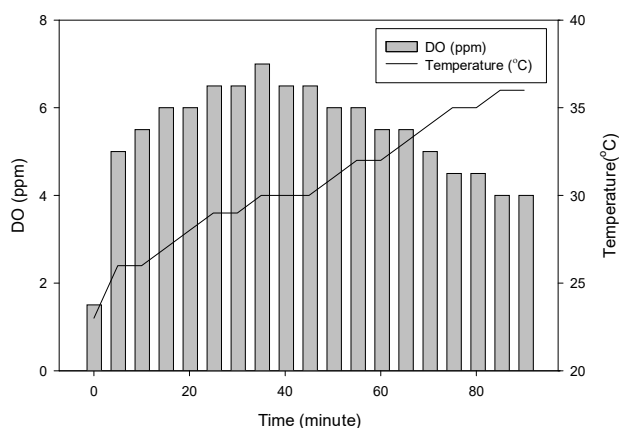
$$DO = 0.5N \quad (2)$$

โดยที่ DO คือ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (ppm) และ N คือจำนวนหยดของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

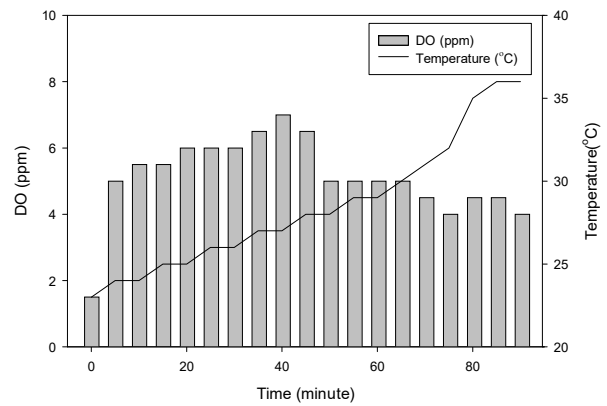
3) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1) ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัด

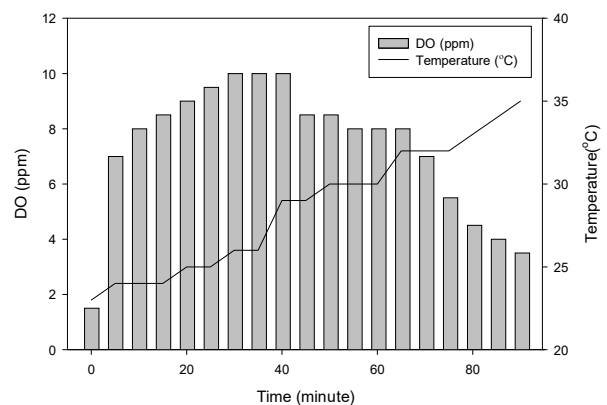
จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำผลการวิเคราะห์หาปริมาณ DO และผลการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมาพล็อตกราฟเทียบกับระยะเวลาในการบำบัดในช่วงระยะเวลา 0–90 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 นาที ของแผ่นออริฟิซแบบ OR01, OR02, OR03, OR04, OR05 และ OR06 ดังรูปที่ 4–9 ตามลำดับ



รูปที่ 4 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซแบบ OR01 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



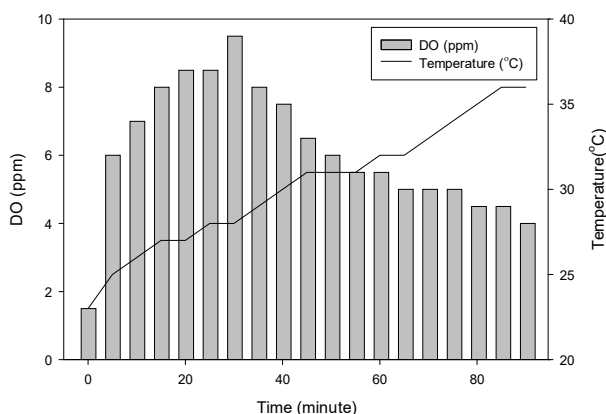
รูปที่ 5 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซแบบ OR02 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



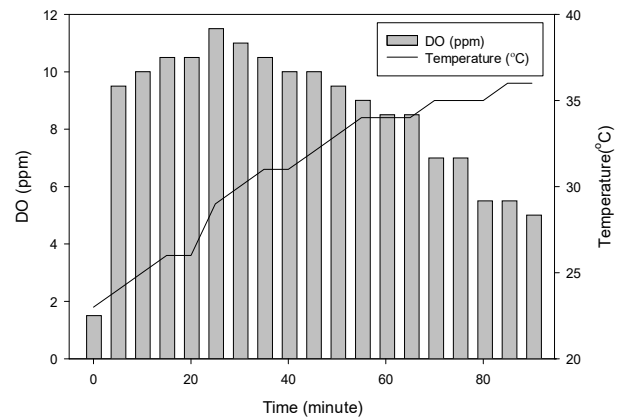
รูปที่ 6 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออริฟิซแบบ OR03 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4–6 เป็นกราฟแสดงปริมาณ DO (กราฟแท่ง) และอุณหภูมิ (กราฟเส้น) ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกสัควีเตชันในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกันทุก ๆ 5 นาที สำหรับแผ่นออริฟิซแบบ OR01, OR02, และ OR03 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตรเท่ากัน แต่มีจำนวน 3, 4, และ 5 รูตามลำดับ พบว่าปริมาณ DO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนกระทั่งมีค่าสูงสุดแล้วจึงลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการบำบัด เมื่อพิจารณาร่วมกันจะพบว่าปริมาณ DO มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำอย่างชัดเจน ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4 โดยปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออริฟิซแบบ OR01 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจาก 1.5 ppm เป็น 5 ppm ในระยะเวลาเพียง 5 นาที จากนั้นปริมาณ DO จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด และมีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ 7 ppm ที่ระยะเวลา 35 นาทีและอุณหภูมิของน้ำที่ 30 °C จากนั้นปริมาณ DO จะมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลง

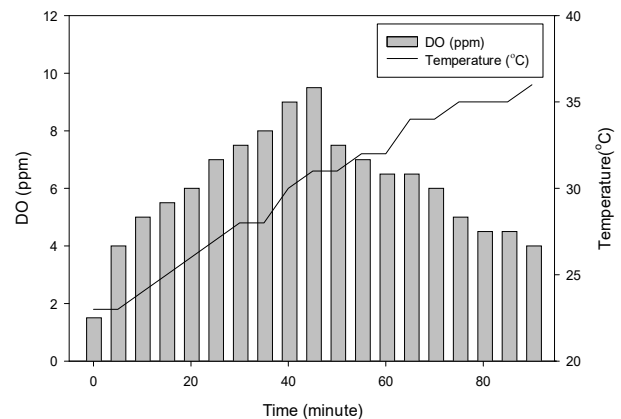
ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ปริมาณ DO ลดลงจนเท่ากับ 4 ppm นอกจากนี้เมื่อพิจารณา อุณหภูมิของน้ำ จะพบว่าตลอดระยะเวลาในการบำบัด อุณหภูมิ ของน้ำมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเป็นผลจากการแตกตัวของ ฟองไอล และคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเกิดปรากฏการณ์ควิเตชัน จากรูปที่ 5 พบว่าปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถัง ปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออร์ฟิซแบบ OR02 ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับ รูปที่ 4 แต่ระยะเวลาที่ปริมาณ DO มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ 7 ppm ต้องใช้ระยะเวลาบำบัด 40 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 27 °C และค่อย ๆ ลดลงเหลือ 3.5 ppm เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นถึง 35°C นอกจากนี้ปริมาณ DO และ อุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR03 ดัง แสดงในรูปที่ 6 พบว่าถังปฏิกรณ์ HC สามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้อย่างรวดเร็ว โดยในระยะเวลาในการบำบัด 5 นาทีแรกปริมาณ DO เพิ่มขึ้นถึง 7 ppm และเมื่อระยะเวลาบำบัดเพิ่มขึ้นปริมาณ DO ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ 10 ppm ใช้ ระยะเวลาเพียง 30 นาที และจะมีค่าคงที่จนกระทั่งระยะเวลาใน การบำบัดเกิน 45 นาทีจึงค่อย ๆ ลดลง อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า ปริมาณ DO จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ซึ่งมีความสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Jacobsen [21] ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ความสามารถในการเก็บกักออกซิเจนไว้ในน้ำจะลดลง นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Durlević [22] ยังพบว่าระดับของการอิ่มตัว ของออกซิเจนในน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และปริมาณของกระบวนการ สังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นในน้ำบริเวณนั้น ๆ ที่เกิดจากพืชน้ำ



รูปที่ 7 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR04 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



รูปที่ 8 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR05 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน



รูปที่ 9 : ปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR06 ที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน

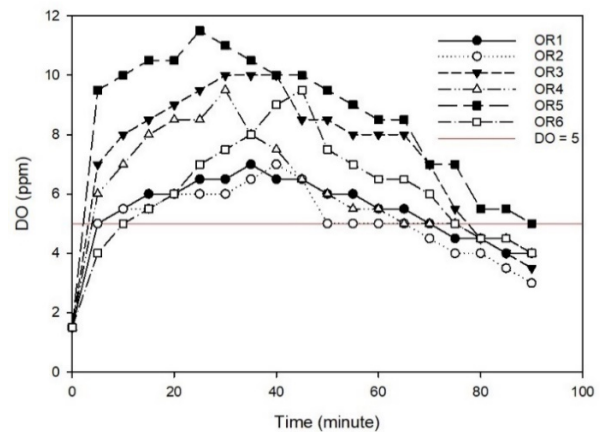
รูปที่ 7-9 เป็นกราฟแสดงปริมาณ DO และค่าอุณหภูมิของ น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ HC ในแต่ละช่วงเวลาที่ แตกต่างกัน 5 นาที โดยใช้แผ่นออร์ฟิซ OR04, OR05 และ OR06 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 แบบเป็นแผ่นออร์ฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูเจาะ 4 มิลลิเมตรเท่ากัน แต่มีจำนวน 3 รู 4 รู และ 5 รู ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 7 พบว่าปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการ บำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออร์ฟิซแบบ OR04 มีค่า เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 1.5 ppm เป็น 6 ppm ในระยะเวลาใน การบำบัด 5 นาที และมีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ 9.5 ppm ที่ระยะ เวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 28 °C จากนั้นปริมาณ DO จะมี แนวโน้มค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำ จากรูปที่ 8 พบว่าปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถัง ปฏิกรณ์ HC ที่ติดตั้งแผ่นออร์ฟิซ แบบ OR05 ในระยะเวลา 5 นาทีปริมาณ DO พุ่งสูงขึ้นอย่างมาก โดยที่ค่าเพิ่มจาก 1.5 ppm

ไปเป็น 8.5 ppm จากนั้นปริมาณ DO ก็มีค่าสูงขึ้นและสูงสุดที่ 11.5 ppm แต่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดเพียง 25 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 29 °C และค่อย ๆ ลดลงจนเหลือ 5 ppm เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 36 °C และสุดท้ายปริมาณ DO และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากแผ่นออร์พิช OR06 ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าปริมาณ DO มีการค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดที่ 9.5 ppm ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 45 นาที ที่อุณหภูมิของน้ำ 31 °C จากนั้นปริมาณ DO จะค่อย ๆ ลดลง

3.2) เปรียบเทียบปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากแผ่นออร์พิชต่าง ๆ

เมื่อนำเอาผลของปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่น ออร์พิชทั้ง 6 แบบที่ระยะเวลาการบำบัดต่าง ๆ มาพล็อตลงบนกราฟเดียวกันจะได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงรูปที่ 10 โดยเมื่อเราใช้เกณฑ์ของปริมาณ DO ที่มีค่ามากกว่า 5 ppm เป็นน้ำที่เหมาะสมกับการอาศัยของสัตว์และสิ่งมีชีวิตในน้ำมาพิจารณาจะพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 5 นาที น้ำจากการบำบัดด้วยแผ่นออร์พิชทุกแบบยกเว้น แผ่นออร์พิช แบบ OR06 มีค่าสูงกว่า 5 ppm โดยแผ่นออร์พิช แบบ OR05 ที่มีค่า α เท่ากับ 1.887 β เท่ากับ 0.090 และค่าเลขควาเดชั่นเท่ากับ 4.1 สามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้สูงที่สุดถึง 9.5 ppm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเป็น 10 นาที จะพบว่าจากการบำบัดด้วยแผ่นออร์พิชทั้ง 6 แบบมีปริมาณ DO มากกว่า 5 ppm ทุกแบบ และเมื่อพิจารณาแนวโน้มของปริมาณ DO ที่เพิ่มขึ้นในการทดลองของทุกแผ่นจะพบว่าจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดในช่วงระยะเวลาการบำบัด 30–45 นาที และจากนั้นจะลดลง อันเป็นผลจากอุณหภูมิค่าสูงมากกว่า 30 °C ในช่วงเวลาในการบำบัดมากกว่า 45 นาที ส่งผลให้น้ำมีความสามารถในการกักเก็บออกซิเจนลดลง

หากพิจารณาเลขควาเดชั่น จะพบว่าความรุนแรงในการเกิดควาเดชั่นไม่ใช่เพียงตัวแปรเดียวที่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณ DO ในน้ำ โดยค่าเลขควาเดชั่นที่ลดลงบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการเกิดควาเดชั่นที่สูงขึ้น [23] ซึ่งเป็นผลมาจากการลดพื้นที่หน้าตัด (β) ทำให้ความดันทางเข้าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าปริมาณพื้นที่บริเวณที่เกิดควาเดชั่นก็ส่งผลอย่างมากเช่นกัน ดังเห็นได้จากแผ่นออร์พิชแบบ OR5 ที่มีเลขควาเดชั่น 4.1 ซึ่งมีความรุนแรงของการเกิดควาเดชั่นน้อยกว่าแผ่นออร์พิชแบบ OR06 ที่มีเลขควาเดชั่น 3.5 แต่กลับสามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้มากกว่าในทุกช่วงเวลาของการบำบัด



รูปที่ 10 : ผลการเปรียบเทียบปริมาณ DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแผ่นออร์พิชทั้ง 6 แบบที่มีระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน

5) สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำสำหรับน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ ด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ควาเดชั่นที่ใช้แผ่นออร์พิชเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควาเดชั่น จากผลการทดลองพบว่าแผ่นออร์พิชทั้ง 6 แบบ ซึ่งมีค่าเลขควาเดชั่นอยู่ในช่วง 3.5–6.4 สามารถเพิ่มปริมาณ DO ในน้ำได้จนมีค่ามากกว่า 5 ppm ซึ่งเป็นระดับที่สิ่งมีชีวิตในน้ำสามารถดำรงชีวิตได้ โดยปริมาณ DO จะมีค่าสูงสุดในช่วงอุณหภูมิของน้ำ 28–31 °C หากอุณหภูมิสูงกว่าช่วงนี้ ปริมาณ DO จะลดลงอย่างต่อเนื่องจากผลของความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำซึ่งจะลดลงตามอุณหภูมิของน้ำ โดยแผ่นออร์พิชแบบ OR05 สามารถเพิ่มปริมาณ DO ได้สูงที่สุดถึง 11.5 ppm โดยใช้เวลาน้อยที่สุดเพียง 25 นาที จึงสรุปได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบ HC ที่ใช้แผ่นออร์พิชสามารถนำมาใช้เพิ่มปริมาณ DO ในน้ำได้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนและราคาไม่สูง อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งาน ควรควบคุมปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัด คืออุณหภูมิของน้ำที่มีการเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในการบำบัด เพื่อลดผลกระทบต่อความสามารถในการกักเก็บออกซิเจนในน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินการวิจัย

REFERENCES

- [1] S. F. Jane, J. L. Mincer, M. P. Lau, A. S. L. Lewis, J. T. Stetler, and K. C. Rose, "Longer duration of seasonal stratification contributes to widespread increases in lake hypoxia and anoxia," *Global Change Biol.*, vol. 29, no. 4, pp. 1009–1023, 2023, doi: 10.1111/gcb.16525.
- [2] P. R. Kannel, S. Lee, Y.-S. Lee, S. R. Kanel, and S. P. Khan, "Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 132, no. 1, pp. 93–110, 2007, doi: 10.1007/s10661-006-9505-1.
- [3] N. Naveedullah *et al.*, "Water quality characterization of the Siling reservoir (Zhejiang, China) using water quality index," *CLEAN – Soil, Air, Water*, vol. 44, no. 5, pp. 553–562, 2016.
- [4] O. I. Abdul-Aziz and A. K. Gebreslase, "Emergent scaling of Dissolved Oxygen (DO) in freshwater streams across contiguous USA," *Water Resour. Res.*, vol. 59, no. 2, 2023, Art. no. e2022WR032114, doi: 10.1029/2022WR032114.
- [5] A. A. M. Ahmed, S. J. J. Jui, M. A. I. Chowdhury, O. Ahmed, and A. Sutradha, "The development of dissolved oxygen forecast model using hybrid machine learning algorithm with hydro-meteorological variables," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, pp. 7851–7873, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-22601-z.
- [6] Q. Zuo, Y. Tian, G. Ma, Z. Li, and Z. Sun, "Design of an integrated A/D converter for dissolved oxygen sensor interface in aquaculture," in *Proc. Int. Conf. Mech. and Robot. (ICMAR)*, Zhuhai, China, Feb. 2022, doi: 10.1109/ICMAR55693.2022.9856385.
- [7] A. Rajwa-Kuligiewicz, R. J. Bialik, and P. M. Rowinski, "Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales," *J. Hydrol. Hydromech.*, vol. 63, no. 4, pp. 353–364, 2015.
- [8] S. Heddarn, "Intelligent data analytics approaches for predicting dissolved oxygen concentration in river: Extremely randomized tree versus random forest, MLPNN and MLR," in *Intelligent Data Analytics for Decision-Support Systems in Hazard Mitigation: Theory and Practice of Hazard Mitigation*, R. C. Deo, P. Samui, O. Kisi, and Z. M. Yaseen, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 89–107.
- [9] X. Wang, F. Wang, and W. Wei, "Linear active disturbance rejection control of dissolved oxygen concentration based on benchmark simulation model number 1," *Math. Problems Eng.*, vol. 2015, 2015, Art. no. 178953, doi: 10.1155/2015/178953.
- [10] V. P. Sarvothaman, S. Nagarajan, and V. V. Ranade, "Treatment of solvent-contaminated water using vortex-based cavitation: Influence of operating pressure drop, temperature, aeration, and reactor scale," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 57, no. 28, pp. 9292–9304, 2018.
- [11] J. Loughrin, S. Antle, K. Sistani, and N. Lovanh, "In situ acoustic treatment of anaerobic digesters to improve biogas yields," *Environments*, vol. 7, no. 2, Feb. 2020, Art. no. 11, doi: 10.3390/environments7020011.
- [12] K. O. Badmus, N. Irakoze, O. R. Adeniyi, and L. Petrik, "Synergistic advance Fenton oxidation and hydrodynamic cavitation treatment of persistent organic dyes in textile wastewater," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 2, Apr. 2020, Art. no. 103521, doi: 10.1016/j.jece.2019.103521.
- [13] P. Jain, V. M. Bhandari, K. Balapure, J. Jena, V. V. Ranade, and D. J. Killedar, "Hydrodynamic cavitation using vortex diode: An efficient approach for elimination of pathogenic bacteria from water," *J. Environ. Manag.*, vol. 242, pp. 210–219, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.057.
- [14] P. B. Patil, V. M. Bhandari, and V. V. Ranade, "Improving efficiency for removal of ammoniacal nitrogen from wastewaters using hydrodynamic cavitation," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 70, 2021, Art. no. 105306, doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105306.
- [15] M. Lebioccka, "Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of municipal wastewater," *J. Ecol. Eng.*, vol. 21, no. 6, pp. 155–160, 2020.
- [16] S. Zhang, L. Shen, and W. Gong, "Enhancing the degradation of Rhodamine B by hydrodynamic cavitation with CCl₄ augmentation," *Adv. Mater. Res.*, vol. 864–867, pp. 1244–1252, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.864-867.1244.
- [17] A. G. Chakinala, P. R. Gogate, A. E. Burgess, and D. H. Bremner, "Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing," *Chem. Eng. J.*, vol. 152, no. 2-3, pp. 498–502, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.cej.2009.05.018.
- [18] P. R. Gogate and P. N. Patil, "Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 25, pp. 60–69, 2015, doi: 10.1016/j.ultsonch.2014.08.016.
- [19] N. S. M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, and M. Ashokkumar, "Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 29, pp. 568–576, 2016, doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.06.013.



- [20] M. S. Plesset, "The dynamics of cavitation bubbles," *J. Appl. Mech.*, vol. 16, no. 3, pp. 277–282, 2021.
- [21] D. Jacobsen, "Low oxygen pressure as a driving factor for the altitudinal decline in taxon richness of stream macroinvertebrates," *Oecologia*, vol. 154, no. 4, pp. 795–807, 2007.
- [22] U. Durlević, "The analysis of the quality of surface water of danube in the republic of Serbia for 2018," *Zbornik Radova - Geografski Fakultet Univerziteta U Beogradu*, vol. 68, pp. 53–70, Dec. 2020, doi: 10.5937/zrgfub2068053d.
- [23] B. Balasundaram and S. T. L. Harrison, "Disruption of brewers' yeast by hydrodynamic cavitation: Process variables and their influence on selective release," *Biotechnology Bioengineering*, vol. 94, no. 2, pp. 303–311, 2006, doi: 10.1002/bit.20878.

Optimization Plastic Mold Injection Parameters for Sprinkler Valve Production Process Using Problem Solving and Experimental Design

Bantita Keawprapai¹ Mintra Bunduang^{2*} Ninlawan Choomrit³

^{1,2*,3}*Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,
Nakhon Nayok, Thailand*

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

Received: 25 June 2024; Revised: 23 September 2024; Accepted: 7 October 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

The goal of this research was to optimize the injection molding process using problem-solving technique and experimental design to determine appropriate parameters for sprinkler valve production. The analysis identified that the main cause of defects was due to inappropriate parameter settings in the injection molding process. To address this, a method was developed that began with screening factors influencing incomplete injection and burn marks on the surface of the workpiece by expert teams. Four key factors were identified: injection pressure, injection speed, end-of-fill temperature, and start-of-fill temperature. Experiment design involved a factorial 2⁴ experimental design with each factor divided into 2 levels, repeating experiments 3 times, for a total of 48 experiments. Statistical analysis was conducted to determine the optimal levels for all four factors, resulting in the following optimal factor levels: injection pressure of 65 MPa, injection speed of 10 mm/s, end-of-fill temperature of 175 °C, and start-of-fill temperature of 180 °C. Additionally, the defect rate was reduced from the original 11.6% decreased to 8.7%.

Keywords: Design of experiment, Injection molding process, Sprinkler valves



I. INTRODUCTION

Currently, plastics play a crucial role in various industries, such as automotive parts, electronics, construction materials, packaging, and agriculture, significantly driving the growth of related sectors. This has led to a substantial presence of businesses in these industries in Thailand, utilizing plastic pellets as durable raw materials for manufacturing. With standardized and efficient plastic industry technologies, high-quality products can be consistently produced to compete both domestically and internationally.

Injection molding is a highly effective method for mass-producing plastic components with intricate designs and exceptional dimensional accuracy. However, improper settings of input parameters can lead to poor surface quality, reduced dimensional precision, excessive waste, and increased production time and costs. To achieve high-quality finished parts, it's crucial to optimize these process parameters. Numerous studies have been undertaken to enhance and refine the injection molding process, enabling the production of high-quality components across various commercial machines. As such, identifying the optimal parameters is essential [1], [2].

The case study examines a factory that manufactures and distributes integrated agricultural equipment, such as sprayers, foggers, PE pipes, and PVC fittings. Through investigating issues in the plastic injection process, it was found that the highest production volume was for 1/2-inch PVC rotating sprinkler valve products, with a significant amount of waste generated. In the production of sprinkler valves, there was significant difficulty in adjustment, as some valves were challenging to fine-tune for optimal performance, making it hard to achieve the desired flow rates. Additionally, the complexity of the valve's shape hindered complete plastic injection, resulting in issues such as incomplete fills, potential air traps, and inconsistent part quality. To analyze the

causes of defects, specifically flame pattern defects in injection molded parts, the use of Fishbone diagrams revealed that improper parameter settings were a significant contributing factor. This research aims to propose experimental design principles to reduce waste in the plastic injection process for spring valve production.

II. THEORIES AND RELATED RESEARCH

The Fishbone diagram, also known as a Cause-and-Effect diagram, is an essential tool in the problem-solving process, allowing teams to systematically identify and address root causes. This visual tool helps categorize potential causes of a problem, enabling teams to map out and examine the underlying factors contributing to the issue. By doing so, it facilitates discussions, prioritizes areas for further exploration, and ultimately leads to more effective solutions. Numerous studies have utilized the Fishbone diagram in the field of plastic injection molding. For example, fishbone diagram establishes a hierarchy of potential causes for defects in plastic injection products. These product defects arise from activities conducted during two primary processes: the design process and the injection molding process [3]. The Fishbone diagram highlights several issues contributing to the force problem. After discussions with manufacturing experts, it was determined that the primary causes of this issue are related to the machine, specifically concerning curing time, temperature, and pressure [4]. Employing the Six Sigma (DMAIC) methodology, data collected during the Measure phase was utilized to identify the sources of these defects and to uncover the root causes of the problem through the use of the Fishbone diagram [5]. The results indicate that the implementation of the proposed Six Sigma approach leads to a significant reduction in the rejection rate. It was observed that the quality of the final products improved substantially,

with the sigma level increasing from 4.06 to 4.5. Additionally, the cost of poor quality (COPQ) was reduced by 45% [6].

Design of Experiment (DOE) [7] is a statistical technique used to adjust process conditions to meet desired specifications. The fundamental principles of experimental design ensure accurate, precise, and reliable results and include three main concepts: replication, randomization, and blocking. Experimental design is applied across various objectives [8], such as optimizing process yields, identifying input variables affecting output responses, parameter adjustment, identifying factors to reduce variability, minimizing development time, and reducing overall costs. There are several formats of experimental design, with one widely utilized approach being Factorial Design [9]. This method investigates the effects resulting from the combination of all possible levels of factors in the experiment. For instance, in a case with 2 factors, if factor A has a levels and factor B has b levels, one replicate of the experiment would consist of testing all ab combinations. Factorial designs are highly efficient in examining the influence of multiple factors simultaneously and can analyze both main effects and interaction effects comprehensively.

Examples of research utilizing experimental design to optimize production conditions include efforts to reduce waste generation, determine appropriate machine parameter settings, and enhance manufacturing processes. For instance, studies have analyzed factors affecting the thickness of electroplated metal parts [10], reduced non-standard automotive part counts [11], minimized time and waste in wire edge rubber molding processes [12], identified suitable parameters for head gimbals assembly (HGA) washing processes [13], improved efficiency indices and seal-back pull forces in packaging processes [14], assessed factors influencing Napier grass cutting efficiency [15], developed efficiency

in strip rubber production processes using Lean Six Sigma concepts [16]. Additionally, direct applications to plastic injection molding processes include optimizing injection molding machine settings for electronics components using 2^3 Factorial Design [17], determining suitable parameters for ABS plastic part injection using 2^{5-1} Fractional Factorial Design [18], optimizing polymer material production parameters for maximum mechanical properties and minimum shrinkage using Taguchi Design [19], and exploring conditions for reducing injection molding cycles with the aid of process simulation software [20], [21].

III. RESEARCH METHODOLOGY

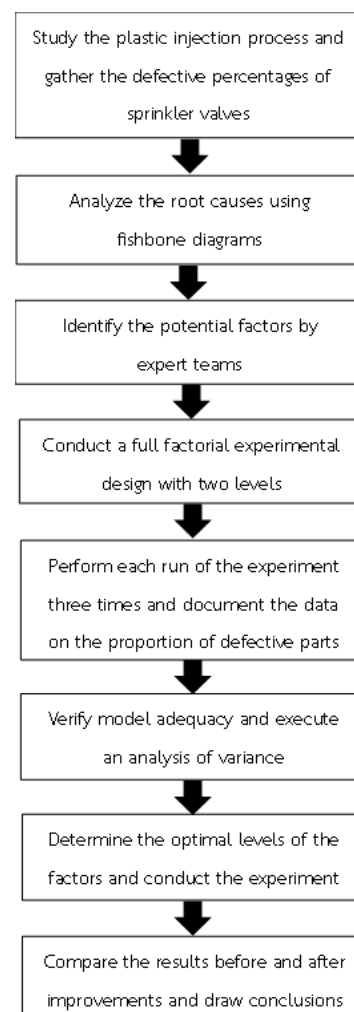


Figure 1: Steps in the research process

The research process begins with studying the operational conditions of a case study factory and identifying the nature of the encountered problems. It reviews relevant theories and research, followed by analyzing the root causes using fishbone diagrams. Recommendations for improvement are proposed by identifying appropriate parameters. Experimental design is conducted using a two-level factorial design, and injection molding experiments are performed, recording the defective rate as depicted in figure 1.

Based on data collected retrospectively from November 2023 to January 2024, the top 5 highest defective percentages were calculated in table 1, considering both production volume and quantity of defective pieces. The product with the highest defective percentage was the 1/2-inch PVC rotating sprinkler valve, totaling 178,860 units produced with 20,747 units deemed defective, resulting in a defective percentage of 11.6%. Defective pieces primarily occurred during the plastic injection molding process. The factory did not differentiate between types of defects but categorized them collectively as “flame pattern defects”. Defective pieces were ground and mixed with PVC material for subsequent injection molding into other products.

To analyze the causes of defects or flame pattern defects in injection molded parts, a Fish Bone Diagram

is employed. Interviews were conducted with relevant department heads involved in the plastic injection process, including production managers, mold department heads, injection molding technicians, quality inspection supervisors, maintenance supervisors, and research and development department heads. Causes were gathered and categorized according to the 4M principle: Man, Material, Machine, and Method. These findings are illustrated in figure 2.

Table 1: The production quantity for each model of valve

Product name	Production (pieces)	Defective (pieces)	Defective percentages
1/2-inch PVC rotating sprinkler valve	178,860	20,747	11.60
Hand-operated agricultural valve, fitting $\frac{3}{4}$ x $\frac{1}{2}$	83,250	4,692	5.63
Agricultural check valve, equipment fitting 387-2	90,000	16,594	5.42
PVC-PE valve, fitting $\frac{1}{2}$ " x 16, blue (389-60R)	69,750	3,711	5.32
PVC pipe fitting, external thread $\frac{1}{2}$ x $\frac{1}{2}$, blue	90,000	4,459	4.96

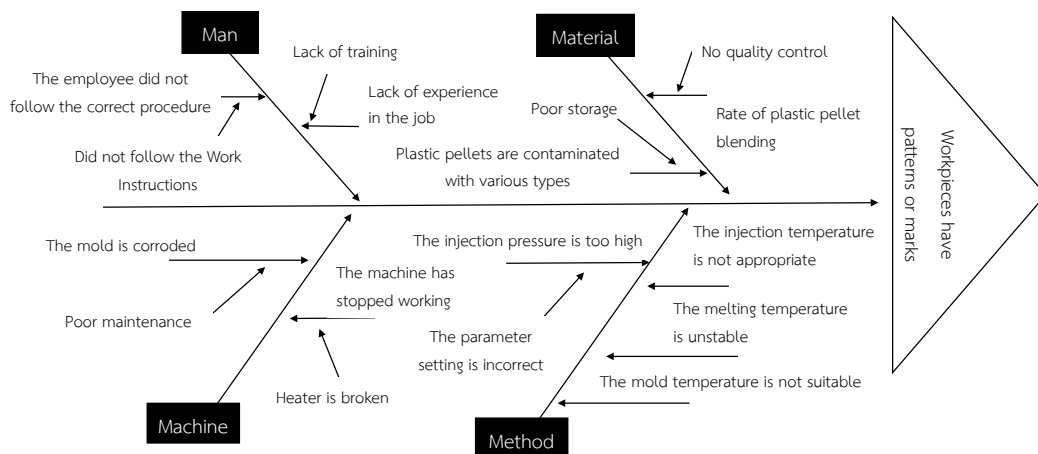


Figure 2: Fishbone diagram for analyzing the causes of problems

From the compiled causes, when ranked by significance as assessed by department heads and skilled technicians, it was found that the primary factors directly impacting the occurrence of defects were related to the Material category. These included non-standard plastic pellets, contamination from multiple types of materials, and inappropriate material mixing ratios. Method-related factors also contributed, such as improper parameter settings. Due to research and development unit constraints on disclosing material mixing formulas, this research focuses on identifying suitable parameters for the injection molding process of the 1/2-inch PVC rotating sprinkler valve by controlling consistent material mixing ratios and using the same injection molding machine.

Based on the analysis by expert teams, factors influencing and impacting the issue of patterned defects in molded parts, specifically within the Method category, were identified. The experimenters utilized parameters related to machine settings as experimental design factors (Figure 3), which encompassed four specific factors:

1. Injection Pressure
2. Injection Speed
3. End Stage Injection Temperature
4. First Stage Injection Temperature

In this study, a full factorial experiment with 2 levels (2^4 Full Factorial Experiment) involving 4 factors was conducted, resulting in 16 experimental runs. Each

experiment was replicated 3 times, totaling 48 experimental runs. The experiments were randomized using statistical analysis software. The response variable measured was the proportion of defective parts, with a confidence level of 95% ($\alpha = 0.05$).

During actual injection molding, it was observed that the injection molders adjust all four factors when encountering defective parts during production. These adjusted values differ from those specified in the standard production documents. Subsequently, the molders record these adjusted values in the Condition Document. Therefore, the researcher collected data retrospectively from these documents spanning three months from November 2023 to January 2024. The researcher defined the factor levels based on the minimum and maximum values to establish low and high levels for each factor, as shown in the table 2.

Table 2: Factor level categorization

Factors	Factor Level		Unit
	Low (-)	High (+)	
Injection Pressure (A)	55	65	MPa
Injection Speed (B)	10	20	mm/s
End Stage Injection Temperature (C)	175	185	°C
First Stage Injection Temperature (D)	170	180	°C

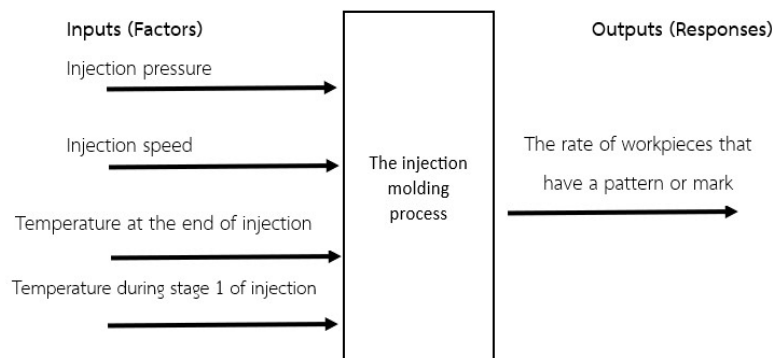


Figure 3: Experimental design factors

IV. STATISTICAL ANALYSIS RESULTS

A. Experimental Results

From the designed full factorial experiment (24) with each experiment replicated 3 times, totaling 48 experiments, each experiment involved 100 pieces, resulting in a total of 4,800 pieces as shown in the table 3.

B. Model Adequacy Checking

The validation of the experimental design entails verifying the accuracy and appropriateness of the data obtained from the experiments. This is assessed based on the principle that $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$, where the residuals derived from the experimental data exhibit a normal distribution, are approximately centered around zero, and the variance σ^2 remains constant. These conditions ensure the reliability and validity of the experimental data. The results of the ϵ_{ij} verification are illustrated in figure 4.

Table 3: The response value of each experiment

StdOrder	RunOrder	Blocks	A	B	C	D	Response
16	1	1	65	20	185	180	0.05
42	2	1	65	10	175	180	0.02
32	3	1	65	20	185	180	0.06
26	4	1	65	10	175	180	0.01
21	5	1	55	10	185	170	0.19
5	6	1	55	10	185	170	0.20
36	7	1	65	20	175	170	0.05
20	8	1	65	20	175	170	0.06
1	9	1	55	10	175	170	0.05
28	10	1	65	20	175	180	0.10
9	11	1	55	10	175	180	0.11
13	12	1	55	10	185	180	0.07
18	13	1	65	10	175	170	0.07
35	14	1	55	20	175	170	0.13
40	15	1	65	20	185	170	0.10
25	16	1	55	10	175	180	0.13
19	17	1	55	20	175	170	0.15
30	18	1	65	10	185	180	0.14
33	19	1	55	10	175	170	0.07
41	20	1	55	10	175	180	0.14
11	21	1	55	20	175	180	0.07
7	22	1	55	20	185	170	0.11

Table 3: The response value of each experiment (Cont.)

StdOrder	RunOrder	Blocks	A	B	C	D	Response
44	23	1	65	20	175	180	0.12
22	24	1	65	10	185	170	0.12
39	25	1	55	20	185	170	0.09
43	26	1	55	20	175	180	0.05
37	27	1	55	10	185	170	0.17
4	28	1	65	20	175	170	0.04
34	29	1	65	10	175	170	0.06
12	30	1	65	20	175	180	0.09
17	31	1	55	10	175	170	0.04
38	32	1	65	10	185	170	0.08
46	33	1	65	10	185	180	0.13
15	34	1	55	20	185	180	0.08
14	35	1	65	10	185	180	0.12
48	36	1	65	20	185	180	0.08
31	37	1	55	20	185	180	0.06
23	38	1	55	20	185	170	0.07
29	39	1	55	10	185	180	0.07
24	40	1	65	20	185	170	0.09
45	41	1	55	10	185	180	0.05
47	42	1	55	20	185	180	0.04
10	43	1	65	10	175	180	0.03
6	44	1	65	10	185	170	0.09
3	45	1	55	20	175	170	0.14
27	46	1	55	20	175	180	0.04
2	47	1	65	10	175	170	0.08
8	48	1	65	20	185	170	0.07

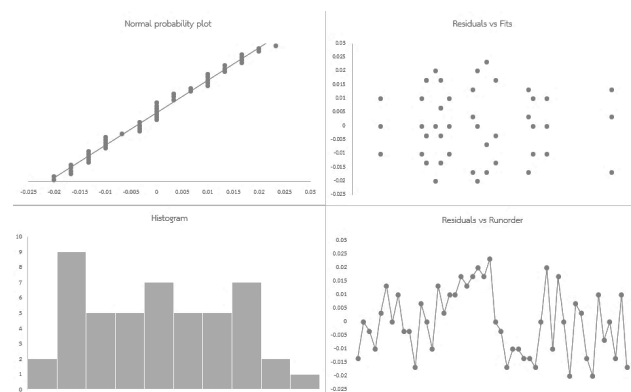


Figure 4: Residual plot

From the Normal Probability Plot, it was observed that the residuals exhibit a straight-line distribution, indicating a normal distribution. This allows for the estimation that the data follows a normal distribution pattern.

From the scatter plot of residuals compared to the fitted values, it was observed that the distribution of residuals remains consistent across all positions, without any apparent trend. Therefore, it can be concluded that the data exhibits variance stability.

From the scatter plot of residuals compared to the observation order, it was found that the distribution of residuals exhibits a pattern of independence or cannot be precisely modeled. This indicates independence of residuals.

C. Analysis of Variance

The results of the variance analysis of the full factorial experimental design (24) at a 95% confidence level are depicted in figures 5 and 6.

From the variance analysis of the 2^4 full factorial experimental design, it was found that factors influencing the defect rate of products, with a P-value less than the significance level of 0.05, are divided into interactive effects of 2 factors and main effects. The interactive effects of the 2 factors include pressure and speed (AB), pressure and end temperature (AC), pressure and temperature at stage 1 (AD), speed and end temperature (BC), and end temperature and temperature at stage 1 (CD). This results in significant main effects of pressure (A), speed (B), end temperature (C), and temperature at stage 1 (D) on the defect rate of products. The model's decision-making coefficient (R-Square) is 91.99%, indicating that the regression model can effectively explain the variability in the response variable around its mean [3]. When plotting the relationship between each factor level (Factorial Plots) that influences the defect rate of patterned products, as depicted in figures 7 and 8. Figure 7 showed that, considering the main effects, increasing pressure (A), increasing speed (B), increasing the temperature at stage 1 (D), and decreasing the end temperature (C) resulted in a reduction in the defect rate.

Design summary						
factors 4	base design 4, 16					
runs 48	replicates 3					
block 1	center pts (total) 0					
Analysis of variance						
	Source	DF	adj SS	adj MS	F-value	P-value
	Model	15	0.080392	0.005359	24.50	0.000
	Linear	4	0.015492	0.003873	17.70	0.000
	A	1	0.004408	0.004408	20.15	0.000
	B	1	0.001875	0.001875	8.57	0.006
	C	1	0.004800	0.004800	21.94	0.000
	D	1	0.004408	0.004408	20.15	0.000
	2way interactions	6	0.024658	0.004110	18.79	0.000
	AB	1	0.001008	0.001008	4.61	0.039
	AC	1	0.002133	0.002133	9.75	0.004
	AD	1	0.006075	0.006075	27.77	0.000
	BC	1	0.012033	0.012033	55.01	0.000
	BD	1	0.000075	0.000075	0.34	0.562
	CD	1	0.003333	0.003333	15.24	0.000
	3way interactions	4	0.008208	0.002052	9.38	0.000
	ABC	1	0.000133	0.000133	0.61	0.441
	ABD	1	0.002408	0.002408	11.01	0.002
	ACD	1	0.004033	0.004033	18.44	0.000
	BCD	1	0.001633	0.001633	7.47	0.010
	4way interactions	1	0.032033	0.032033	146.44	0.000
	ABCD	1	0.032033	0.032033	146.44	0.000
	Error	32	0.007000	0.000219		
	Total	47	0.087392			
Model summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.0147902	91.99%	88.24%	81.98%		

Figure 5: Variance analysis results

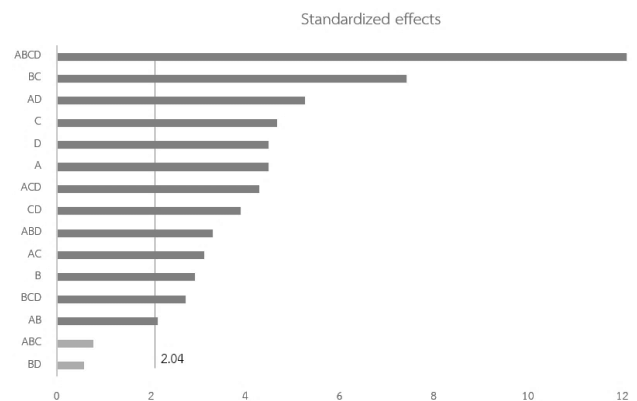


Figure 6: Pareto chart showing significant factors

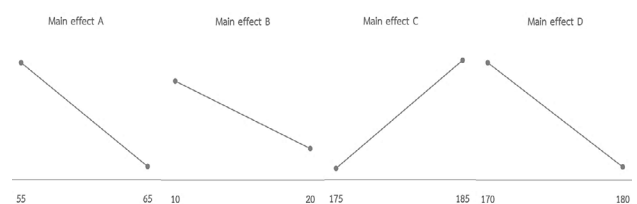


Figure 7: Main effects

Figure 8 illustrated apparent interaction effects. The results indicated that the interaction effects for AB, AC, AD, BC, and CD were statistically significant. Meanwhile, the interaction for BD was not significant.

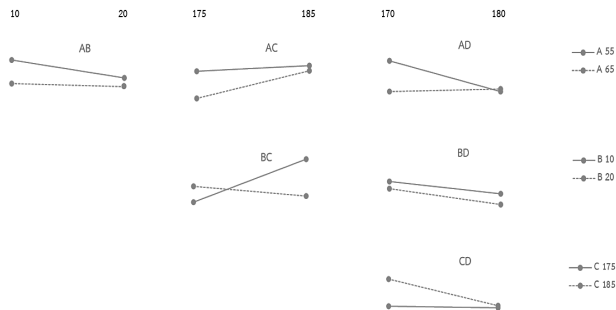


Figure 8: Interaction effects

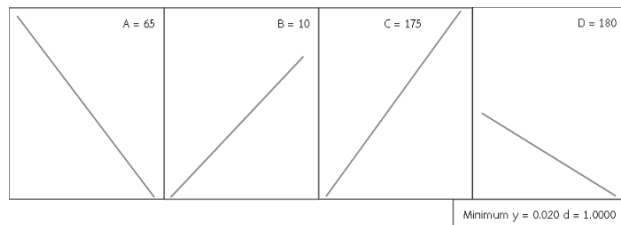


Figure 9: Response outcomes of appropriate factor levels

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
y	Minimum		0.03	0.2	1	1
Solution						
Solution A B C D				y fit	Composite desirability	
1	65	10	175	180	0.02	1
Multiple response prediction						
Variable setting						
A	65					
B	10					
C	175					
D	180					
Response	Fit	SE fit	95% CI		95% PI	
y	0.02	0.00854	(0.00261,0.03739)		(-0.01479,0.05479)	

Figure 10: Results of output optimization point

After conducting preliminary factor screening experiments, it was determined which factors influence the occurrence of defects in the products. Subsequently, appropriate factor levels were identified for use in the plastic injection molding process using Response

Optimization methodology. The response analysis was performed with a Minimize Goal approach, setting the acceptable lower limit of defects to 0.03 and the upper limit to 0.2, as illustrated in figures 9 and 10.

Analysis of experimental results using Response Optimization and summarization of the optimal factors for each factor as follows:

Based on the above analysis, the optimal levels of factors for parameter adjustment are determined as follows: pressure at 65 MPa, velocity at 10 mm/s, end injection temperature at 175 °C, and first stage injection temperature at 180 °C. These adjustments resulted in minimizing the defect ratio to a minimum of 0.020 or 2%. The overall satisfaction with the response outcomes, measured by the composite desirability (D), ranges between 0 and 1. A value of D equal to 1 indicates complete satisfaction with the response outcomes [22].

Comparing the results before and after optimization, it was found that in April 2024, when the experiment was designed by adjusting all 4 parameters to match actual injection conditions, out of 4,800 injected pieces, there were 418 defects, accounting for 8.7% as shown in the table 4. The experimental results indicated a reduction in the defect rate. However, there were limitations related to a small production size due to limited material availability, time constraints, and the challenges of interrupting the predetermined production schedule. A comparison of the parameter values specified in the original standard and the newly proposed values was presented in the table 5.

Table 4: Result comparisons before and after improvement

Periods	Production (pieces)	Defective (pieces)	Percent defective
November 2023 - January 2024	178,860	20,747	11.6%
April 2024	4,800	418	8.7%

Table 5: Comparison of parameters

Comparison	Pressure (MPa)	Speed (mm/s)	End Temp (°C)	First Temp (°C)
Standard Document (Old)	80	10	185	175
Proposed Setting (New)	65	10	175	180

V. CONCLUSION

Design of a 2^4 full factorial experiment for manufacturing 1/2-inch rotating PVC sprinkler valves, which originally had a maximum defect rate of 11.6%. Upon adjusting all four parameters—pressure, speed, end injection temperature, and first stage injection temperature—based on actual injection conditions, conducted in April 2024, the defect rate decreased to 8.7%. Using Response Optimizer, the suitable parameter levels identified were: pressure at 65 MPa, speed at 10 mm/s, end injection temperature at 175 °C, and first stage injection temperature at 180 °C. These adjustments resulted in a defect rate lower than the target. The researchers will propose implementing these parameter adjustments to the factory as a case study for consideration in developing new production standards. Recommended research tasks include: conducting more experiments for result verification minimizes the chances of errors caused by random sampling, analyzing new ingredient compositions to reduce production costs and cost components, maintaining and preparing molds for operational readiness, exploring techniques for optimizing multiple parameters, and developing adaptive algorithms that enhance product quality and reduce waste.

ACKNOWLEDGEMENT

I would like to express my gratitude to the management and staff of the case study company for their consultation, recommendations, and assistance throughout the experimentation phase of this research.

REFERENCES

- [1] M. G. Rathi and M. D. Salunke, "Analysis of injection moulding process parameters," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 1, no. 8, pp. 1–5, Oct. 2012.
- [2] A. Akbarzadeh and M. Sadeghi, "Parameter study in plastic injection molding process using statistical methods and IWO algorithm," *Int. J. Model. Optim.*, vol. 1, no. 2, pp. 141–145, Jun. 2011.
- [3] L. Luca and M. M. Pasare, "Study on a new classification of causes which generate defects of injection molding products," *Mater. Plast.*, vol. 56, no. 1, pp. 174–178, 2019.
- [4] T. M. Saputra, H. Hernadewita, A. Y. P. Saputra, L. H. Kusumah, and S. T. Hermiyetti, "Quality improvement of molding machine through statistical process control in plastic industry," *J. Appl. Res. Ind. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 87–96, Jun. 2019.
- [5] A. Alshammari, S. Redha, S. Hussain, T. Nazzal, Z. Kamal, and W. Smew, "Quality improvement in plastic injection molding industry: applying lean six sigma to SME in Kuwait," in *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. and Oper. Manage.*, Bandung, Indonesia, Mar. 2018, pp. 2856–2865.
- [6] A. Maged, S. Haridy, S. Kaytbay, and N. Bhuiyan, "Continuous improvement of injection moulding using Six Sigma: case study," *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 32, no. 2, pp. 243–266, Jun. 2019.
- [7] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. New Jersey, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2019.
- [8] K. Rekab and M. Shaikh, *Statistical Design of Experiments with Engineering Applications*. Florida, FL, USA: Chapman & Hall, 2005.
- [9] P. Chutima, *Engineering Experimental Design*. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University (in Thai), 2002.
- [10] C. Phimpha, "Optimal condition of metal plating process for reducing defect in process by design of experiment," (in Thai), *KKU Res. J. (Grad. Stud.)*, vol. 22, no. 3, pp. 77–86, 2022.



- [11] P. Homsri and J. Kongthana, "Design of experiment (DOE) to reduce waste in plastic injection process of automotive parts," (in Thai), *Kasem Bundit Eng. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 73–95, 2013.
- [12] A. Chanpachol and Y. Jantana, "Optimization for compress rubber screen machine setup using design of experiment," (in Thai), *J. Eng. Innov.*, vol. 15, no. 2, pp. 156–164, 2022.
- [13] P. Peamoon, P. Sukcharoenpong, and S. Witchakul, "The design of experiment to determine the optimum parameters for air particles control in the head gimbals assembly (HGA) washing process," *J. Eng. Digit. Technol. (JEDT)*, vol. 4, no. 2, pp. 40–45, 2016.
- [14] N. Danthaiwattana, "Optimization of peel back force's factor setting for sealing track with design of experiment," Dept. Ind. Develop., Thammasat Univ., Bangkok, Thailand, 2015. [Online]. Available: https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2015/TU_2015_5710037200_4059_3070.pdf
- [15] C. Kalchuk and K. Phunikom, "Design of experiments for analyzing factors affecting to Napier grass cutting efficiency," (in Thai), *Thai Ind. Eng. Netw. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 20–26, 2019.
- [16] N. Leenatham, W. Sudsomboon, S. Kaewkuekool, C. Kaewdee, and W. Pansrinual, "The efficiency improvement of STR 20 block rubber production process by using design of experiments," (in Thai), *Naresuan Univ. Eng. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 119–139, 2021.
- [17] P. Parakawong Na Ayuthaya, "Design of experiment to waste reduction injection process of electronic parts," Dept. Eng. Ind. Technol., Silpakorn Univ., Bangkok, Thailand, 2018. [Online]. Available: <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/2110>
- [18] J. B. Tranter, P. Refalo, and A. Rochman, "Towards sustainable injection molding of ABS plastic products," *J. Manuf. Processes*, vol. 29, pp. 399–406, Sep. 2017.
- [19] H. Öktem and D. Shinde, "Determination of optimal process parameters for plastic injection molding of polymer materials using multi-objective optimization," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 11, pp. 8616–8632, Aug. 2021.
- [20] L. D. Mahajan and P. N. Ulhe, "Analysis of injection molding process to reduced defects (short-shot)," *Int. J. Eng. Technol. Manag. Res.*, vol. 5, no. 6, pp. 113–119, Jun. 2018.
- [21] H. Radhwan, S. M. Nasir, M. M. Rashidi, K. Kamarudin, and A. E.-H. Abdellah, "Optimization parameters to reduce the warpage defect of plastic injection molding process for a thin-shell part using design of experiment," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 551, Aug. 2019, Art. no. 012027, doi: 10.1088/1757-899X/551/1/012027.
- [22] A. I. Khuri, *Response Surface Methodology and Related Topics*. Singapore: World Scientific, 2006.

แผนผังสายธารคุณค่าและการจำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาทางเลือก ในการลดคอขวดของสายการผลิต : กรณีศึกษาโรงงานผลิตยาฉีดปราศจากเชื้อ

ชาติกวี เจ๊ะสารี¹ ชูตระกูล ศิริไพบูลย์² ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร์^{3*}

^{1,2,3*} แขนงเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, นนทบุรี, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : srisit.chi@stou.ac.th

รับต้นฉบับ : 18 กรกฎาคม 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 20 ธันวาคม 2567; ตอบรับบทความ : 20 ธันวาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

โรงงานผลิตยาในปัจจุบันนอกเหนือจากการพัฒนากระบวนการผลิตให้ได้มาตรฐานสากลแล้ว ยังต้องมีการควบคุมต้นทุนการผลิต เพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขัน จึงจำเป็นต้องกำจัดการกิจกรรมการผลิตที่ไม่สร้างคุณค่าในกระบวนการ งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการเสนอ แนวทางการปรับปรุงกระบวนการในการผลิตของโรงงานผลิตยากลุ่มปราศจากเชื้อทั่วไปผ่านเทคนิคการจำลองสถานการณ์ โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลปริมาณการผลิต มูลค่าต้นทุนในการผลิต และมูลค่าของเสียที่เกิดจากการผลิต แล้วใช้แผนภูมิพาเรโต เพื่อหาผลิตภัณฑ์ยา ที่มีลำดับความสำคัญเพื่อเลือกมาดำเนินการเสนอแนวทางการปรับปรุง จากนั้นจึงทำการสร้างแผนผังสายธารคุณค่าในสถานะปัจจุบัน ซึ่งจะให้เห็นภาพรวมของกระบวนการทั้งหมด รวมทั้งมองเห็นจุดที่เป็นปัญหาคอขวดของกระบวนการ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มา สร้างแบบจำลองในโปรแกรมเทคนิคโมาติก หลังจากนั้นจึงเสนอแนวทางการปรับปรุง 3 สถานการณ์ที่แตกต่างกัน เพื่อปรับสมดุลสาย การผลิตในกระบวนการบรรจุด้วยซึ่งเป็นจุดคอขวด แล้ววิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมจำลองสถานการณ์ พบว่าเมื่อลดเวลาที่เป็นคอขวด ในกระบวนการบรรจุด้วยของสายการผลิต ส่งผลให้ระยะเวลานำจากเดิมสถานการณ์ปัจจุบันใช้เวลา 2 วัน 5 ชั่วโมง 47 นาที 57 วินาที ในสถานการณ์ที่ 1 เพิ่มคน ใช้เวลา 2 วัน 1 ชั่วโมง 48 นาที 27 วินาที (ลดลง 7.42%) ในสถานการณ์ที่ 2 หมุนเวียนคน ใช้เวลา 2 วัน 4 ชั่วโมง 7 นาที 16 วินาที (ลดลง 3.12%) และในสถานการณ์ที่ 3 เพิ่มเครื่องจักร ใช้เวลา 1 วัน 20 ชั่วโมง 27 นาที 12 วินาที (ลดลง 17.37%) ในสถานการณ์ที่ 3 จะลดค่าใช้จ่ายลง 6.00 % แต่มีต้นทุนค่าเครื่องจักรใหม่ ที่มีเวลาต้นทุนในระยะยาว มีผลดีหากมีปริมาณ ความต้องการผลิตสูง เนื่องจากความสามารถในการผลิตเหลือ จึงมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านปริมาณและด้านคุณภาพ

คำสำคัญ : คอขวดในกระบวนการ การปรับสมดุลสายการผลิต การผลิตยา การจำลองสถานการณ์ สายธารคุณค่า

Value Stream Mapping and Simulation Techniques for Considering Bottleneck Reduction Alternatives: A Case Study in A Sterile Pharmaceutical Factory

Chartkawee Jehsaree¹ Chootrakul Siripailboon² Srisit Chianrabutra^{3*}

^{1,2,3*}*Division of Industrial Technology, Department of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: srisit.chi@stou.ac.th

Received: 18 July 2024; Revised: 20 December 2024; Accepted: 20 December 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

In today's competitive market, pharmaceutical companies strive to meet international standards for their production methods while keeping an eye on production costs. Therefore, it is important to eliminate non-value-added activities. This research proposes a method to improve the process of sterile pharmaceutical factory of generic drugs through simulation techniques. Data needs to be collected on production volume, production cost, and cost of defect. In this study, a Pareto chart was used to identify a high-priority product that needed to be improved. A value stream map of the current process was created, providing a comprehensive overview, including bottlenecks. Plant simulation software (Tecnomatix®) was used to test by developing three different scenarios. The efficiency of production line balancing was increased by reducing the bottleneck in the filling process. The study analyzed the current process, which takes 2 days 5 hours 47 minutes 57 seconds. Three scenarios were then tested using plant simulation software. Scenario 1 involved adding additional labor, reducing the processing time to 2 days 1 hour 48 minutes 27 seconds (a decrease of 7.42%). Scenario 2 focused on labor rotation, achieving a time reduction to 2 days 4 hours 7 minutes 16 seconds (a decrease of 3.12%). Finally, scenario 3 explored changing machinery, resulting in the most significant improvement, with a processing time of 1 day 20 hours 27 minutes 12 seconds (a decrease of 17.37%). In scenario 3 reducing employee expenses by 6.00%, there is a cost for new machinery with a long-term return on investment, which is beneficial in cases where future production demand increases. Because the machinery can sufficiently contribute to enhancing efficiency in both quantity and quality aspects.

Keywords: Bottleneck, Line balancing, Pharmaceutical manufacturing, Simulation, Value stream mapping

1) บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตยาในประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้จ่ายด้านสุขภาพที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี พบว่าในปี พ.ศ. 2563 มีมากกว่า 600 พันล้านบาท โดยเป็นมูลค่ายาในประเทศถึง 193 พันล้านบาท [1] เนื่องมาจากสภาวะสังคมไทยในปัจจุบันได้ก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ข้อมูล ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2566 มีจำนวนประชากรผู้สูงอายุที่มีอายุมากกว่า 60 ปี ถึง 13,064,929 คน คิดเป็นร้อยละ 20.08 ของประชากรไทยทั้งหมด 65,061,190 คน ปี พ.ศ. 2565 และ ปี พ.ศ. 2564 เป็นร้อยละ 19.21 และร้อยละ 19.60 ตามลำดับ [2] เป็นผลจากเทคโนโลยีทางการแพทย์และยารักษาโรคที่พัฒนามาก และผู้สูงอายุมีโรคเรื้อรังที่ต้องได้รับยาในการรักษาเรื้อรัง ยาจึงถือเป็นสิ่งจำเป็น โดยประเทศไทยมีทั้งนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนใหญ่เป็นยาต้นแบบ (original drug) มีราคาสูง มักใช้ในภาคเอกชน และยาที่ผลิตในประเทศหรือยาสามัญ (generic drug) มีราคาถูกกว่า ที่ผลิตตามมาตรฐานของยาต้นแบบ เพื่อให้ประชาชนเข้าถึงยาได้ง่ายขึ้น อีกทั้งรัฐบาลได้ออกนโยบายเพื่อช่วยเหลือประชาชนในการเข้าถึงยา จึงเป็นโอกาสของโรงงานผลิตยาที่จะเพิ่มโอกาสในการขายได้มากขึ้น

การแข่งขันที่สูงส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมยาพัฒนายาให้มีคุณภาพ ลดต้นทุน เพื่อให้สามารถแข่งขันได้ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตยากรณีศึกษา เกิดปัญหาจากความไม่สมดุลของกระบวนการผลิต ทำให้เกิดคอขวด ระยะเวลาที่รอนาน (waiting time) ส่งผลให้ไม่ทันต่อความต้องการของฝ่ายขายและลูกค้า ต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บสินค้าคงคลัง (inventory) ในปริมาณที่มาก ส่งผลต่อต้นทุนในระยะยาว แต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันที่มีการนำนวัตกรรมทั้งด้านเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตที่ช่วยในการเพิ่มกำลังการผลิต (capacity) และคุณภาพหรือความถูกต้อง และเครื่องมือที่ช่วยในการวางแผนการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น โปรแกรมจำลองกระบวนการ (plant simulation) มีหลายอุตสาหกรรมได้นำมาประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น ลดระยะเวลารอคอย สายการผลิตมีความสมดุล ลดสินค้าคงคลังเพิ่มกำลังการผลิต เป็นต้น ดังเช่น งานวิจัยสายการผลิต การประกอบโครงย่อยของเบาะรองนั่ง [3] และงานวิจัยที่ใช้โปรแกรมช่วยเพื่อทดสอบสถานการณ์ เพื่อหาทางเลือกที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จึงทำให้สามารถทดสอบกระบวนการที่หลากหลายก่อนที่จะนำไปปฏิบัติจริง จะช่วยลดโอกาสจากความผิดพลาดที่เกิดจากการลงทุน หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่คาดคิด ส่งผลในการลดต้นทุนในการผลิตในระยะยาว [4]–[6] หรือในการตรวจสอบคุณภาพใน

โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อหาจำนวนพนักงานที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ ส่งผลให้มีระยะเวลารอคอยลดลง และการผลิตเกิดความสมดุลในกระบวนการ [7] หรือเพื่อดูโลจิสติกส์หรือผังโรงงานที่มีประสิทธิภาพที่สุด โดยดูข้อมูลของเวลาและระยะทางหรืออื่น ๆ [8], [9]

ในงานวิจัยมีการผสมผสานเครื่องมือต่าง ๆ เช่น โปรแกรมจำลองกระบวนการ แผนผังสายธารคุณค่า เทคนิคพาเรโต ดังเช่นงานวิจัยที่นำโปรแกรมจำลองสถานการณ์ไปประยุกต์กับแผนผังสายธารคุณค่าและได้ใช้เทคนิค ABC เพื่อเลือกสินค้าที่จะใช้เก็บข้อมูลจากจำนวนที่มีการผลิตมากที่สุด [10] และทฤษฎีข้อจำกัดหรือคอขวด ที่มีการวิจัยในการใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ในการหาจุดคอขวดของกระบวนการ [11] มีการใช้ร่วมกับเทคนิค Ranked Positional Weight Method (RPWM) เพื่อสร้างเวลามาตรฐานในกระบวนการ ลดเวลาที่สูญเสียไปจากกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต และทดสอบความคุ้มค่าของการออกแบบผังการผลิตในโรงงานผลิตกระเป๋ [12] เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจาก COVID-19 โดยใช้โปรแกรมกำหนดการเว้นระยะห่างทางสังคม (social distancing) เพื่อกำหนดพื้นที่การทำงาน [13]

การนำโปรแกรมจำลองสถานการณ์มาใช้ เพื่อหาทางเลือกที่มีประสิทธิภาพที่สุด สามารถประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ จำลองการไหลของข้อมูลและการควบคุม, กระบวนการขนส่ง, การทำงานของหุ่นยนต์, คลังสินค้าและการจัดซื้อจัดจ้าง, การทำงานของคน, การไหลของของเหลวในกระบวนการ โดยแสดงได้ในรูปแบบ 2 หรือ 3 มิติ และสามารถทราบถึงต้นทุนและพลังงานในกระบวนการด้วย งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการจำลองของกระบวนการผลิต [14]

งานวิจัยนี้ ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ เป็นอุตสาหกรรมผลิตยาที่มีเครื่องจักรที่เฉพาะ มีการพักเก็บที่คลังสินค้าระหว่างการผลิต ไม่ได้ผลิตแบบต่อเนื่อง และมุ่งเน้นในการใช้เครื่องมือในโปรแกรมจำลองสถานการณ์ เพื่อปรับสมดุลสายการผลิต และเพิ่มเครื่องจักร รวมทั้งการประยุกต์เทคนิค ABC method ร่วมด้วย เพื่อเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อบริษัท (product champion) เนื่องจากมีสินค้าหลากหลาย และประยุกต์ใช้เทคนิคสายธารคุณค่า (Value Stream Mapping) ทำให้เห็นภาพรวมของกระบวนการ ประเมินความต้องการลูกค้าเพื่อกำหนดระยะเวลาในการผลิตที่เหมาะสม

โรงงานอุตสาหกรรมผลิตยา ที่เคยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีการพัฒนาและแก้ปัญหาของกระบวนการโดยใช้เทคนิคสายธารคุณค่า (VSM) ร่วมกับ PDCA [15] หรือใช้ระบบการผลิตแบบลีน (lean manufacturing) [16], [17] โดยที่โรงงานกรณีศึกษาเกิดปัญหาจากความไม่สมดุลของกระบวนการผลิตเนื่องจากมีสินค้าคงคลังค้างระหว่างการผลิตจำนวนมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากคอขวดในขั้นตอนที่ความสามารถในการผลิต (capacity) ส่งผลให้ใช้ระยะเวลารอคอยก่อนเริ่มการผลิต ดังตารางที่ 1 จึงทำให้ผลิตไม่ทันต่อความต้องการของฝ่ายขายและลูกค้า

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงต้องการศึกษาการใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ ที่จะช่วยจัดสมดุลสายการผลิตในด้านจำนวนผลผลิตที่ได้ ระยะเวลาในการผลิต การลดขั้นตอนคอขวดของกระบวนการ เพื่อที่จะหาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดไปสู่การปฏิบัติจริง

ใช้โปรแกรมเทคนิค (Tecnomatix®) มีจุดเด่น ได้แก่ การเครื่องมือที่หลากหลายกว่าสำหรับการวางแผนและปรับปรุงกระบวนการผลิต เช่น งานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันสายธารคุณค่า (VSM), วิเคราะห์ปัญหาคอขวด (bottlenecks analyzer) การสร้างโมเดลในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ความสามารถในการเชื่อมต่อกับระบบอื่น (data interfaces) เป็นต้น [18] การนำข้อมูลดิบที่ใส่ในโปรแกรมได้มาก เหมาะสำหรับการออกแบบระบบที่มีความซับซ้อนสูง ในระบบการผลิตอัตโนมัติขนาดใหญ่ ทำให้การจำลองมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง [19]

ตารางที่ 1 : ระยะเวลาการรอคอยการผลิตในแต่ละขั้นตอน

สินค้า	ระยะเวลาการรอคอยการผลิตในแต่ละขั้นตอน (วัน)			
	ผสม	บรรจุด้วยยา	ตรวจสอบอนุภาค	บรรจุ
P4	1.5	10.0	1.6	2.4
P5	1.0	10.0	4.0	4.0
P9	0.5	12.4	2.6	2.0
P10	1.0	5.0	1.0	1.0
P14	1.2	12.7	2.8	1.0
P20	0.0	13.0	3.0	2.0
P23	1.0	0.0	11.0	6.0
P26	1.0	11.0	3.0	2.0
เฉลี่ย	0.9	9.3	3.6	2.5

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสมดุลสายการผลิตในด้านจำนวนผลผลิตที่ได้ ระยะเวลาในการผลิต การลดขั้นตอนคอขวด โดยใช้แผนผังสายธารคุณค่าในสภาวะปัจจุบันและอนาคต (current state and future state)
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสมดุลสายการผลิตในด้านจำนวนผลผลิตที่ได้ ระยะเวลาในการผลิต การลดขั้นตอนคอขวด โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการผลิตในการสร้างแต่ละสถานการณ์ (scenario)
3. เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าของการนำเครื่องจักรใหม่แทนการใช้คนในกระบวนการบรรจุด้วยยา

3) วิธีดำเนินการวิจัย

ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์เทคนิค (Tecnomatix®) เวอร์ชัน 15 บนเครื่องคอมพิวเตอร์ HP รุ่น Pavilion ผ่านระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1) สภาวะปัจจุบันของกระบวนการ

โรงงานกรณีศึกษากลุ่มยาปราศจากเชื้อทั่วไป เป็นยา กลุ่มที่มีกำลังการผลิตและยอดขายสูงสุดของโรงงาน ซึ่งมีทั้งสิ้น 26 รายการ (P1-P26) ที่มีกระบวนการในการผลิต ดังนี้

3.1.1) ขั้นตอนล้างขวดแอมพูล (Ampule Washing) ผ่านเครื่องล้างด้วยน้ำที่มีแรงดัน และอบเพื่อให้ปราศจากเชื้อตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดที่ได้ตรวจสอบความเหมาะสม (validation)

3.1.2) ขั้นตอนผสม (Mixing) มีทั้งสารออกฤทธิ์ทางเภสัชกรรม (active pharmaceutical ingredients) และสารช่วยทางเภสัชกรรม (excipients) ต้องใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายและถูกส่งผ่านตัวกรองเพื่อให้ยาปราศจากเชื้อ

3.1.3) ขั้นตอนบรรจุด้วยยา (Filling) มีเข็มที่เป่าไนโตรเจนเข้าไปในหลอดเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แล้วเข็มบรรจุด้วยยาตามปริมาตร และเผาปลายหลอดแอมพูลเพื่อซีล เป็นขั้นตอนที่ต้องทำภายใต้เครื่องที่เป็นระบบปิดเพื่อให้ปราศจากเชื้อ

3.1.4) ขั้นตอนตรวจสอบอนุภาค (Inspection) กระบวนการผลิตอาจจะมีอนุภาคเข้าไปในหลอดยาได้ จึงต้องตรวจสอบอนุภาคในทุกหลอด เนื่องจากหากยาเข้าสู่กระแสเลือดจะส่งผลกระทบต่อร่างกายถึงชีวิตได้โดยทำในฉากหลังที่เป็นสีขาวและสีดำ

3.1.5) ขั้นตอนบรรจุ (Ampule Packing) บรรจุลงภาชนะพลาสติกก่อน แล้วจึงนำบรรจุใส่กล่องกระดาษพร้อมกับเอกสารกำกับยา และจะต้องพิมพ์รุ่นผลิต วันผลิต และวันหมดอายุ

3.2) ศึกษาปัญหาของกระบวนการ

เริ่มต้นจากเก็บข้อมูลที่เป็น จากนั้นจัดกลุ่มโดยเทคนิคพาเรโตตามปริมาณการผลิต มูลค่าสินค้าและประมาณของเสีย เพื่อให้ได้ยาที่จะนำมาศึกษา แล้วจึงเขียนแผนผังสายธารคุณค่าในสภาวะปัจจุบันด้วยโปรแกรม และสร้างสถานการณ์ทางเลือกอื่น ๆ เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขจุดคอขวดของกระบวนการ เพื่อให้การผลิตมีความสมดุล แล้วจึงทดสอบเดินเครื่องจักรผลิต 1 เดือน เพื่อประเมินผลที่ได้ เปรียบเทียบถึงข้อดีข้อเสีย เพื่อเป็นทางเลือกนำไปปรับใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ตามขั้นตอน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : ขั้นตอนการศึกษาปัญหาและวิธีวิจัย

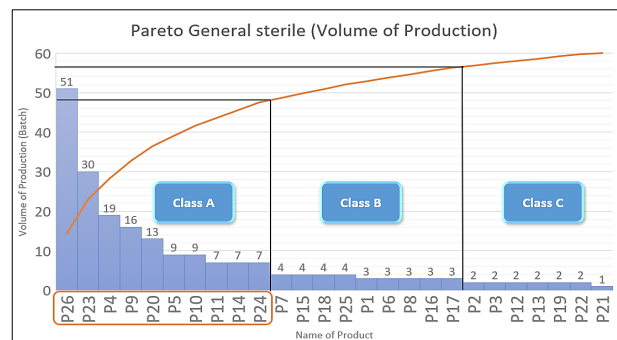
ข้อมูลที่ในงานวิจัยจากการเก็บข้อมูลการผลิตยาของโรงงานกรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตยาสามัญ (local drug) โดยใช้ระยะเวลาเก็บข้อมูลการผลิต 1 ปี ของปี พ.ศ. 2563 และศึกษาในไลน์การผลิตยาชนิดยาฉีดทั่วไป เนื่องจากมีการผลิตมากที่สุด และมีความต้องการของลูกค้ามากที่สุด มีการผลิตอยู่ทั้งสิ้น 26 ตัวยา มีจำนวนผลิตได้รวม 212 ล็อต

เพื่อต้องการศึกษาภาพรวมทั้งหมด ต้องเลือกยาที่จะนำมาศึกษากระบวนการ และเป็นต้นแบบในการทำแผนผังสายธารคุณค่า โดยเลือกใช้เทคนิคพาเรโต ในการจัดลำดับยากรณีศึกษาทั้ง 26 ชนิด ใช้ชื่อ P1–P26 แบ่งเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

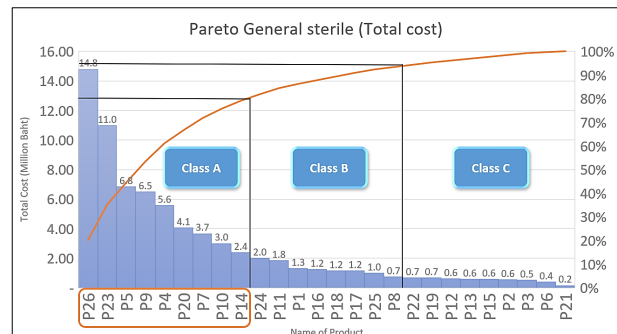
3.2.1) จัดกลุ่มตามปริมาณการผลิต นำข้อมูลของปริมาณการผลิตมียาในกลุ่มพาเรโต 80% (กลุ่ม A) ได้แก่ P26, P23, P4, P9, P20, P5, P10, P11, P14 และ P24 ดังรูปที่ 2

3.2.2) จัดกลุ่มตามมูลค่า นำข้อมูลของมูลค่าการผลิตมียาในกลุ่มพาเรโต 80% ได้แก่ P26, P23, P5, P9, P4, P20, P7, P10 และ P14 ดังรูปที่ 3

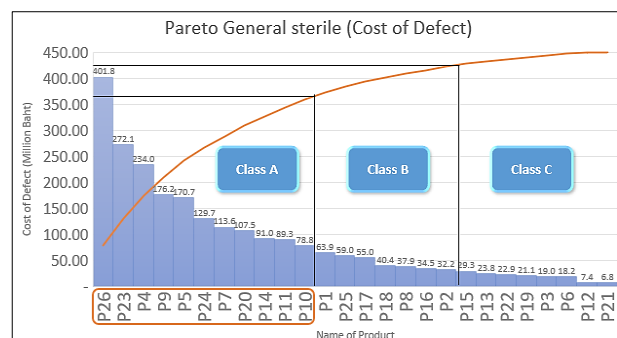
3.2.3) จัดกลุ่มตามปริมาณของเสีย นำข้อมูลของปริมาณของเสียมียาในกลุ่มพาเรโต 80% ได้แก่ P26, P23, P4, P9, P5, P24, P7, P20, P14, P11 และ P10 ดังรูปที่ 4



รูปที่ 2 : การจัดกลุ่มยาตามปริมาณการผลิต



รูปที่ 3 : การจัดกลุ่มยาตามมูลค่า



รูปที่ 4 : การจัดกลุ่มยาตามมูลค่าของเสีย

ตารางที่ 2 : ขั้นตอนการได้มาซึ่งกลุ่ม A

จัดกลุ่มตาม			สินค้า	สินค้าอยู่ กลุ่ม A ทั้ง 3 กลุ่ม
มูลค่าของ เสีย (พันบาท)	ปริมาณการผลิต (ล็อต)	มูลค่า (ล้าน บาท)		
401.8	51	14.8	P26	ไม่ใช่
272.1	30	11	P23	ใช่
234	19	5.6	P4	ใช่
176.2	16	6.5	P9	ใช่
170.7	9	6.8	P5	ใช่
129.7	7	2	P24	ไม่ใช่
113.6	4	3.7	P7	ไม่ใช่
107.5	13	4.1	P20	ใช่
91	7	2.4	P14	ใช่
89.3	7	1.8	P11	ไม่ใช่
78.8	9	3	P10	ใช่
63.9	3	1.3	P1	ไม่ใช่
59	4	1	P25	ไม่ใช่
55	3	1.2	P17	ไม่ใช่
40.4	4	1.2	P18	ไม่ใช่
37.9	3	0.7	P8	ไม่ใช่
34.5	3	1.2	P16	ไม่ใช่
32.2	2	0.6	P2	ไม่ใช่
29.3	4	0.6	P15	ไม่ใช่
23.8	2	0.6	P13	ไม่ใช่
22.9	2	0.7	P22	ไม่ใช่
21.1	2	0.7	P19	ไม่ใช่
19	2	0.5	P3	ไม่ใช่
18.2	3	0.4	P6	ไม่ใช่
7.4	2	0.6	P12	ไม่ใช่
6.8	1	0.2	P21	ไม่ใช่

ยาที่อยู่ในกลุ่ม A รวมกันของข้อมูลทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ ยา P4 ยา P5 ยา P9 ยา P10 ยา P14 ยา P20 ยา P23 และ P26 ดังตารางที่ 2 นำไปเก็บข้อมูลเชิงลึก ใช้ในการวิเคราะห์และใช้เป็นต้นแบบสำหรับการทำแผนผังสายธารคุณค่า

3.3) กำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหา

นำข้อมูลดิบจากการลงข้อมูลการทำงานประจำวันผ่านโปรแกรมที่พัฒนาจาก Microsoft Excel มาจัดทำกลุ่มข้อมูล

3.3.1) ข้อมูลชุดที่ 1 ได้แก่ รอบเวลาการผลิต, เวลาที่ใช้เปลี่ยนรุ่นผลิต, ขนาดรุ่นผลิต, ปริมาณเฉลี่ยที่ผลิต, จำนวนพนักงาน, สินค้าคงคลัง, เวลาในการผลิตรวม กรองข้อมูลโดยการเลือกข้อมูลที่เป็นยาเดียวกันที่อยู่ในกระบวนการเดียวกัน เพื่อที่จะได้นำข้อมูลของชั่วโมงแรงงานมาหาค่าเฉลี่ยโดยชั่วโมงแรงงานคำนวณจากเวลาที่ใช้คูณด้วยจำนวนพนักงานที่ใช้แล้วจึงนำจำนวนของผลิตภัณฑ์ที่ได้เพื่อนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ ก็จะได้ภาพรวมของชั่วโมงแรงงานและสัดส่วนผลผลิต ดังรูปที่ 5

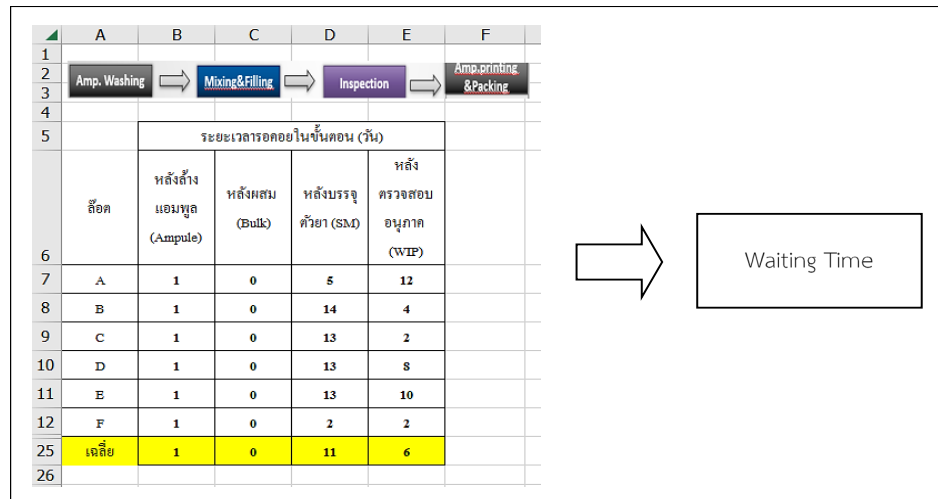
3.3.2) การจัดทำข้อมูลชุดที่ 2 สำหรับข้อมูลลงในสายธารคุณค่า ได้แก่ เวลาในการรอ (waiting time) ต้องกรองข้อมูล โดยการเลือกข้อมูลที่เป็นหมายเลขล็อตเดียวกัน เพื่อที่จะได้นำข้อมูลของระยะเวลาที่รอกอยของแต่ละกระบวนการโดยดูจากวันที่ที่ต่างกัน หลังจากที่ได้ข้อมูลระยะเวลาการรอกอยของแต่ละกระบวนการแล้ว จึงนำระยะเวลารอคอยของยานั้น ๆ ทุกล็อตมาหาค่าเฉลี่ยของกระบวนการทั้งหมด ดังรูปที่ 6

3.3.3) รวบรวมข้อมูลชุด 1 และ 2 ที่จะใช้เป็นข้อมูลในแบบจำลองของกระบวนการผลิตของยาแต่ละตัว ดังตารางที่ 3 และข้อมูลระยะเวลาการรอกอยเฉลี่ยของทุกกระบวนการ ดังตารางที่ 4 ร่วมกับข้อมูลประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (OEE) ดังตารางที่ 5

	A	B	D	F	H	I	K
1							
2							
3		ขั้นตอน	ชั่วโมงแรงงาน	ผลผลิต (%)	พนักงาน (คน)	MH/P	รอบระยะเวลาการผลิต (ชั่วโมง)
4		ล้างขวดแอมพูล	82.11	101.66	8	10.3	8.8
9		ผสม	19.00	100.00	2	9.5	8.5
14		บรรจุขวดยา	88.20	93.46	6	14.7	13.7
19		ตรวจสอบคุณภาพ	196.17	95.29	24	8.2	7.7
26		บรรจุ	207.79	95.03	10	20.8	19.8

- Cycle Time
- Change Over Time
- Batch Size
- Yield
- Manpower
- Processing Time

รูปที่ 5 : ข้อมูลดิบจากการเก็บข้อมูล ชุดที่ 1



รูปที่ 6 : ข้อมูลดิบจากการเก็บข้อมูล ชุดที่ 2

ตารางที่ 3 : ข้อมูลของกระบวนการผลิตของยาแต่ละตัว

ยา	กระบวนการ	ชั่วโมงแรงงาน	ผลผลิต (%)	พนักงาน (คน)	เวลาเปลี่ยนรุ่นผลิต (ชั่วโมง)	รอบเวลาการผลิต (ชั่วโมง)
P4	ล้างขวดแอมพูล	60.56	103.41	8	1.5	6.07
	ผสม	10.40	100.00	2	1	4.20
	บรรจุขวดยา	88.40	90.11	6	1	13.73
	ตรวจสอบอนุภาค	168.00	93.17	24	0.5	6.50
	บรรจุ	136.39	91.38	10	1	12.64
P5	ล้างขวดแอมพูล	142.00	99.76	8	1.5	16.3
	ผสม	33.45	100.00	2	1	15.7
	บรรจุขวดยา	164.65	94.58	6	1	26.4
	ตรวจสอบอนุภาค	395.68	93.12	24	0.5	16.0
	บรรจุ	426.32	93.29	10	1	41.6
P9	ล้างขวดแอมพูล	71.14	102.54	8	1.5	7.4
	ผสม	15.43	100.00	2	1	6.7
	บรรจุขวดยา	85.57	97.47	6	1	13.3
	ตรวจสอบอนุภาค	209.11	94.37	24	0.5	8.2
	บรรจุ	137.71	94.18	10	1	12.8
P10	ล้างขวดแอมพูล	81.29	100.98	8	1.5	8.7
	ผสม	19.50	100.00	2	1	8.8
	บรรจุขวดยา	86.64	92.03	6	1	13.4
	ตรวจสอบอนุภาค	216.79	94.52	24	0.5	8.5
	บรรจุ	146.58	94.36	10	1	13.7
P14	ล้างขวดแอมพูล	70.60	102.59	8	1.5	7.33
	ผสม	16.08	100.00	2	1	7.04
	บรรจุขวดยา	85.40	98.15	6	1	13.23
	ตรวจสอบอนุภาค	211.08	92.18	24	0.5	8.30
	บรรจุ	122.58	92.02	10	1	11.26

ตารางที่ 3 : ข้อมูลของกระบวนการผลิตของยาแต่ละตัว (ต่อ)

ยา	กระบวนการ	ชั่วโมงแรงงาน	ผลผลิต (%)	พนักงาน (คน)	เวลาเปลี่ยนรูปผลิต (ชั่วโมง)	รอบเวลาการผลิต (ชั่วโมง)
P20	ล้างขวดแอมพูล	68.56	102.21	8	1.5	7.1
	ผสม	15.00	100.00	2	1	6.5
	บรรจุตัวยา	83.44	92.84	6	1	12.9
	ตรวจสอบอนุภาค	183.94	94.27	24	0,5	7.2
	บรรจุ	182.00	93.72	10	1	17.2
P23	ล้างขวดแอมพูล	82.11	101.66	8	1.5	8.8
	ผสม	19.00	100.00	2	1	8.5
	บรรจุตัวยา	88.20	93.46	6	1	13.7
	ตรวจสอบอนุภาค	196.17	95.29	24	0.5	7.7
	บรรจุ	207.79	95.03	10	1	19.8
P26	ล้างขวดแอมพูล	73.84	102.54	8	1.5	7.7
	ผสม	18.74	100.00	2	1	8.4
	บรรจุตัวยา	86.28	96.24	6	1	13.4
	ตรวจสอบอนุภาค	190.78	96.22	24	0.5	7.4
	บรรจุ	181.27	95.91	10	1	17.1

ตารางที่ 4 : ข้อมูลของระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของทุกกระบวนการ

ระยะเวลาการรอคอยในขั้นตอน (วัน)				
ยา	หลังล้าง แอมพูล (Ampule)	หลังผสม (Bulk)	หลังบรรจุ ตัวยา (SM)	หลังตรวจสอบ อนุภาค (WIP)
P4	2	0	10	2
P5	1	0	10	8
P9	1	0	12	6
P10	1	0	5	6
P14	1	0	13	6
P20	1	0	13	5
P23	1	0	11	6
P26	1	0	11	5

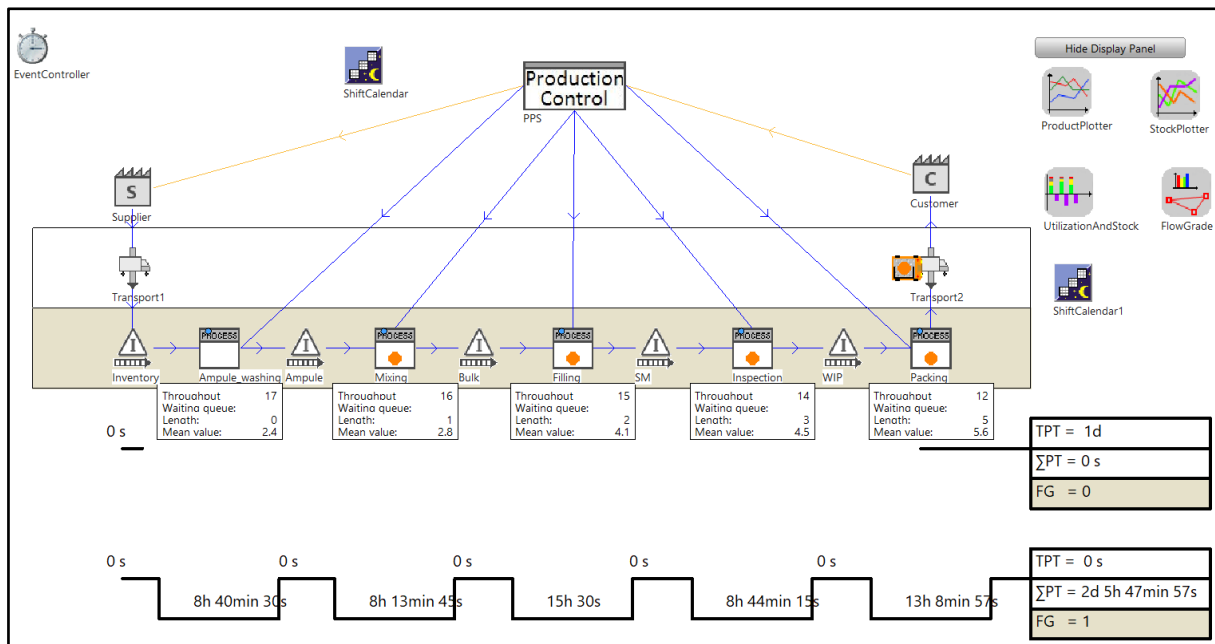
ตารางที่ 5 : ข้อมูลประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (OEE)

กระบวนการ	อัตราการใช้ เครื่อง (%) (Availability)	ประสิทธิภาพของ เครื่องจักร (%) (Performance)	อัตรา คุณภาพ (%) (Quality)	OEE
ล้างขวด แอมพูล	83.33	69.20	99.96	30
ผสม	89.58	78.47	100.00	15
บรรจุตัวยา	87.50	42.00	94.36	30
ตรวจสอบ อนุภาค	94.44	77.89	94.14	10
บรรจุ	90.28	49.50	93.73	10

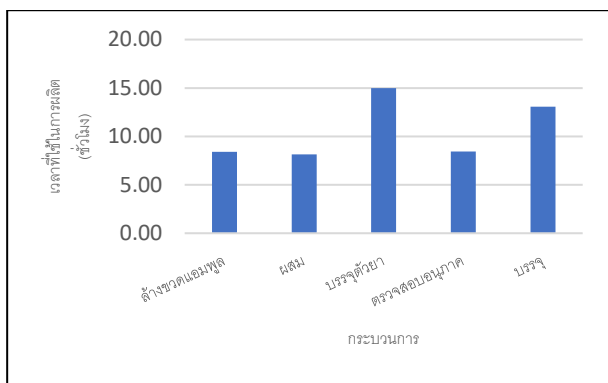
3.3.4) การนำค่ามาใช้ในแบบจำลองสถานการณ์ ลงข้อมูลกระบวนการผลิตขั้นตอนล้างขวดแอมพูล ขั้นตอนผสม ขั้นตอนบรรจุตัวยา ขั้นตอนตรวจสอบอนุภาค ขั้นตอนบรรจุ จากนั้นใส่ข้อมูลชุดที่ 1 ลงในกล่อง ได้แก่ ชั่วโมงแรงงานเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ผลผลิต และใส่ข้อมูลระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ย จากข้อมูลชุดที่ 2 รวมทั้งข้อมูลจากฝ่ายวิศวกรรม ได้แก่ อัตราการเดินเครื่องและเวลาเฉลี่ยในการซ่อมเครื่องจักร และข้อมูลของสินค้าคงคลัง จะได้เวลาที่ใช้ในการผลิตรวม และเวลานำ เพื่อจัดทำแผนผังสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบันของยาในกลุ่ม A กำหนดเวลา 30 วัน ดังรูปที่ 7 และกราฟแสดงเวลาในการผลิตของแต่ละกระบวนการดังรูปที่ 8

วิเคราะห์รายตัวโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ระดับการไหล (analyzer tool flow grade) ในโปรแกรมเทคนิคมาติก โดยเริ่มขั้นตอนแรก (supplier) ถึงขั้นตอนสุดท้าย (customer) ของยาทุกตัวในกลุ่ม A ดังตารางที่ 6 ได้แก่ ค่าของเวลานำ (lead time) คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตยาแต่ละตัวตั้งแต่รับคำสั่งผลิตจนกระทั่งส่งมอบถึงลูกค้า และ ค่าดัชนีมูลค่าเพิ่ม (value added index) คือ ตัวชี้วัดที่แสดงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต

พบปัญหาว่าขั้นตอนบรรจุตัวยาใช้เวลาสูงกว่าขั้นตอนอื่น ส่งผลให้กระบวนการผลิตไม่มีความสมดุล เกิดเวลารอคอย จึงเป็นขั้นตอนที่จะนำไปใช้ในการศึกษาแนวทางการปรับปรุงแก้ไข



รูปที่ 7 : แผนผังสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบันของยา กลุ่ม A



รูปที่ 8 : กราฟแท่งแสดงเวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละกระบวนการ

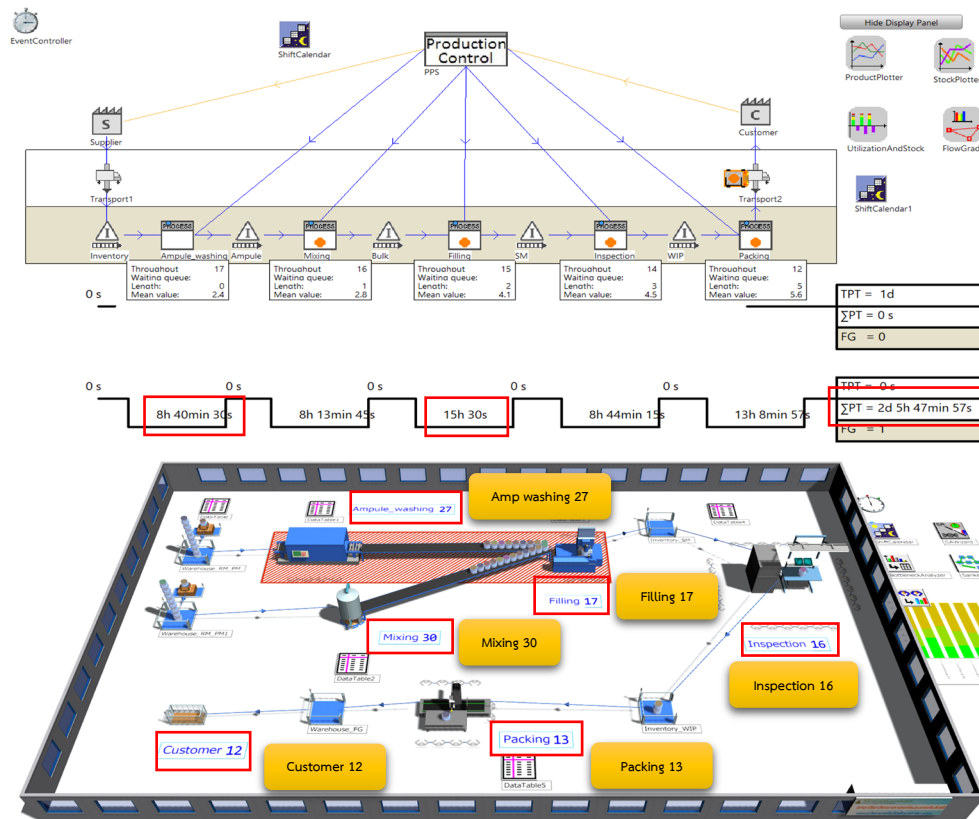
ตารางที่ 6 : ค่าของเวลานำและดัชนีมูลค่าเพิ่ม

ยา	เวลานำ	ดัชนีมูลค่าเพิ่ม
P4	2:19:08	64.25
P5	4:03:05	75.78
P9	3:00:24	60.05
P10	3:05:06	68.87
P14	2:23:10	66.28
P20	3:02:54	67.96
P23	3:10:30	70.91
P26	3:06:06	69.27

3.4) ดำเนินการปรับปรุงแก้ไข

แนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการ เพื่อเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน ดังรูปที่ 9

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ใช้การตรวจสอบความสอดคล้องผ่านการเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง (comparison with real-world data) [20] ข้อมูลจากการจำลองในโปรแกรมเทียบกับข้อมูลจริง หากผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน แสดงว่าแบบจำลองมีความสอดคล้อง เปอร์เซ็นต์ผลต่างระหว่างข้อมูลจริงกับแบบจำลองควรมีค่าไม่เกินสิบเปอร์เซ็นต์ [3] และการทำงานในโปรแกรมต้องมีพฤติกรรมและกระบวนการผลิตเช่นเดียวกับการปฏิบัติจริง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองเป็นตัวแทนสามารถนำไปใช้ในการออกแบบการจำลองทางเลือกอื่น ๆ ได้ การตรวจสอบความถูกต้อง เทียบ 2 ส่วน ส่วนแรกใช้ข้อมูลเวลารวมในการผลิตของสินค้าแต่ละตัวของข้อมูลจริงเทียบกับจากโปรแกรม และส่วนที่สองใช้เวลาเฉลี่ยกระบวนการจริงเทียบกับโปรแกรม เทียบความแตกต่าง ดังตารางที่ 7 และแต่ละสถานการณ์มีความแตกต่างกัน ดังสรุปในตารางที่ 8



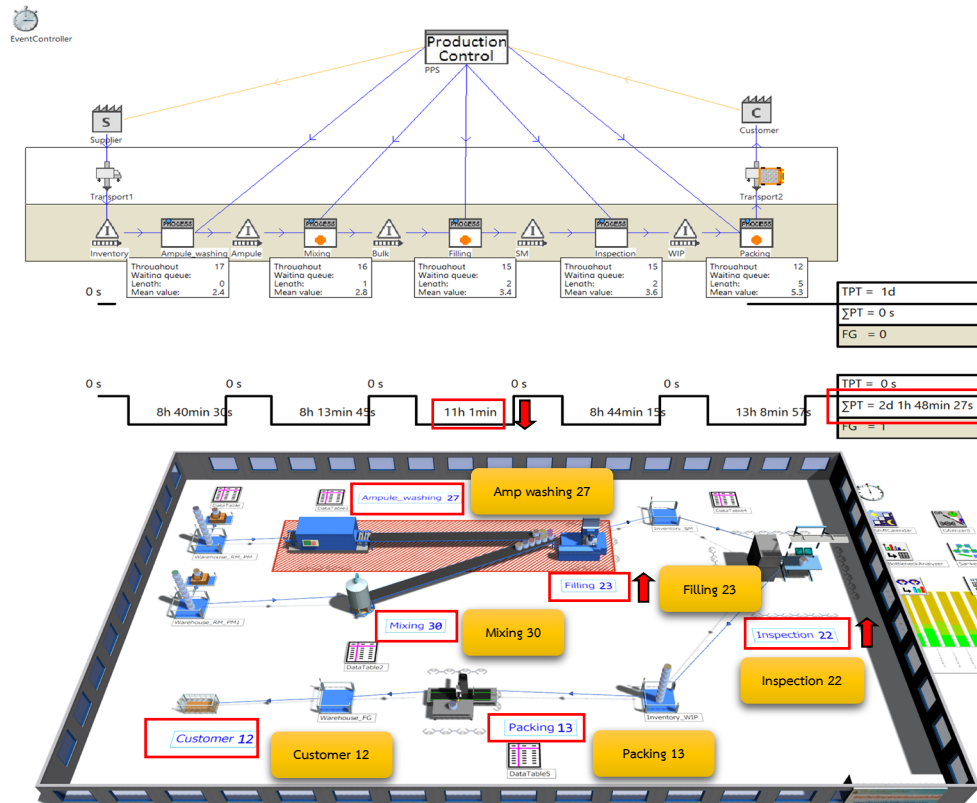
รูปที่ 9 : แบบจำลองสถานการณ์ปัจจุบัน

ตารางที่ 7 : การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์

กระบวนการ	สินค้า								เวลาเฉลี่ยจากกระบวนการ (ชั่วโมง)	เวลาเฉลี่ยจากโปรแกรมจำลอง (ชั่วโมง)	ส่วนต่าง (%)
	P4	P5	P9	P10	P14	P20	P23	P26			
ล้างขวดแอมพูล	6.1	16.3	7.4	8.7	7.3	7.1	8.8	7.7	8.68	8.67	0.06
ผสม	4.2	15.7	6.7	8.8	7.0	6.5	8.5	8.4	8.23	8.22	0.12
บรรจุตัวยาล	13.7	26.4	13.3	13.4	13.2	12.9	13.7	13.4	15.01	15.00	0.05
ตรวจสอบอนุภาค	6.5	16.0	8.2	8.5	8.3	7.2	7.7	7.5	8.74	8.73	0.09
บรรจุ	12.6	8.6	12.8	13.7	11.3	17.2	19.8	17.1	14.14	13.13	7.13
เวลารวม (ชั่วโมง)	43.14	83.00	48.40	53.10	47.20	50.90	58.50	54.10			
เวลารวมจากโปรแกรมจำลอง (ชั่วโมง)	42.96	75.12	48.00	53.04	47.08	49.92	58.08	54.00			
ส่วนต่าง (%)	0.42	9.49	0.83	0.11	0.25	1.93	0.72	0.18			

ตารางที่ 8 : การเปรียบเทียบสถานการณ์ทั้ง 3 รูปแบบ

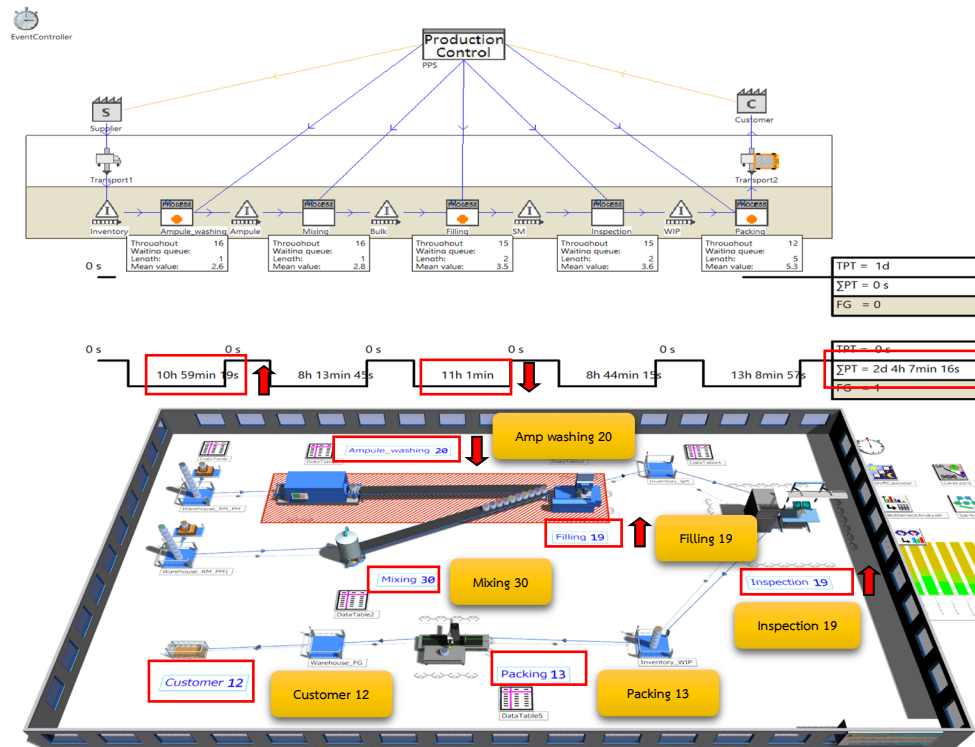
สถานการณ์	ปรับปรุงกระบวนการ	ระยะเวลาในขั้นตอนบรรจุด้วย
ปัจจุบัน	ขั้นตอนบรรจุด้วย 6 คน	15 ชั่วโมง 30 วินาที
1	เพิ่มจำนวนพนักงาน 2 คนในขั้นตอนบรรจุด้วย (อัตราการทำงานเท่าเดิม)	11 ชั่วโมง 1 นาที
2	โยกย้ายคนจากแผนกล้างขวดแอมพูล 2 คนมาช่วยในแผนกบรรจุด้วย	11 ชั่วโมง 1 นาที (แต่ขั้นตอนล้างขวดแอมพูลเพิ่มจาก 8 ชั่วโมง 40 นาที เป็น 10 ชั่วโมง 59 นาที)
3	ใช้เครื่องจักร (อัตราการทำงาน 27,000 หลอดต่อชั่วโมง) ทดแทนเครื่องจักรเก่าในขั้นตอนบรรจุด้วย (อัตราการทำงาน 14,280 หลอดต่อชั่วโมง)	5 ชั่วโมง 39 นาที 45 วินาที



รูปที่ 10 : แบบจำลองสถานการณ์ที่ 1

3.4.1) สถานการณ์ที่ 1 เพิ่มพนักงานในขั้นตอนบรรจุด้วย ใช้เวลาลดลงจาก 15 ชั่วโมง 30 วินาที เหลือ 11 ชั่วโมง 1 นาที ดังรูปที่ 10 การเพิ่มพนักงาน 2 คน แก้ไขได้ง่าย ไม่มีผลกระทบต่อส่วนอื่น ช่วยเพิ่มกำลังการผลิต จากแนวคิดการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน (cost-benefit analysis) [21] โดยเพิ่มปัจจัยการผลิต คือ บุคลากร แต่ต้องประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนเทียบกับผลตอบแทนที่ได้ ระบุดัชนีทุนและผลประโยชน์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง ต้นทุน-ผลตอบแทนต่อหน่วย (benefit-cost ratio) หากสูงกว่า 1 หมายความว่าโครงการนั้นมีผลตอบแทนสูงกว่าต้นทุนและนำลงทุน ควรพิจารณาผลตอบแทนทั้งทางตรง

และทางอ้อม เช่น ลดจุดคอขวดของกระบวนการ สามารถส่งสินค้าได้ตามความต้องการของลูกค้า ปัจจุบันมีเครื่องบรรจุอยู่ 2 เครื่อง มีผู้ดูแลเครื่องละ 3 คน จึงเพิ่มพนักงาน 1 คนต่อ 1 เครื่อง และการเพิ่มจำนวนคนที่มากเกินไป เช่น 4 หรือ 6 คน อาจจะไม่ได้ทำให้กำลังการผลิตมากขึ้นแบบเท่าตัว เนื่องจากเครื่องจักรมีกำลังการผลิตจำกัด ทางเลือกนี้จึงเหมาะสมในกรณีที่ฝ่ายทรัพยากรบุคคลสามารถหาพนักงานมาให้ได้ และลูกค้ามีความต้องการมากกว่าในปัจจุบัน โดยสามารถลดเวลารวมที่ใช้ลงได้ 3 ชั่วโมง 59 นาที 30 วินาที (7.42%)



รูปที่ 11 : แบบจำลองสถานการณ์ที่ 2

3.4.2) สถานการณ์ที่ 2 ย้ายพนักงานจากแผนกล้างขวด แอมพูล 2 คนมาช่วยแผนกบรรจุด้วยยา ทำให้ขั้นตอนล้างขวด แอมพูลเวลาเพิ่มขึ้นจาก 8 ชั่วโมง 40 นาที 30 วินาที เป็น 10 ชั่วโมง 59 นาที 19 วินาที และใช้เวลาในกระบวนการคอคขวด ลดลงจาก 15 ชั่วโมง 30 วินาที เหลือ 11 ชั่วโมง 1 นาที ดังรูปที่ 11

สถานการณ์นี้ ไม่มีการเพิ่มต้นทุน แต่ย้ายได้เมื่อแผนกอื่น มีงานลดลงหรือสินค้าคงคลังเพียงพอ จากทฤษฎีการพัฒนา บุคลากร (human resource development) การสลับหน้าที่ งานว่าเป็นส่วนหนึ่งของการจัดการทรัพยากรมนุษย์ เป็นวิธี พัฒนาบุคลากรให้มีความรู้ความสามารถหลากหลาย ช่วยเพิ่ม แรงจูงใจ (motivation) ลดความเหนื่อยล้าจากการทำงานซ้ำ ๆ ช่วยลดปัญหาความล่าช้าหรือการหยุดชะงักของกระบวนการ ผลิตหากมีพนักงานบางส่วนขาดงาน ช่วยให้พนักงานมองเห็น ภาพรวมของกระบวนการทำงาน และสร้างความรู้สึกร่วมกัน ร่วม ในการผลิตโดยรวม ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น [22] สถานการณ์นี้เหมาะในกรณีที่ไม่สามารถหาพนักงานเพิ่มได้ หรือ ต้องจำกัดต้นทุน หรือไม่มงบประมาณ เมื่อดูผลจากการจำลองใน โปรแกรม มีสมดุลการผลิตดีขึ้น จากขั้นตอนล้างขวดแอมพูลมี กำลังการผลิตเพียงพอต่อการส่งผลิตในขั้นต่อไป ส่งผลให้สินค้า

คงคลังหรือระหว่างขั้นตอนลดลง เวลารวมลดลงจาก สถานการณ์ปัจจุบันได้ 1 ชั่วโมง 40 นาที 41 วินาที (3.12%)

3.4.3) สถานการณ์ที่ 3

ใช้เครื่องจักรทดแทนพนักงานทั้งหมดในขั้นตอนคอคขวด จึง ทำให้ขั้นตอนนี้ใช้เวลาในกระบวนการลดลงจาก 15 ชั่วโมง 30 วินาที เหลือ 5 ชั่วโมง 39 นาที 45 วินาที ดังรูปที่ 12

เพิ่มกำลังการผลิต แต่ต้นทุน 12,500,000 บาท และต้นทุน ค่าซ่อมบำรุง ค่าปรับปรุงสถานที่จัดวาง จากทฤษฎีการจัดการ ผลิต (production management) โดยใช้ทรัพยากรอย่างมี ประสิทธิภาพ เป็นหนึ่งในขั้นตอนของการวางแผนการผลิต (production planning) การเพิ่มเครื่องจักรหรือปรับเปลี่ยน กระบวนการผลิต ต้องวางแผนการผลิตที่เหมาะสม และประเมิน ความคุ้มค่าของเครื่องจักรใหม่ (benefit-cost analysis) [21], [23] ช่วยรองรับปริมาณงานที่เพิ่มขึ้นโดยไม่ทำให้กระบวนการ อื่นล่าช้าหรือขัดข้อง การใช้เครื่องจักรเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ กระบวนการ (process optimization) ผลิตสินค้าได้ในปริมาณ ที่มากขึ้นในเวลาที่น้อยลง ใช้กำลังการผลิตที่มีอยู่เกิดประสิทธิผล สูงสุด [23]

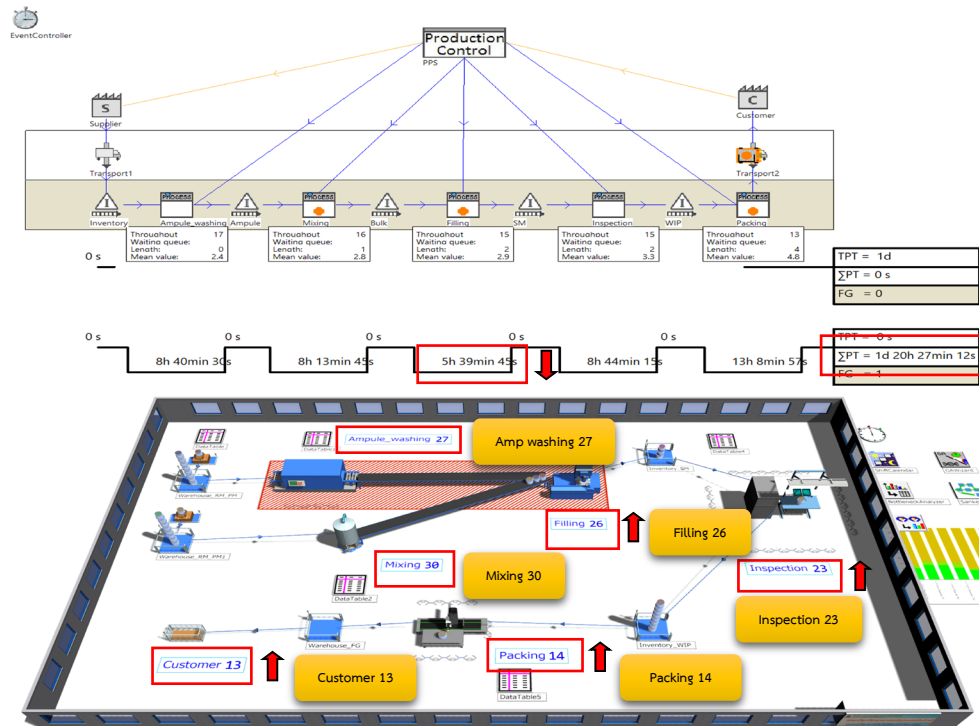
จากข้อมูลของทั้ง 3 สถานการณ์ สรุปเป็นตารางเปรียบเทียบ เวลาของขั้นตอนการผลิตของสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคตทั้ง 3 รูปแบบ ดังตารางที่ 9

รอบเวลาของการผลิต 15 ชั่วโมง จากเวลาที่มากที่สุดของทุก กระบวนการผลิต และเวลาผลิตเฉลี่ยตามความต้องการ (Takt time) เป็น 13.65 ชั่วโมง คำนวณจากความต้องการของลูกค้า ของยาในกลุ่ม A รวมกัน คือ 20 ล็อตต่อเดือน และเวลาการ

ทำงาน 10 ชั่วโมงครึ่งต่อวัน 273 ชั่วโมงต่อเดือน (วันทำงาน 26 วันต่อเดือน $26 \times 10.5 = 273$) ดังนั้นคอขวดของสถานการณ์ ปัจจุบันเกิดที่ขั้นตอนบรรจุด้วยยา ดังรูปที่ 13

$$\text{Takt time} = \frac{\text{ระยะเวลาทำงานสุทธิต่อเดือน}}{\text{จำนวนสินค้าที่ต้องการ}}$$

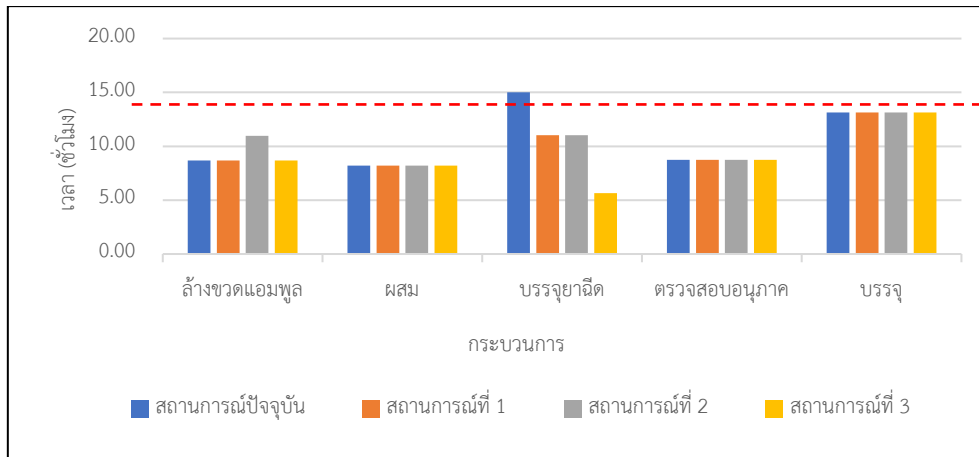
$$= \frac{273}{20} = 13.65 \text{ ชั่วโมงต่อล็อต}$$



รูปที่ 12 : แบบจำลองสถานการณ์ที่ 3

ตารางที่ 9 : การเปรียบเทียบเวลาของขั้นตอนการผลิตของสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคตทั้ง 3 รูปแบบ

ขั้นตอน	เวลา (ชั่วโมง:นาที:วินาที)			
	สถานการณ์ปัจจุบัน	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2	สถานการณ์ที่ 3
ล้างขวดแอมพูล	8:40:30	8:40:30	10:59:19	8:40:30
ผสม	8:13:45	8:13:45	8:13:45	8:13:45
บรรจุด้วยยา	15:00:30	11:01:00	11:01:00	5:39:45
ตรวจสอบอนุภาค	8:44:15	8:44:15	8:44:15	8:44:15
บรรจุ	13:08:57	13:08:57	13:08:57	13:08:57
เวลารวม	53:47:57	49:48:27	52:07:16	44:27:12
เวลาต่างจากสถานการณ์ปัจจุบัน		3:59:30	1:40:41	9:20:45
เวลาที่ลดลงจากสถานการณ์ปัจจุบัน (%)		7.42	3.12	17.37



รูปที่ 13 : รอบเวลาการผลิตเทียบกับเวลาผลิตเฉลี่ยตามความต้องการ

ตารางที่ 10 : ค่าเวลานำของสถานการณ์ในอนาคตเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน

ยา	เวลานำ (วัน:ชั่วโมง:นาที)				
	สถานการณ์ที่ 1	สถานการณ์ที่ 2	สถานการณ์ที่ 3	สถานการณ์ปัจจุบัน	เวลาที่ต่างกัน
P4	2:15:29	2:09:33	2:10:27	2:19:08	0:09:35 F#2
P5	3:20:16	4:02:08	3:05:58	4:03:05	0:57:07 F#3
P9	3:05:00	3:07:58	2:16:23	3:08:36	0:52:13 F#3
P10	3:01:32	3:04:53	2:22:37	3:05:06	0:42:29 F#3
P14	2:19:37	2:22:33	2:15:13	2:23:10	0:07:57 F#3
P20	2:23:26	3:02:16	2:19:17	3:02:54	0:43:37 F#3
P23	3:14:32	3:17:54	3:11:25	3:10:30	(0:00:55) F#3
P26	3:02:29	3:05:36	2:21:59	3:06:06	0:44:07 F#3

หมายเหตุ : F#2 คือ สถานการณ์ มีค่าดีที่สุด และ F#3 คือ สถานการณ์ 3 มีค่าดีที่สุด

4) ผลการวิจัย

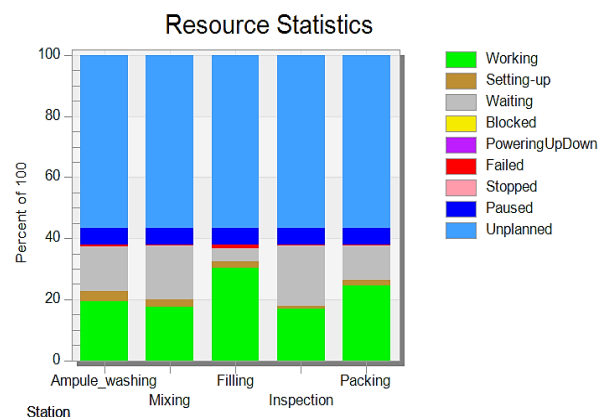
กำหนดเวลาการผลิตแต่ละสถานการณ์ 30 วัน เวลานำเมื่อพิจารณาแยกแต่ละตัว พบว่าสถานการณ์ 3 มีค่าดีที่สุด (แสดงในตาราง F#3) ยกเว้นยา P4 ในสถานการณ์ 2 มีค่าดีที่สุด (แสดงในตารางเป็น F#2) แต่จากการทดสอบปรากฏว่ายา P23 ในสถานการณ์ปัจจุบันมีค่าดีที่สุด แต่ห่างจากสถานการณ์ที่ 3 เพียง 55 นาที ดังตารางที่ 10

เมื่อให้โปรแกรมคำนวณค่าตัวแปรที่ได้ในแต่ละสถานการณ์ ผลลัพธ์ที่ได้ของสถานการณ์ปัจจุบันของยาในกลุ่ม A ดังรูปที่ 14 โดยพบว่าสัดส่วนของการทำงาน ในขั้นตอนบรรจุตัวยาส่งกว่าขั้นตอนอื่น ๆ

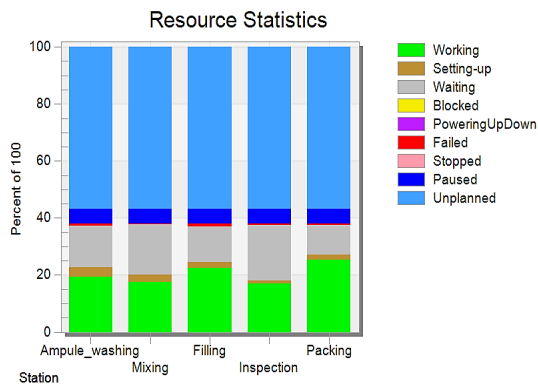
4.1) สถานการณ์ที่ 1

สัดส่วนของการทำงานทุกขั้นตอนสมดุลกัน แต่พบว่าเวลาในการรอคอย ทุกขั้นตอนมีสัดส่วนที่สูง เนื่องจากการทดสอบแบบ

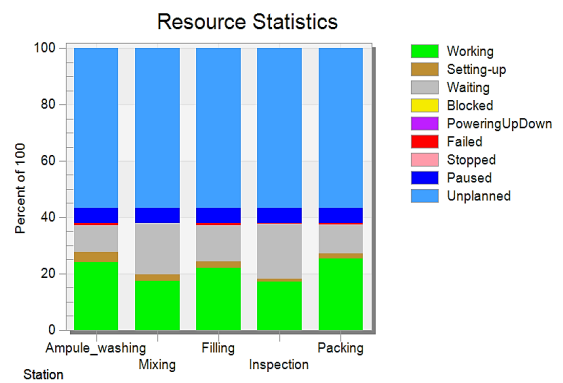
จำลองเริ่มต้นจากการเริ่มผลิตใหม่ ทำให้ต้องรอคอยยาของขั้นตอนก่อนหน้าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ ดังรูปที่ 15



รูปที่ 14 : ค่าพารามิเตอร์ของสถานการณ์ปัจจุบันของยาในกลุ่ม A



รูปที่ 15 : ค่าพารามิเตอร์ของสถานการณ์ที่ 1



รูปที่ 16 : ค่าพารามิเตอร์ของสถานการณ์ที่ 2

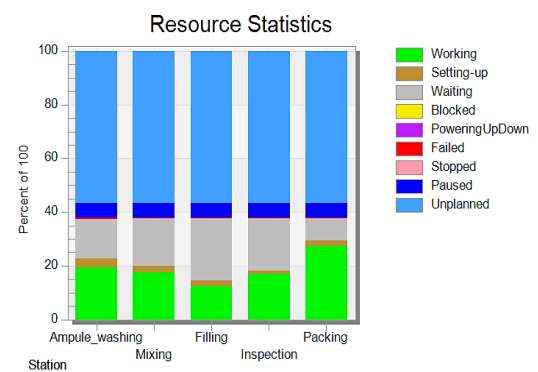
4.2) สถานการณ์ที่ 2

สัดส่วนการทำงานของขั้นตอนล้างขวดแอมพูลสูงขึ้นเนื่องจากจำนวนพนักงานน้อยลงจากการไปช่วยขั้นตอนบรรจุตัวยา แต่ก็ไม่ได้กระทบกับสมดุลของสายการผลิต ดังรูปที่ 16

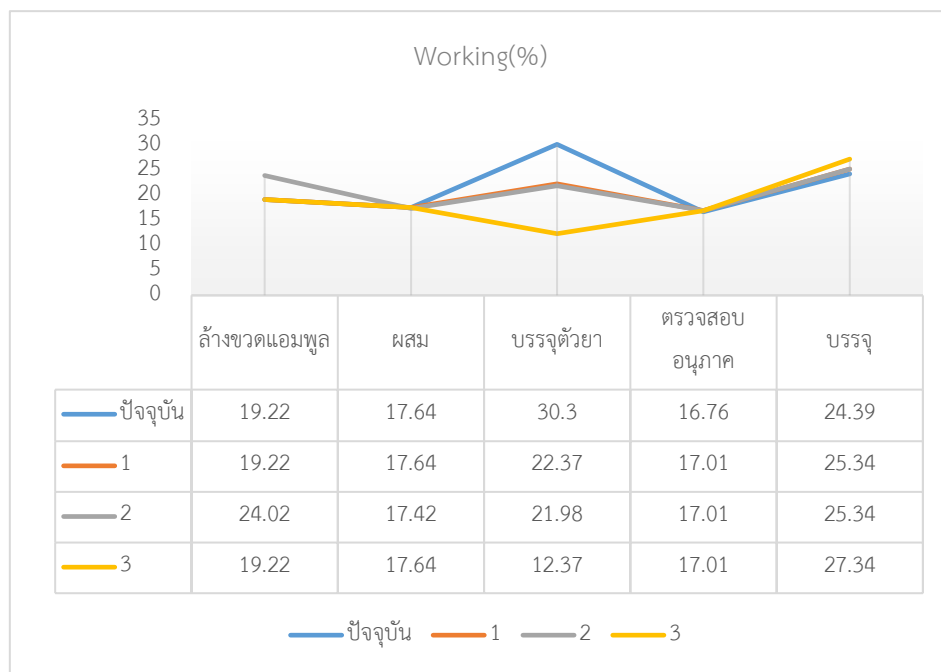
4.3) สถานการณ์ที่ 3

ขั้นตอนบรรจุตัวยาลดลงมาก และต่ำกว่าขั้นตอนอื่น ๆ ของกระบวนการ แต่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอนที่ตามหลัง ทำให้สัดส่วนการทำงานที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 17

เมื่อนำค่าสัดส่วนของการทำงาน (working) ของทั้ง 3 สถานการณ์มาเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 : ค่าพารามิเตอร์ของสถานการณ์ที่ 3



รูปที่ 18 : ค่าสัดส่วนของการทำงาน (working) ของทั้ง 3 สถานการณ์

4.4) เปรียบเทียบ 3 สถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ต่อเนื่อง 3 เดือน เพื่อให้มีสินค้าคงคลังใน จะมีผลผลิตที่ได้ในแต่ละเดือน ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 : ผลผลิตที่ได้ในแต่ละขั้นตอนในแต่ละสถานการณ์

สถานการณ์	ขั้นตอน	ผลผลิตที่ได้ (ล็อต)		
		เดือนที่		
		1	2	3
ปัจจุบัน	ล้างขวดแอมพูล	27	27	24
	ผสม	30	30	20
	บรรจุด้วยยา	17	17	16
	ตรวจสอบอนุภาค	16	17	16
	บรรจุ	13	14	15
1	ล้างขวดแอมพูล	27	27	26
	ผสม	30	30	29
	บรรจุด้วยยา	23	22	21
	ตรวจสอบอนุภาค	22	19	15
	บรรจุ	13	14	15
2	ล้างขวดแอมพูล	20	21	19
	ผสม	30	30	29
	บรรจุด้วยยา	19	21	19
	ตรวจสอบอนุภาค	19	20	17
	บรรจุ	13	14	15
3	ล้างขวดแอมพูล	27	27	26
	ผสม	30	30	29
	บรรจุด้วยยา	26	27	17
	ตรวจสอบอนุภาค	25	16	15
	บรรจุ	14	13	15

ตารางที่ 12 : เปรียบเทียบเวลาการผลิต ต้นทุนค่าเพิ่ม และต้นทุนของแต่ละสถานการณ์

สถานการณ์	เวลาในการผลิต (วัน:ชั่วโมง:นาที:วินาที)	ค่าดัชนี มูลค่าเพิ่ม (เดือน)	เงินลงทุน (บาท/เดือน)
ปัจจุบัน	2:5:47:57	67.92	-
1	2:1:48:27 (ลดลง 7.42%)	65.47	27,000
2	2:4:7:16 (ลดลง 3.12%)	66.23	-
3	1:20:27:12 (ลดลง 17.37%)	63.87	ลดลง 40,500 และเครื่องจักร 12,500,000 บาท

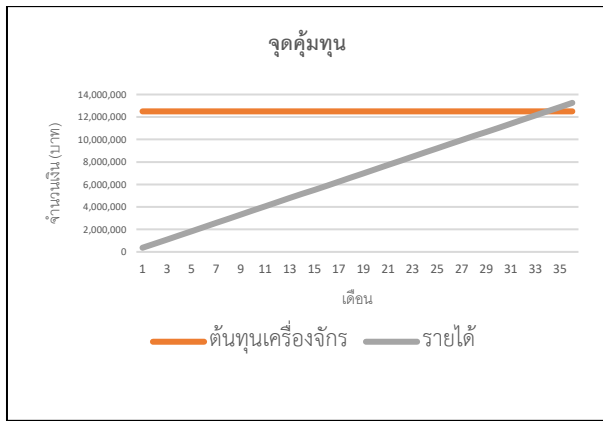
ผลลัพธ์ของทางเลือกทั้ง 3 ที่มีผลต่อการเลือกที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ เวลาในการผลิต ต้นทุนค่าแรงงานและเวลาในการส่งมอบ และค่าดัชนีมูลค่าเพิ่ม คือ ตัวชี้วัดที่แสดงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และเงินลงทุนเพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าของการลงทุน ดังตารางที่ 12

สถานการณ์ปัจจุบันและ 2 มีต้นทุนพนักงาน 675,000 บาทต่อเดือน สถานการณ์ที่ 1 มีต้นทุนพนักงาน 702,000 บาทต่อเดือน และสถานการณ์ที่ 3 มีต้นทุนพนักงาน 634,500 บาทต่อเดือน, เครื่องจักร 12,500,000 บาท

สถานการณ์ที่ 3 ลดต้นทุนพนักงาน 50 คน เป็น 47 คน มีส่วนต่าง 40,500 บาทต่อเดือน และจำนวนที่ผลิตได้ต่อเดือนในขั้นตอนบรรจุ 17 ล็อต สถานการณ์ปัจจุบันได้ 16 ล็อต แต่ในสถานการณ์ที่ 3 มีค่าบำรุงรักษา ค่าไฟฟ้า และค่าซ่อมแซม 12,500 บาทต่อเดือน ความคุ้มค่าของสถานการณ์ที่ 3 กับสถานการณ์ปัจจุบัน จะมีความคุ้มค่า 2 ปี 9 เดือน 28 วัน ดังตารางที่ 13 และกราฟแสดงจุดคุ้มทุน ดังรูปที่ 19

ตารางที่ 13 : เปรียบเทียบความคุ้มค่าแต่ละสถานการณ์ในแง่ของต้นทุนและกำลังการผลิต

รายละเอียด	สถานการณ์			
	ปัจจุบัน	1	2	3
ต้นทุนพนักงานต่อเดือน	675,000 บาท	702,000 บาท	675,000 บาท	634,500 บาท
ส่วนต่างของต้นทุนพนักงานเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน	-	27,000 บาท	0	-40,500 บาท
ต้นทุนเครื่องจักร	-	-	-	12,500,000 บาท
ค่าบำรุงรักษา ค่าไฟฟ้า และ ค่าซ่อมแซมต่อเดือน	-	-	-	12,500 บาท
จำนวนที่ผลิตได้ต่อเดือนจากโปรแกรม Tecnomatix (ขั้นตอนบรรจุด้วยยา)	16 ล็อต	21 ล็อต	19 ล็อต	17 ล็อต
รายได้จากยาต่อล็อต	340,241.82 บาท			
รายได้รวมต่อเดือน	5.44 ล้านบาท	7.14 ล้านบาท	6.46 ล้านบาท	5.78 ล้านบาท
รายได้ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน	-	1.70 ล้านบาท	1.02 ล้านบาท	0.34 ล้านบาท



รูปที่ 19 : จุดคุ้มทุนของสถานการณ์ที่ 3

5) สรุปและอภิปรายผล

5.1) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก่อนและหลังการใช้เทคนิคสายธารแห่งคุณค่า (Current State and Future State)

การปรับปรุงกระบวนการผลิตในสภาวะอนาคต (future state) มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจากสภาวะปัจจุบัน (current state) พบปัญหาว่าขั้นตอนบรรจุตัวยาใช้ระยะเวลาในการผลิตสูงกว่าขั้นตอนอื่น ส่งผลให้กระบวนการผลิตไม่มีความสมดุล เกิดเวลาในการรอคอยในขั้นตอนถัดไป

ระยะเวลาในการผลิตยาลดลงจากจากสถานการณ์ปัจจุบันใช้เวลา 2 วัน 5 ชั่วโมง 47 นาที 57 วินาที สถานการณ์ที่ 1 ใช้เวลา 2 วัน 1 ชั่วโมง 48 นาที 27 วินาที (ลดลง 7.42%) สถานการณ์ที่ 2 ใช้เวลา 2 วัน 4 ชั่วโมง 7 นาที 16 วินาที (ลดลง 3.12%) และสถานการณ์ที่ 3 ใช้เวลา 1 วัน 20 ชั่วโมง 27 นาที 12 วินาที (ลดลง 17.37%)

5.2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตในแต่ละสถานการณ์ (Scenario) โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการผลิต

ลดเวลานำลงได้ โดยในสถานการณ์ที่ 3 เทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน ยา P5 ลดได้ 57 นาที 7 วินาที ยา P9 ลดได้ 52 นาที 13 วินาที ยา P10 ลดได้ 42 นาที 29 วินาที ยา P14 ลดได้ 7 นาที 57 วินาที ยา P20 ลดได้ 43 นาที 29 วินาที ยา P26 ลดได้ 44 นาที 7 วินาที และของยา P4 พบว่าในสถานการณ์ 2 มีค่าดีที่สุด โดยสามารถลดเวลานำเมื่อเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบันได้ 9 นาที 35 วินาที แต่ปรากฏว่ายา P23 ในสถานการณ์ปัจจุบันมีค่าดีที่สุด แต่ห่างจากสถานการณ์ที่ 3 เพียง 55 วินาที

ค่าพารามิเตอร์ส่วนการทำงาน สถานการณ์ปัจจุบัน ขั้นตอนบรรจุตัวยาสูงกว่าขั้นตอนอื่น เป็นขั้นตอนคอขวด เมื่อเพิ่มพนักงาน 2 คนในขั้นตอนบรรจุตัวยาในสถานการณ์ที่ 1 พบว่าทุกขั้นตอนมีความสมดุลขึ้น และเมื่อโยกย้ายคนจากแผนกล้างขวดแอมพูล 2 คนมาช่วยในแผนกบรรจุตัวยาในสถานการณ์ที่ 2 พบว่าสัดส่วนการทำงานของขั้นตอนล้างขวดแอมพูลสูงขึ้น แต่ก็ไม่ได้กระทบกับสมดุลของสายการผลิต และเมื่อใช้เครื่องจักรทดแทนพนักงาน ในสถานการณ์ที่ 3 พบว่าสัดส่วนของขั้นตอนบรรจุตัวยาลดลง และต่ำกว่าขั้นตอนอื่น แต่จะส่งผลกระทบต่อขั้นตอนที่ตามหลัง ทำให้มีสัดส่วนการทำงานที่สูงขึ้น ที่เห็นชัดในขั้นตอนบรรจุ เนื่องจากมียาที่ส่งมาเร็วยิ่งขึ้น

พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ เมื่อกำหนดระยะเวลาในการผลิต 30 วัน ผลิตได้เพิ่มขึ้นในขั้นตอนบรรจุ จากสถานการณ์ปัจจุบัน 17 ลีต สถานการณ์ที่ 1, 2 และ 3 ได้ 21 ลีต, 19 ลีต และ 17 ลีต ตามลำดับ

5.3) เปรียบเทียบความคุ้มค่าของการนำเครื่องจักรใหม่แทนการใช้คนในกระบวนการบรรจุตัวยา

ประสิทธิภาพของสมดุลสายการผลิต ได้แก่ ลดขั้นตอนคอขวดของกระบวนการบรรจุตัวยาและลดค่าใช้จ่ายพนักงานลง 6.00% สถานการณ์ที่ 3 เทียบกับปัจจุบัน มีค่าใช้จ่ายในเครื่องจักร ความคุ้มทุน 2 ปี 9 เดือน 28 วัน แม้ใช้เวลาต้นทุนระยะยาว แต่ส่งผลดีในกรณีที่ในอนาคตมีปริมาณความต้องการผลิตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเครื่องจักรมีความสามารถในการผลิตเหลือเฟือพอจึงมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในด้านปริมาณและด้านคุณภาพ

หากเปรียบเทียบแต่ละทางเลือก เพื่อใช้ประกอบในการตัดสินใจเลือกสถานการณ์ที่ดีที่สุดไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง มีข้อจำกัดและปัจจัยที่ต้องระวังและจุดเด่น ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 : ตารางเปรียบเทียบ 3 สถานการณ์

ทางเลือก	จุดเด่น	ข้อจำกัดและปัจจัยที่ต้องระวัง
สถานการณ์ที่ 1	- แก่ได้ง่ายไม่ต้องปรับส่วนอื่น	- เพิ่มต้นทุนในการจ้างแรงงาน 4% ต่อเดือน - ต้องดูแลการผลิตของเครื่องจักรร่วมด้วย - การหาพนักงานอาจทำได้ยากในบางช่วง

ตารางที่ 14 : ตารางเปรียบเทียบ 3 สถานการณ์ (ต่อ)

ทางเลือก	จุดเด่น	ข้อจำกัดและปัจจัยที่ต้องระวัง
สถานการณ์ที่ 2	- ไม่ได้เพิ่มต้นทุน - ไม่ต้องหาพนักงานเพิ่ม	จะสามารถโยกย้ายได้ต่อเมื่อแผนกนั้นไม่มีงานหรือมีสินค้าคงคลังเพียงพอแล้ว
สถานการณ์ที่ 3	- เพิ่มกำลังการผลิต - ลดค่าใช้จ่ายด้านพนักงานลง 6.00 เปอร์เซนต์	- มีต้นทุนเริ่มต้นที่สูง 12,500,000 บาท - ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ เช่น ค่าซ่อมบำรุง ค่าปรับปรุงสถานที่จัดวาง เป็นต้น

การประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์เป็นจุดสำคัญ ทำให้ประเมินผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น โดยลดค่าใช้จ่ายจากการลงมือปฏิบัติจริง ที่เป็นค่าเสียโอกาส (opportunity cost) โดยข้อมูลสถานการณ์ปัจจุบันเป็นข้อมูลสำคัญ ต้องใช้ในโปรแกรม และผลลัพธ์ที่เป็นจุดเด่น ด้านระยะเวลาในการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อขีดความสามารถไปประยุกต์กับงานวิจัยหรืออุตสาหกรรมอื่น เพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้ เช่น ผลผลิต, ระยะทางหรือเวลาการเคลื่อนที่

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในอุตสาหกรรมการผลิตยา สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ โดยมีแนวทางในการประยุกต์ใช้ ข้อจำกัดและปัจจัยที่ต้องระวัง ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 : ตารางเปรียบเทียบ 3 สถานการณ์

อุตสาหกรรมที่ประยุกต์ใช้	แนวทางการประยุกต์	ข้อจำกัดและปัจจัยที่ต้องระวัง
อุตสาหกรรมที่ใช้คนในการผลิต	เพื่อหาจำนวนพนักงานที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ	คนจะไม่มีแรงจูงใจในการผลิตเหมือนเครื่องจักร
อุตสาหกรรมผลิตของเหลว	ใช้หาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดได้เช่นกัน	จะต้องออกแบบขั้นตอนการผลิตในโปรแกรมเป็นการผลิตของเหลว
อุตสาหกรรมโลจิสติกส์	สามารถดูผลลัพธ์ของจำนวนสินค้าได้เช่นกัน	ต้องระวังในการใส่ข้อมูลระยะทางเนื่องจากมีผลกระทบต่อผลลัพธ์มาก
อุตสาหกรรมที่มีสินค้าที่ผลิตหลากหลาย	ใช้การจัดกลุ่มพาเรโต	ต้องมียอดขายของสินค้าไม่แปรปรวนมากเกินไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ คุณไกรวุฒิ ดีบัว และบริษัท อิตาซี ซันเวย์ อินฟอร์เมชัน ซิสเต็มส์ (ประเทศไทย) จำกัด ในการให้คำปรึกษาและแนะนำในส่วนของการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม Tecnomatix Plant Simulation

REFERENCES

- [1] N. Tunpaiboon. "Industry Outlook 2023-2025 : Pharmaceuticals." KRUNGSRI.com. <https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/chemicals/pharmaceuticals/io/io-pharmaceuticals-2023-2025> (accessed Feb. 1, 2023).
- [2] Department of Older Persons, "Elderly People Statistics," 2023. [Online]. Available: https://www.dop.go.th/th/statistics_page?cat=1&id=2
- [3] W. Atthirawong, N. Prakotwong, C. Wongsichua, P. Inchan, and R. Singseang, "Improvement of production line of frame sub-assembly seat support: A case study of Thai Summit Gold Press Co., Ltd.," (in Thai), *Thai J. Oper. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–9, 2016.
- [4] M. Kikolski, "Study of production scenarios with the use of simulation models," *Procedia Eng.*, vol. 182, pp. 321–328, 2017.
- [5] J. Siderska, "Application of Tecnomatix plant simulation for modeling production and logistics processes," *Bus. Manag. Educ.*, vol. 14, no. 1, pp. 64–73, 2016.
- [6] P. A. Russkikh and D. V. Kapulin, "Simulation modeling for optimal production planning using Tecnomatix software," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1661, 2020, Art. no. 012188.
- [7] R. Chiangthong, T. Tresirichod, and K. Chienwattanasook, "Application of tecnomatix plant simulation to improve the quality inspection process," *J. Liberal Arts Service Ind.*, vol. 5, no. 1, pp. 383–395, Feb. 2022.
- [8] Y. Feng and G. Gao, "Design and simulation study on logistics planning in automatic plant factory based on Tecnomatix plant simulation," in *Proc. 2nd World Conf. Mech. Eng. and Intell. Manuf. (WCMEIM)*, Shanghai, China, Nov. 2019, pp. 667–671.
- [9] P. Trebuna, M. Pekarcikova, and M. Petrik, "Application of Tecnomatix process simulate for optimisation of logistics flows," *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 23, no. 4, pp. 378–389, 2018.

- [10] P. Trebuna, M. Pekarcikova, and M. Edl, "Digital value stream mapping using the Tecnomatix plant simulation software," *Int. J. Simul. Modelling*, vol. 18, no. 1, pp. 19–32, 2019.
- [11] M. Kikolski, "Identification of production bottlenecks with the use of plant simulation software," *Eng. Manag. Prod. Services.*, vol. 8, no. 4, pp. 103–112, 2016.
- [12] S. Islam, S. Sarker, and M. Parvez, "Production efficiency improvement by using Tecnomatix simulation software and RPWM line balancing technique: A case study," *Amer. J. Indus. Bus. Manag.*, vol. 9, no. 8, pp. 809–820, Apr. 2019.
- [13] A. Kengpol and K. Elfvengren, "Avoiding Covid-19 using a 3d digital mock up and augmented reality with Cobot in digital factory," *Appl. Sci. Eng. Prog.*, vol. 15, no. 3, Art. no. 5624, 2022.
- [14] S. Bangsow, *Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples*, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2020
- [15] O. Qassim, J. A. Garza-Reyes, M. K. Lim, and V. Kumar, "Integrating value stream mapping and PDCA to improve the operations of a pharmaceutical organisation in Pakistan," in *Proc. 23rd Int. Conf. Prod. Res.*, Manila, Philippines, Aug. 2015.
- [16] M. E. Nenni, L. Giustiniano, and L. Pirolo, "Improvement of manufacturing operations through a lean management approach: A case study in the pharmaceutical industry," *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, vol. 6, no. 24, 2014, doi: 10.5772/59027.
- [17] Pramadona and A. Adhiumata, "The application of lean manufacturing for operation improvement: A case study of black cough medicine production in Indonesia," *Asian J. Technol. Manag.*, vol. 6, no. 1, pp. 56–64, 2013.
- [18] K. Kovbasiuk, K. Zidek, M. Balog, and L. Dobrovolska, "Analysis of the selected simulation software packages: A study," *Acta Technologia*, vol. 7, no. 4, pp. 111–120, 2021.
- [19] M. Rostkowska, "Simulation of production lines in the education of engineers: How to choose the right software?," *Manag. Prod. Eng. Rev.*, vol. 5, no. 4, pp. 53–65, 2014.
- [20] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, 5th ed. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [21] W. J. Stevenson, *Operations Management*, 13th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2018.
- [22] J. Heizer and B. Render, *Operations Management*, 10th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2011.
- [23] F. W. Taylor, *The Principles of Scientific Management*. New York, NY, USA: Harper & Brothers, 1911.

การจัดเส้นทางยานพาหนะสำหรับรวบรวมและขนส่งขยะ โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง

สหฤทธิ์ สมิน้อย¹ คณาวุฒิ นาโชติ² โรจณี หอมชาลี^{3*}

^{1,2}หลักสูตรสาขาวิชาสถิติ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, ประเทศไทย

^{3*}ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : rojanee.h@msu.ac.th

รับต้นฉบับ : 26 มิถุนายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 22 กรกฎาคม 2567; ตอบรับบทความ : 25 กรกฎาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะสำหรับหน่วยงานองค์การบริหารส่วนตำบล โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (Clarke-Wright Savings Algorithm: CW) และขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง (Modified CW) เพื่อให้ได้เส้นทางที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกของรถและเวลาในการทำงานของพนักงานต่อวัน แต่สามารถรวบรวมและขนส่งขยะของทุกหมู่บ้านในพื้นที่รับผิดชอบของหน่วยงานไปกำจัดได้ทั้งหมดในแต่ละสัปดาห์ ผลการวิจัย พบว่า ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ที่มีค่าพารามิเตอร์แลมบ์ดา ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 ให้ผลการจัดเส้นทางที่มีระยะทางรวมและค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา โดยใช้เวลาในการดำเนินงานทั้งหมดเพียง 4 วันทำการของสัปดาห์ มีระยะทางรวมลดลงร้อยละ 1 และค่าใช้จ่ายรวมลดลงร้อยละ 18.83 ทำให้หน่วยงานการศึกษาสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 1,805.99 บาทต่อสัปดาห์

คำสำคัญ : การรวบรวมและขนส่งขยะ ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด การจัดเส้นทางยานพาหนะ

Vehicle Routing for Garbage Collection and Transportation Using Saving Algorithm and Modified Saving Algorithm

Saharit Sameenoi¹ Khanawut Napachot² Rojane Homchalee^{3*}

^{1,2}*Program in Statistics, Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahasarakham University,
Maha Sarakham, Thailand*

^{3*}*Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: rojane.h@msu.ac.th

Received: 26 June 2024; Revised: 22 July 2024; Accepted: 25 July 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

This research aims to optimize the waste collection and transportation routes for a case study, a subdistrict administrative organization. The research employs two heuristic algorithms: the Clark-Wright Savings Algorithm (CW) and the Modified Clark-Wright Savings Algorithm (Modified CW). The goal is to determine efficient routes according to conditions of vehicle capacity and employee work hours constraints, while ensuring that all waste from every village within the organization's responsibility is collected for disposal each week. The results showed that the Modified CW with lambda of 0.1 to 0.9 provided the routes with the lowest total distance and transportation cost compared to the CW and the case study organization's current methods. These results show that it will also reduce the operating time to only four working days a week. Additionally, the total distance was reduced by 1% and the total cost was reduced by 18.83%. As a result, the case study saves costs up to 1,805.99 baht per week.

Keywords: Garbage collection and transportation, Modified saving algorithm, Saving algorithm, Vehicle routing

1) บทนำ

การขนส่ง (transportation) เป็นกิจกรรมที่สำคัญในการดำเนินธุรกิจ เพราะการขนส่งทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายวัสดุตั้งแต่ต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำในห่วงโซ่อุปทานของธุรกิจ ในกรณีธุรกิจอุตสาหกรรม จะมีการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์หรือผู้ส่งมอบมายังโรงงานเพื่อใช้สำหรับการผลิตสินค้า และมีการขนส่งสินค้าไปยังผู้ซื้อหรือลูกค้า นอกจากนี้ ในธุรกิจที่มีขนาดใหญ่อาจมีการรวบรวมและขนส่งวัตถุดิบไปจัดเก็บที่โกดังก่อนขนส่งไปยังโรงงานผลิต รวมถึงอาจมีการขนส่งสินค้าไปจัดเก็บไว้ที่คลังสินค้าหรือศูนย์กระจายสินค้าก่อนส่งต่อไปยังลูกค้า เป็นต้น การขนส่งมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การขนส่งทางถนน (road transportation) การขนส่งทางราง (rail transportation) การขนส่งทางน้ำ (water transportation) การขนส่งทางอากาศ (air transportation) และการขนส่งทางท่อ (pipeline transportation) โดยการขนส่งทางถนนมีสัดส่วนสูงกว่ารูปแบบอื่น เพราะได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากการขนส่งที่สะดวก สามารถขนส่งถึงจุดหมายได้โดยไม่ต้องมีการขนถ่ายสินค้าจากการเปลี่ยนโหมดการขนส่งหรือพาหนะ มีความยืดหยุ่นด้านเวลาค่อนข้างสูงและสามารถควบคุมเวลาได้ดี แต่มีข้อเสียที่สามารถขนส่งสินค้าได้น้อยตามความจุของรถที่บรรทุก และเหมาะสำหรับการขนส่งในระยะทางที่ใกล้ถึงปานกลางเท่านั้น [1] แต่หากเป็นการขนส่งทางราง ทางน้ำ หรือทางอากาศ จำเป็นต้องมีการขนส่งต่อเนื่องด้วยรถบรรทุกอีกทอดเพื่อไปถึงจุดหมายของลูกค้า การขนส่งมีผลต่อต้นทุนรวมของสินค้า ดังนั้น การปรับปรุงประสิทธิภาพของการขนส่งจะก่อให้เกิดการประหยัดต้นทุนโดยรวมได้ [2]–[5]

สำหรับการขนส่งขยะมูลฝอย เป็นการนำเอาขยะจากแต่ละครัวเรือนในแต่ละชุมชนที่นำมาใส่ไว้ในถังขยะหรือวางไว้ที่หน้าบ้าน แล้วพนักงานของหน่วยงานที่รับผิดชอบมาเก็บรวบรวมใส่รถขนขยะเพื่อลำเลียงไปกำจัดต่อไป บางชุมชนหรือเทศบาลขนาดใหญ่อาจมีสถานีขนถ่ายหรือสถานีพักขยะ เพื่อรวบรวมและถ่ายเทขยะมูลฝอยจากรถเก็บขยะขนาดเล็กสู่รถบรรทุกขนาดใหญ่เพื่อลำเลียงไปยังสถานที่กำจัดต่อไป ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ [6] หรืออีกแนวทางหนึ่งคือ การแบ่งเขตเส้นทางการเก็บขนขยะ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพประหยัดทรัพยากร และค่าใช้จ่ายในการเก็บขนขยะ และเพื่อให้การปฏิบัติงานมีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ [7]

มีการวิจัยเกี่ยวกับการรวบรวมและขนส่งขยะ เช่น Jampong [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการขยะขององค์การบริหารส่วนตำบล

สวนหลวง อำเภอมัฒนา จังหวัดสมุทรสงคราม โดยส่งเสริมนโยบายให้ชุมชนมีจิตสำนึกในการรักษาความสะอาด มีวิธีการที่เหมาะสมในการรวบรวมและคัดแยกขยะมูลฝอย รวมถึงการใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอยของชุมชน หรืองานวิจัยของ Sinlapajaroen [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการขยะอันตรายจากชุมชน ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้บริหารและพนักงานของเทศบาล และตัวแทนประชาชนในพื้นที่รวม 18 คน ซึ่งพบว่า มีประชาชนบางครัวเรือนไม่ใช้บริการจัดเก็บขยะมูลฝอยจากเทศบาล โดยนำขยะไปกำจัดเองหรือนำไปทิ้งในบริเวณที่สาธารณะ และการกำจัดขยะในบริเวณบ่อกำจัดยังขาดการบริหารจัดการที่ดี ทำให้เกิดปัญหามลพิษตกค้าง และไม่มีการฝังกลบให้ถูกหลักสุขาภิบาล เป็นต้น

หน่วยงานกรณีศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ คือ องค์การบริหารส่วนตำบลแห่งหนึ่ง ซึ่งมีการให้บริการรวบรวมขยะให้กับชุมชนทั้งหมด 16 หมู่บ้าน มีรถที่ใช้ในการบริการ 2 รูปแบบ คือ รถกระบะคอกและรถบรรทุกขยะ 4 ล้อ (ขนาดเล็ก) จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่า ระบบการรวบรวมและขนส่งขยะของหน่วยงานยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากพนักงานตัดสินใจเลือกเส้นทางในการรวบรวมและขนส่งขยะโดยอาศัยประสบการณ์ ซึ่งอาจทำให้ได้เส้นทางที่ไม่เหมาะสมและมีต้นทุนโดยรวมสูงเกินความจำเป็น ดังนั้นการประยุกต์ใช้หลักทางวิชาการด้านโลจิสติกส์ เช่น หลักการของปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) จะทำให้ได้เส้นทางที่เหมาะสมและประหยัดต้นทุนโดยรวมในการดำเนินงานของหน่วยงานกรณีศึกษาได้

2) ทบทวนวรรณกรรม

2.1) การออกแบบการขนส่ง [1]–[4]

2.1.1) *Direct Shipment* คือ การขนส่งสินค้าจากโรงงานผู้ผลิตแบบเต็มคันรถ (full truck load) ไปยังลูกค้าแต่ละรายโดยตรงโดยไม่ผ่านคลังสินค้าหรือศูนย์กระจายสินค้า ใช้พาหนะเดียวและไม่มีการเปลี่ยนพาหนะตลอดการขนส่ง

2.1.2) *Direct Shipment with Milk Runs* คือ การขนส่งทางตรงแบบไม่ต้องพักสินค้าที่คลังสินค้า และมีการใช้พื้นที่ของพาหนะอย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1. การรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตหลายรายจนเต็มคันรถแล้วไปส่งยังลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Direct shipment with milk runs from multiple suppliers

2. การรวบรวมการสั่งซื้อจากลูกค้าหลายรายให้สินค้าเต็มคันรถ และขนส่งไปยังลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Direct shipment with milk runs to multiple customers

3. การรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตหลายรายจนเต็มคันรถ และไปกระจายสินค้าให้กับลูกค้าหลายราย เรียกว่า Direct shipment with milk runs from multiple suppliers to multiple customers

2.1.3) *Transportation with Cross Docking* คือ การขนส่งสินค้าที่มาจากโรงงานผู้ผลิตหลายราย มายังศูนย์กระจายสินค้า (Distribution Center: DC) เพื่อรวบรวมหรือคัดแยกสินค้า โดยใช้เวลากภายในไม่เกิน 24 ชั่วโมงหรือ 1 วัน แล้วขนส่งสินค้าขึ้นพาหนะเปลี่ยนถ่ายเพื่อขนส่งไปยังลูกค้า โดยไม่มีการพักสินค้าไว้ที่ศูนย์กระจายสินค้า

2.1.4) *Cross Docking Shipment with Milk Runs* คือ การนำรูปแบบ cross docking และ milk runs มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยมี 2 รูปแบบ ได้แก่

1. การรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตหลายรายจนเต็มคันรถและขนส่งมายังศูนย์กระจายสินค้า เพื่อรวบรวมหรือคัดแยกสินค้าขึ้นรถบรรทุกที่เปลี่ยนถ่ายและขนส่งสินค้าไปให้ลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Cross docking shipment with milk runs from multiple suppliers

2. การบรรทุกสินค้าแบบเต็มคันรถจากผู้ผลิตมายังศูนย์กระจายสินค้า แล้วรวบรวมและคัดแยกสินค้าขึ้นรถบรรทุกที่เปลี่ยนถ่ายจนเต็มคันรถและไปส่งให้ลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Cross docking shipment with milk runs to multiple retailers

ปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ มาจากปัญหาการขนส่งเพื่อตอบสนองความต้องการที่จุดบริการต่าง ๆ โดยไม่มีข้อจำกัดด้านระยะทางและปริมาณ การแก้ปัญหาดังกล่าวใช้แนวคิดแบบหาค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำสุดและมีเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสม ซึ่งเป็นแนวทางการแก้ปัญหาด้านการวิจัยดำเนินงาน (operations research) แต่ด้วยการปฏิบัติงานจริงย่อมมีข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ เช่น บางการขนส่งอาจจะใช้รถเพียงหนึ่งคัน หรือบางการขนส่งต้องใช้รถหลายคัน โดยจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดด้านความจุของรถ (Capacitated Vehicle Routing Problem: CVRP) หรือข้อกำหนดด้านเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Windows: VRPTW) รวมถึงข้อจำกัดอื่นๆ ทั้งนี้หากเป็นปัญหามาตรฐานใหญ่ เช่น จำนวนโหนดหรือจุดบริการมี

มาก เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นทวีคูณแบบเอกซ์โพเนนเชียล

2.2) *เทคนิคในการหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ (VRP) [10]*

2.2.1) *วิธีแบบแม่นยำตรง (Exact Method)* เป็นการหาคำตอบที่จะได้คำตอบแบบเหมาะสมที่สุด (optimal solution) ด้วยการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นตรง การโปรแกรมจำนวนเต็มและวิธีการอื่น แต่จะแก้ปัญหาได้เฉพาะปัญหาที่มีขนาดเล็ก เพราะถ้าขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่จะทำให้ใช้เวลานานในการประมวลผล

2.2.2) *วิทยาการศึกษานานึก (Heuristics)* เป็นวิธีการหาคำตอบที่อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด หรือเรียกว่า คำตอบที่ใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด (near optimal solution) มีทั้งวิทยาการศึกษานานึกที่พัฒนาขึ้นสำหรับแก้ปัญหาแบบเฉพาะอย่างและวิธีเมตาฮิวริสติก (metaheuristics) เช่น วิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search: TS) วิธีอาณานิคมมด (Ant colony) วิธีจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) ซึ่งกระบวนการคำนวณของวิทยาการศึกษานานึกเหล่านี้จะใช้เวลารวดเร็วและได้คำตอบที่แม่นยำสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่

2.2.3) *การจำลอง (Simulation)* เป็นการสร้างแบบจำลองกับปัญหา ส่วนใหญ่ใช้กับปัญหาที่มีความไม่แน่นอน เช่น ความต้องการไม่แน่นอน ระยะเวลาการบริการที่ไม่แน่นอน

2.3) *ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (Clarke-Wright Savings Algorithm: CW)*

เป็นวิทยาการศึกษานานึกที่พัฒนาโดย Clark and Wright [11] นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางปฏิบัติเพราะเป็นวิธีที่ง่ายแม้ว่าวิธีนี้จะไม่ได้ประกันถึงการให้คำตอบที่ดีที่สุด สำหรับปัญหาการตัดสินใจที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดยังคงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณหาคำตอบได้ด้วยเวลาที่รวดเร็ว โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกโหนดที่จะเป็นจุดเริ่มต้นหรือคลังสินค้า (depot)
2. เลือกโหนดใด ๆ จำนวน 2 โหนด โดยทั่วไปเป็นโหนดตำแหน่งของลูกค้า เพื่อเชื่อมโยงเส้นทางและคำนวณค่าประหยัดของระยะทางในการขนส่ง (S_{ij}) ดังสมการ (1)

$$S_{ij} = d_{iD} + d_{jD} - d_{ij} \quad (1)$$

เมื่อ D คือ จุดเริ่มต้นในการขนส่งหรือคลังสินค้า (depot)

d_{iD} คือ ระยะทางระหว่างโหนด i กับ depot

d_{jD} คือ ระยะทางระหว่างโหนด j กับ depot

d_{ij} คือ ระยะทางระหว่างโหนด i กับ j

S_{ij} คือ ค่าประหยัของระยะทางระหว่างโหนด i กับ j

3. เรียงลำดับค่า S_{ij} จากมากไปน้อย

4. เลือก 2 โหนดที่มีค่า S_{ij} มากที่สุด และทำการรวมโหนด i และ j ให้อยู่ในเส้นทางเดียวกัน โดยต้องไม่ทำให้เส้นทางที่ได้ขัดแย้งกับเงื่อนไขที่กำหนดของปัญหา เช่น น้ำหนักบรรทุกจะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะ ระยะทางรวมของเส้นทางต้องไม่เกินค่าระยะทางที่กำหนด เวลารวมในการเดินทางแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินเวลาที่กำหนด จำนวนโหนดในเส้นทางต้องไม่เกินจำนวนโหนดมากที่สุดที่กำหนด เป็นต้น

5. ถ้ากำหนดให้โหนดรวมเข้าไปอยู่ในเส้นทางใด ๆ แล้วเกินความจุของยานพาหนะหรือเงื่อนไขที่กำหนด จะให้ยานพาหนะคันดังกล่าวเดินทางกลับมาที่ depot ทันที

6. รวมโหนด i และ j เข้าอยู่ในเส้นทางใหม่เดียวกัน และลบเส้นทางเดิม คือ $D-i-D$ และ $D-j-D$ ออก จะได้เส้นทาง $D-i-j-D$

7. ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 โดยเลือก 2 โหนดถัดไปที่มีค่า S_{ij} มากที่สุด

8. หยุดการทำงานเมื่อพบว่าค่า S_{ij} ที่เป็นบวก ถูกพิจารณาแล้วทั้งหมด

2.4) ขั้นตอนวิธีแบบประหยัที่ปรับปรุง (Modified Saving Algorithm หรือ Clarke-Wright Formula Modification Procedure: Modified CW)

เป็นการปรับเปลี่ยนสูตรของ Clarke-Wright สำหรับการแก้ปัญหา VRP โดยผู้เขียนหลายคนเสนอพารามิเตอร์ใหม่ที่น่าไปใช้กับขั้นตอนวิธี โดย Gaskell [12] และ Yellow [13] นำเสนอพารามิเตอร์เกี่ยวกับรูปร่างของเส้นทาง (λ) และค่าประหยัของระยะทาง (S_{ij}) ดังสมการ (2)

$$S_{ij} = d_{iD} + d_{jD} - \lambda d_{ij} \quad (2)$$

จากการศึกษาของ Altinel and Once [14] เสนอแนะค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสม ควรมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 2.0

ทั้งนี้ขั้นตอนในการหาเส้นทางโดยใช้ ขั้นตอนวิธีแบบประหยัที่ปรับปรุง จะดำเนินการเหมือนกับขั้นตอนวิธีแบบประหยั แตกต่างเพียงการคำนวณค่า S_{ij} [15]

มีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัในการหาเส้นทางขนส่ง เช่น Chaiwongsakda et al. [16] ได้ศึกษาการจัดเส้นทางขนส่ง กรณีศึกษาโรงงานน้ำดื่ม โดยเสนอการแบ่งพื้นที่ในการให้บริการ แล้วนำลูกค้าในแต่ละพื้นที่มาจัดเส้นทางด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยั หลังจากนั้นนำเส้นทางที่ได้มาจัดลำดับในการขนส่งใหม่โดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นตรงสำหรับตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้ปัญหามีขนาดเล็กลง สามารถแก้ปัญหาโดยใช้ Solver ใน Microsoft Excel ได้ โดยตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขายจะหาระยะทางที่สั้นที่สุดในแต่ละเส้นทาง Cheewaworanontree and Boonrak [17] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางขนส่ง กรณีศึกษาบริษัทผู้ค้า เพื่อปรับปรุงการจัดเส้นทางที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขขนาดของรถบรรทุกสินค้าโดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยั และทำการเปรียบเทียบเส้นทางใหม่กับเส้นทางปัจจุบัน โดยเส้นทางใหม่สามารถลดระยะทางได้ 38 กิโลเมตร และลดต้นทุนค่าขนส่งได้ 122.36 บาทต่อเดือน Chunchaipak [18] ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางเดินรถรับ-ส่งนักเรียน กรณีศึกษาโรงเรียนประสิทธิ์ศึกษาสงเคราะห์ ซึ่งมีนักเรียนที่ต้องรับส่ง 1,137 คนต่อวัน จำนวนจุดรับส่ง 39 จุด มีรถสามประเภ ได้แก่ รถกระบะ รถหกล้อ และรถบัส จากการจัดเส้นทางใหม่โดยใช้ Clarke-Wright algorithm สามารถประหยัค่าใช้จ่ายได้ 134,817 บาทต่อเดือน และ Paphan and Kaewpradid [19] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าโดยขั้นตอนวิธีแบบประหยัของโรงงานเม็ดพลาสติกกรณีศึกษา โดยใช้ข้อมูลย้อนหลัง 1 เดือน ซึ่งเดิมมีการขนส่งแบบไม่เต็มคันรถและใช้ประสบการณ์ของพนักงานในการตัดสินใจเป็นหลัก จึงแก้ปัญหาด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยัเพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้นที่สุด พบว่าเส้นทางใหม่สามารถลดระยะทางในการขนส่งลงได้ 1,086.5 กิโลเมตร และจำนวนรถที่ใช้ลดลงจาก 7 คัน เหลือเพียง 5 คัน

สำหรับขั้นตอนวิธีแบบประหยัที่ปรับปรุง มีนักวิจัย เช่น Pichpibul and Kawtummachai [15] ได้เสนอวิธีการศึกษาสำนักตามขั้นตอนวิธีของ Clarke-Wright เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบเปิด เป็นการกำหนดเส้นทางของรถขนส่งที่มีความจุและไม่จำเป็นต้องกลับไปคลัง โดยเสนอวิธีการ 4 วิธี ประกอบด้วย 1. วิธีแบบเดิม (CW) 2. วิธีปรับเปลี่ยนสูตรของ

CW (Modified CW) 3. วิธีแบบสองขั้นตอน 4. การคัดเลือกและการปรับปรุงเส้นทาง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า วิธี Modified CW และวิธีใหม่ที่เสนอ มีประสิทธิภาพสูงกว่า CW แบบเดิม และยังพบอีกว่า ได้คำตอบที่ดีที่สุดมากถึงร้อยละ 97 ของจำนวนสถานการณ์ทั้งหมด (60 จากทั้งหมด 62 สถานการณ์)

3) วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเส้นทางการรวบรวมและขนส่งขยะของหน่วยงานองค์การบริหารส่วนตำบลแห่งหนึ่ง ผู้วิจัยได้สัมภาษณ์และเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานของหน่วยงานกรณีศึกษา และประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (CW) และขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง (Modified CW) ในการจัดเส้นทางการรวบรวมและขนส่งขยะ แล้วเปรียบเทียบระยะทางรวมและค่าใช้จ่ายรวมในการรวบรวมและขนส่งขยะระหว่างวิธีการปัจจุบันของกรณีศึกษากับวิธีการที่เสนอด้วยขั้นตอนวิธีทั้งสองแบบ โดยกำหนดสถานการณ์และเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ ดังนี้

1. ประยุกต์ใช้หลักการแบบ CVRP ซึ่งเป็นปัญหาการกำหนดเส้นทางแบบมีเงื่อนไขเกี่ยวกับความจุของพาหนะและเวลาในการทำงาน

2. พาหนะสำหรับการรวบรวมและขนส่งขยะ มี 2 คัน คือ รถกระบะคอก เป็นรถกระบะบรรทุก (ปีกอัพ 4x2) ความจุ 1,870 กิโลกรัม และรถบรรทุกขยะ 4 ล้อ (ขนาดเล็ก) ความจุ 1,200 กิโลกรัม โดยรถทั้งสองคันใช้น้ำมันเชื้อเพลิง Diesel B7 และมีอัตราสิ้นเปลือง 15 กิโลเมตรต่อลิตร

3. จัดเส้นทางแบบปิด คือ รถออกจากสำนักงานของ อบต. (โหนด D) ไปรวบรวมและขนส่งขยะจากหมู่บ้านในเส้นทาง (โหนด 1-16) และไปจุดกำจัดขยะ (โหนด P) แล้วกลับมาที่สำนักงาน อบต. (โหนด D)

4. ตำแหน่งของโหนดจะพิจารณาจากจุดศูนย์กลางโหนด เช่น ตำแหน่งหมู่บ้านพิจารณาจากจุดศูนย์กลางของหมู่บ้าน

5. พิกัดละติจูด (latitude) และลองจิจูด (longitude) ของแต่ละโหนด และหาระยะทางจริงจาก Google Map ระหว่างสองโหนดใด ๆ

6. พนักงานดำเนินงานรวบรวมและขนส่งขยะ ประกอบด้วย พนักงานขับรถ 2 คน และพนักงานจัดเก็บขยะ 4 คน โดยแบ่งพนักงานจัดเก็บขยะสำหรับประจำรถ คันละ 2 คน เท่ากัน

7. ทั้งพนักงานขับรถและพนักงานจัดเก็บขยะ เป็นพนักงานจ้างชั่วคราวรายวัน มีอัตราค่าจ้าง 300 บาทต่อคนต่อวัน

8. เวลาทำงานของพนักงานรวบรวมและขนส่งขยะทั้งหมด 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยมีเวลาพักกลางวัน 1 ชั่วโมง จึงเหลือเวลาทำงาน 7 ชั่วโมง ทั้งนี้เวลาในการรวบรวมและขนส่งขยะ ประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในการเก็บขยะ 1 ถึงของแต่ละครัวเรือนเพื่อโหลดขึ้นรถขนส่งขยะเท่ากับ 30 วินาที เวลาที่ใช้ในการเดินทางตลอดเส้นทาง แตกต่างกันตามระยะทางรวมของเส้นทางและความเร็วในการเดินทางซึ่งเท่ากับ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และเวลาที่ใช้ในการโหลดขยะจากรถลงบ่อกำจัดขยะเท่ากับ 1 ชั่วโมงต่อคัน

9. หน่วยงานมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวบรวมและขนส่งขยะ ประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงาน และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง โดยค่าใช้จ่ายในการเดินทางคิดจากค่าน้ำมันเชื้อเพลิง Diesel B7 ราคาประมาณ 35 บาทต่อลิตร [20]

10. สำหรับการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ผู้วิจัยกำหนดพารามิเตอร์ $\lambda = 0.1, 0.2, \dots, 2.0$ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของเส้นทางที่อาจเป็นไปได้ของหน่วยงานกรณีศึกษาและสอดคล้องกับค่า $\lambda \in [0.1, 2.0]$ ที่แนะนำโดย Altinel and Once [14]

4) ผลการวิจัย

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากสำนักงาน อบต. เกี่ยวกับพิกัดละติจูดและลองจิจูดของสำนักงาน (D) จุดกำจัดขยะ (P) และหมู่บ้านทั้งหมด 16 หมู่บ้าน (1)-(16) พบว่า มีระยะห่างระหว่างแต่ละโหนดดังเมตริกระยะทาง d_{ij} ในตารางที่ 1 ทั้งนี้ ในตำบลมีจำนวนครัวเรือนทั้งสิ้น 2,548 ครัวเรือน และปริมาณขยะต่อสัปดาห์ของแต่ละหมู่บ้าน ดังตารางที่ 2 ซึ่งรวมทุกหมู่บ้านแล้วพบว่ามีปริมาณขยะทั้งหมด 13,430.67 กิโลกรัม

4.1) การจัดเส้นทางตามวิธีปัจจุบันของหน่วยงานกรณีศึกษา

ปัจจุบันหน่วยงานกรณีศึกษากำหนดเส้นทางในการเดินทางเพื่อรวบรวมและขนส่งขยะ โดยพบว่า มีการดำเนินงานโดยรวมทั้งหมด 5 วัน และบางเส้นทางมีการขนส่งขยะเกินความจุของรถ เช่น เส้นทางเดินทาง D-9-P-D ของวันจันทร์ ซึ่งหน่วยงานบรรทุกขยะ 2,108.42 กิโลกรัม เกินจากความจุรถ 1,870 กิโลกรัม เป็นต้น ทั้งนี้มีระยะทางรวมจากรถทั้งสองคันเท่ากับ 252.38 กิโลเมตร ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด 588.93 บาทต่อสัปดาห์ ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด 9,000 บาท

ต่อสัปดาห์ และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 9,588.93 บาทต่อสัปดาห์ ดังตารางที่ 3

4.2) ผลการจัดเส้นทางด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยัด

จากเมตริกระยะทาง ในตารางที่ 1 ผู้วิจัยได้คำนวณค่าประหยัดของระยะทาง (S_{ij}) ตามสมการ (1) ได้ค่า S_{ij} ของขั้นตอนวิธีแบบประหยัด ดังตารางที่ 4 จากการพิจารณาค่า S_{ij} และดำเนินการจัดเส้นทางตามขั้นตอนวิธีแบบประหยัด พบว่า ได้

เส้นทางสำหรับรวบรวมและขนส่งขยะ ดังตารางที่ 5 ทำให้ได้ระยะทางรวมจากรถทั้งสองคันเท่ากับ 262.92 กิโลเมตร ซึ่งมากกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา ค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด 613.48 บาทต่อสัปดาห์ ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด 7,200 บาทต่อสัปดาห์ น้อยกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา เนื่องจากใช้เวลาทำงานเพียง 4 วันทำงานต่อสัปดาห์ และทำให้ได้ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 7,813.48 บาทต่อสัปดาห์

ตารางที่ 1 : เมตริกระยะทาง d_{ij} (หน่วย : กิโลเมตร)

dij	D	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
D	0																	
P	10.84	0																
1	3.97	6.12	0															
2	3.01	5.16	0.96	0														
3	4.72	6.88	0.80	1.72	0													
4	0.56	8.49	3.64	2.69	4.40	0												
5	0.37	8.70	4.15	3.20	4.91	0.48	0											
6	0.37	8.70	3.77	2.81	4.53	0.19	0.28	0										
7	2.27	8.50	2.49	1.53	3.25	1.94	2.45	2.07	0									
8	6.12	14.44	9.90	8.94	10.66	6.22	5.99	6.03	8.20	0								
9	5.29	13.62	9.08	8.12	9.83	5.40	5.18	5.20	7.38	1.56	0							
10	3.78	12.21	7.42	6.70	8.41	4.25	3.72	4.06	5.96	9.81	8.98	0						
11	3.58	12.02	7.46	6.51	8.22	4.06	3.53	3.87	5.76	9.62	8.79	0.19	0					
12	4.12	6.27	0.19	1.11	0.80	3.80	4.31	3.92	2.64	10.05	9.23	7.81	7.62	0				
13	5.79	14.12	9.57	8.62	10.33	5.89	5.67	5.70	7.87	5.36	2.38	9.48	9.29	9.73	0			
14	6.22	14.58	10.03	9.08	10.79	6.35	6.13	6.16	8.33	2.22	1.18	9.94	9.75	10.19	3.34	0		
15	3.99	12.42	7.87	6.91	8.62	4.46	3.93	4.27	6.17	10.02	9.19	0.52	0.71	8.02	9.69	10.15	0	
16	2.96	7.97	4.30	3.34	5.06	3.24	3.15	3.15	1.81	8.89	8.07	6.65	6.45	4.45	8.56	9.02	6.85	0

ตารางที่ 2 : หมู่บ้าน จำนวนครัวเรือน และปริมาณขยะต่อสัปดาห์

หมู่บ้าน	จำนวนครัวเรือน	ปริมาณขยะต่อสัปดาห์ (กิโลกรัม)	หมู่บ้าน	จำนวนครัวเรือน	ปริมาณขยะต่อสัปดาห์ (กิโลกรัม)
หมู่ที่ 1	216	1,138.55	หมู่ที่ 9	305	1,607.67
หมู่ที่ 2	274	1,444.27	หมู่ที่ 10	130	685.24
หมู่ที่ 3	212	1,117.47	หมู่ที่ 11	178	938.25
หมู่ที่ 4	153	806.47	หมู่ที่ 12	184	969.88
หมู่ที่ 5	182	959.33	หมู่ที่ 13	67	353.16
หมู่ที่ 6	205	1,080.57	หมู่ที่ 14	95	500.75
หมู่ที่ 7	42	221.38	หมู่ที่ 15	126	664.15
หมู่ที่ 8	132	695.78	หมู่ที่ 16	47	247.74

ตารางที่ 3 : เส้นทางที่ใช้รวบรวมและขนส่งขยะโดยวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา

รถกระบะคอก (ความจุ 1,870 กิโลกรัม)						รถบรรทุกขยะ (ความจุ 1,200 กิโลกรัม)					
เส้นทาง	วันทำงาน	รูปแบบการ เดินรถ	เวลา (ชม.)	ปริมาณ ขยะ (กก.)	ระยะทาง (กม.)	เส้นทาง	วัน ทำงาน	รูปแบบการ เดินรถ	เวลา (ชม.)	ปริมาณ ขยะ (กก.)	ระยะทาง (กม.)
1	จันทร์	D-9-P-D	5.05	2,108.42	21.26	2	จันทร์	D-5-P-D	3.18	959.33	19.91
3	อังคาร	D-2-7-P-D	4.43	1,665.66	23.88	4	อังคาร	D-8-13-P-D	3.87	1,048.94	36.44
6	พุธ	D-9-14-P-D	5.39	2,108.42	31.89	5	พุธ	D-3-P-D	3.52	1,117.50	22.44
9	พฤหัสบดี	D-6-16-P-D	3.84	1,328.31	22.32	7	พฤหัสบดี	D-4-P-D	2.94	806.47	19.89
10	ศุกร์	D-11-15-P-D	4.45	1,602.40	27.55	8	ศุกร์	D-10-P-D	2.98	685.24	26.82
ระยะทางรวม (กิโลเมตร)					126.9	ระยะทางรวม (กิโลเมตร)					125.5
ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร)											252.38
ค่าใช้จ่ายในการเดินรถทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)											588.93
ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)											9,000.00
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)											9,588.93

ตารางที่ 4 : ค่าประหยัดของระยะทาง (S_{ij}) ของขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (หน่วย : กิโลเมตร)

Sij	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P	0																
1	8.68	0															
2	8.69	6.02	0														
3	8.68	7.89	6.01	0													
4	2.91	0.89	0.89	0.89	0												
5	2.51	0.18	0.18	0.18	0.46	0											
6	2.51	0.57	0.57	0.57	0.74	0.46	0										
7	4.61	3.74	3.74	3.74	0.89	0.18	0.57	0									
8	2.51	0.19	0.19	0.19	0.46	0.50	0.46	0.19	0								
9	2.51	0.18	0.18	0.18	0.46	0.48	0.46	0.18	9.85	0							
10	2.41	0.32	0.09	0.09	0.09	0.43	0.09	0.09	0.09	0.09	0						
11	2.41	0.09	0.09	0.09	0.09	0.43	0.09	0.09	0.09	0.09	7.17	0					
12	8.69	7.90	6.03	8.05	0.89	0.18	0.57	3.74	0.19	0.18	0.09	0.09	0				
13	2.51	0.18	0.18	0.18	0.46	0.49	0.46	0.18	6.55	8.70	0.09	0.09	0.18	0			
14	2.48	0.15	0.15	0.15	0.43	0.46	0.43	0.15	10.12	10.33	0.06	0.06	0.15	8.67	0		
15	2.41	0.09	0.09	0.09	0.09	0.43	0.09	0.09	0.09	0.09	7.25	6.86	0.09	0.09	0.06	0	
16	5.83	2.63	2.63	2.63	0.29	0.18	0.19	3.42	0.19	0.19	0.09	0.09	2.63	0.19	0.16	0.09	0

ตารางที่ 5 : เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะโดยขั้นตอนวิธีแบบประหยัด

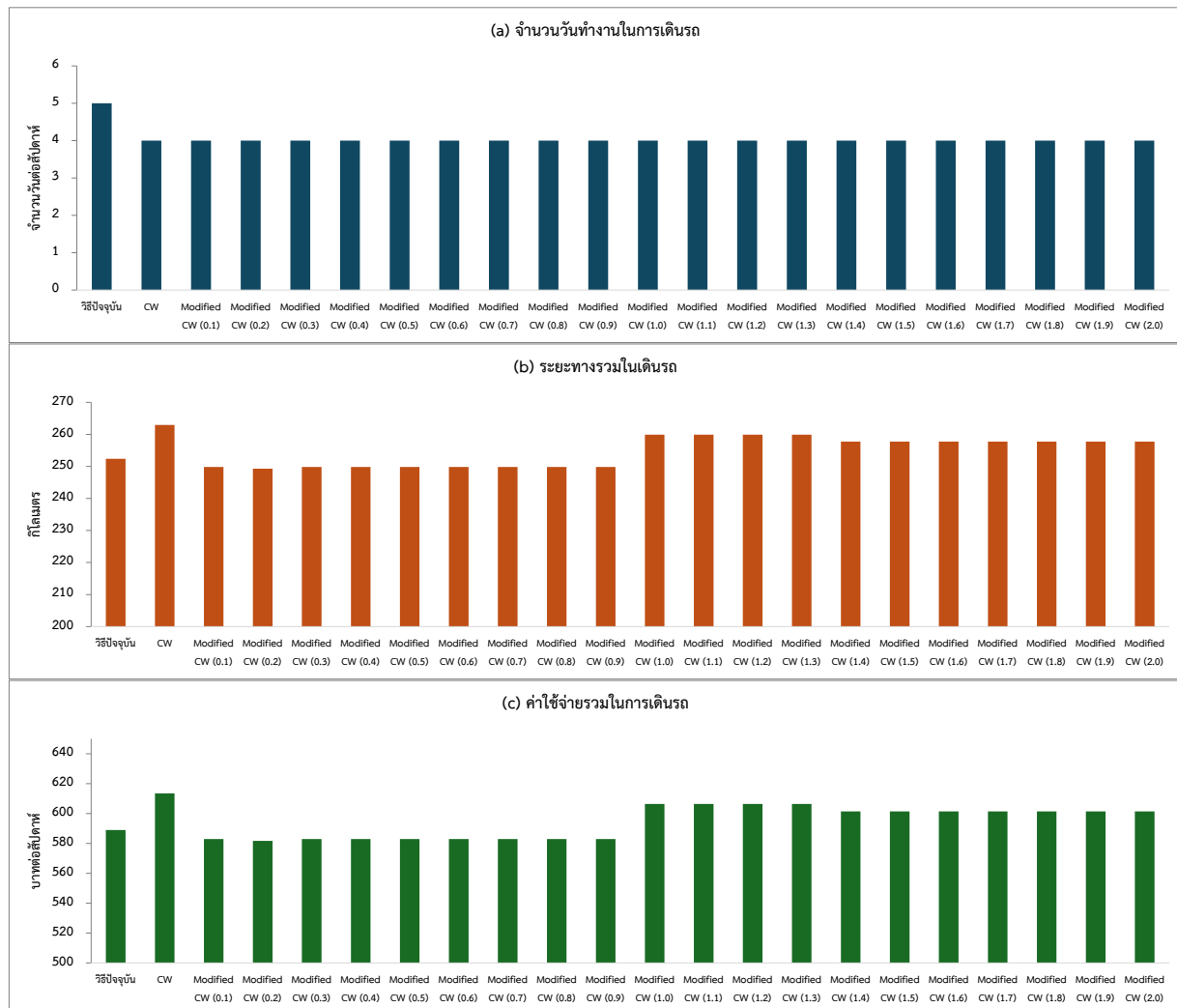
รถกระบะคอก (ความจุ 1,870 กิโลกรัม)						รถบรรทุกขยะ (ความจุ 1,200 กิโลกรัม)					
เส้นทาง	วันทำงาน	รูปแบบการเดินทาง	เวลา (ชม.)	ปริมาณขยะ (กก.)	ระยะทาง (กม.)	เส้นทาง	วันทำงาน	รูปแบบการเดินทาง	เวลา (ชม.)	ปริมาณขยะ (กก.)	ระยะทาง (กม.)
1	จันทร์	D-9-P-D	4.53	1,607.67	29.75	2	จันทร์	D-8-14-P-D	4.02	1,196.53	33.75
4	อังคาร	D-3-16-13-P-D	5.16	1,718.37	43.29	3	อังคาร	D-7-12-P-D	3.61	1,191.26	22.01
5	พุธ	D-15-10-P-D	4.05	1,349.39	27.55	6	พุธ	D-2-P-D	3.91	1,444.27	19.01
7	พฤหัสบดี	D-4-6-P-D	4.64	1,887.04	20.29	8	พุธ	D-11-P-D	3.15	938.25	26.44
						9	พฤหัสบดี	D-5-P-D	3.18	959.33	19.91
						10	พฤหัสบดี	D-1-P-D	3.50	1,138.55	20.93
ระยะทางรวม (กิโลเมตร)					123.03	ระยะทางรวม (กิโลเมตร)					139.89
ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์)					287.07	ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์)					326.40
ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร)										262.92	
ค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)										613.48	
ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)										7,200.00	
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)										7,813.48	

ตารางที่ 6 : ค่าประหยัดของระยะทาง (S_{ij}) ของขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง เมื่อ $\lambda = 0.1$ (หน่วย : กิโลเมตร)

Sij	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P	0																
1	14.19	0															
2	13.33	6.88	0														
3	14.87	8.61	7.56	0													
4	10.55	4.17	3.31	4.85	0												
5	10.34	3.92	3.06	4.60	0.89	0											
6	10.34	3.96	3.10	4.64	0.91	0.71	0										
7	12.25	5.99	5.12	6.67	2.64	2.39	2.43	0									
8	15.51	9.10	8.24	9.78	6.06	5.89	5.89	7.57	0								
9	14.77	8.35	7.49	9.03	5.32	5.14	5.14	6.82	11.26	0							
10	13.39	7.00	6.12	7.66	3.92	3.77	3.74	5.45	8.92	8.17	0						
11	13.22	6.80	5.94	7.49	3.74	3.60	3.57	5.27	8.74	8.00	7.34	0					
12	14.33	8.07	7.02	8.76	4.30	4.06	4.10	6.12	9.24	8.49	7.12	6.94	0				
13	15.21	8.80	7.94	9.48	5.76	5.59	5.59	7.27	11.37	10.84	8.62	8.44	8.94	0			
14	15.60	9.18	8.32	9.86	6.15	5.97	5.97	7.65	12.12	11.39	9.00	8.83	9.32	11.67	0		
15	13.58	7.17	6.31	7.85	4.10	3.96	3.93	5.64	9.11	8.36	7.71	7.50	7.30	8.81	9.19	0	
16	13.00	6.50	5.64	7.18	3.20	3.02	3.02	5.05	8.19	7.45	6.07	5.90	6.64	7.89	8.28	6.26	0

ตารางที่ 7 : เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะโดยขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง เมื่อ $\lambda = 0.1$

รถกระบะคอก (ความจุ 1,870 กิโลกรัม)						รถบรรทุกขยะ (ความจุ 1,200 กิโลกรัม)					
เส้นทาง	วันทำงาน	รูปแบบการเดินทาง	เวลา (ชม.)	ปริมาณขยะ (กก.)	ระยะทาง (กม.)	เส้นทาง	วันทำงาน	รูปแบบการเดินทาง	เวลา (ชม.)	ปริมาณขยะ (กก.)	ระยะทาง (กม.)
1	จันทร์	D-8-14-P-D	4.02	1,196.53	33.75	2	จันทร์	D-9-13-P-D	5.19	1,960.84	32.62
3	อังคาร	D-3-P-D	3.52	1,117.47	22.44	5	อังคาร	D-15-10-7-P-D	4.47	1,570.78	29.79
4	อังคาร	D-1-P-D	3.50	1,138.55	20.93	6	พุธ	D-2-P-D	3.91	1,444.27	19.01
7	พุธ	D-16-12-P-D	3.75	1,217.62	24.52	8	พฤหัสบดี	D-11-4-P-D	4.66	1,744.72	26.97
9	พุธ	D-5-P-D	3.18	959.33	19.91						
10	พฤหัสบดี	D-6-P-D	3.37	1,080.57	19.90						
ระยะทางรวม (กิโลเมตร)					141.44	ระยะทางรวม (กิโลเมตร)					108.39
ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์)					330.03	ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์)					252.91
ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร)										249.84	
ค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)										582.94	
ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)										7,200.00	
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท/สัปดาห์)										7,782.94	



รูปที่ 1 : ผลการเปรียบเทียบการจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะ

โดยวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา กับ ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง

4.3) ผลการจัดเส้นทางด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง

สำหรับการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ได้กำหนดพารามิเตอร์ $\lambda = 0.1, 0.2, \dots, 2.0$ โดยเริ่มจากเมื่อกำหนด $\lambda = 0.1$ สามารถคำนวณค่าประหยัดของระยะทาง (S_j) ได้ดังตารางที่ 6 และจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะตามขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ได้ดังตารางที่ 7 ซึ่งพบว่าเส้นทางที่จัดได้ทำให้ระยะทางรวมจากรถทั้งสองคันเท่ากับ 249.84 กิโลเมตร ซึ่งน้อยกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา และขั้นตอนวิธีแบบประหยัด มีค่าใช้จ่ายในการเดินทาง 582.94 บาทต่อสัปดาห์ และค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงาน 7,200 บาทต่อสัปดาห์ ซึ่งน้อยกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา รวมเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 7,782.94 บาทต่อสัปดาห์

ส่วนกรณีที่ $\lambda = 0.2, \dots, 2.0$ สามารถดำเนินการตามขั้นตอนของวิธี Modified CW ได้เช่นเดียวกับกรณี $\lambda = 0.1$ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลลัพธ์จากการจัดเส้นทาง โดยเปรียบเทียบทั้งจำนวนวันทำงานในการเดินทาง ระยะทางรวม และค่าใช้จ่ายรวมในการเดินทางระหว่างวิธีการปัจจุบันของนักศึกษา กับวิธีการที่เสนอด้วยขั้นตอนวิธีทั้งสองแบบ ดังรูปที่ 1

5) สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะสำหรับองค์การบริหารส่วนตำบลกรณีสึกษา โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง เพื่อให้ได้เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะที่สั้นที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความจุของรถและเวลาในการทำงาน แต่สามารถรวบรวมและขนส่งขยะของทุกหมู่บ้านไปกำจัดได้ทั้งหมดในแต่ละสัปดาห์ ผลการวิจัยพบว่า ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ($\lambda = 0.1$ ถึง $\lambda = 0.9$) ให้ผลการจัดเส้นทางที่มีระยะทางรวมและค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ($\lambda = 1.0$ ถึง $\lambda = 2.0$) ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา โดยมีระยะทางรวมเพียง 249.83 กิโลเมตร ค่าใช้จ่ายรวมในการเดินทาง 582.94 บาทต่อสัปดาห์ และค่าใช้จ่ายรวมในการจ้างพนักงาน 7,200 บาทต่อสัปดาห์ ทำให้มีค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 7,782.94 บาทต่อสัปดาห์ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ระยะทางรวมลดลงร้อยละ 1 และค่าใช้จ่ายรวมลดลงร้อยละ 18.83 เมื่อเทียบกับวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา อีกทั้งใช้เวลาในการรวบรวมและขนส่งขยะเพียง 4 วันทำการของสัปดาห์

6) อภิปรายผลการวิจัย

จากการที่องค์การบริหารส่วนตำบลกรณีสึกษาจัดเส้นทางเดินรถในการรวบรวมและขนส่งขยะโดยอาศัยเพียงประสบการณ์ของพนักงาน ทำให้ได้เส้นทางที่มีระยะทางมากเกินไป และมีการเก็บขยะเกินความจุของรถ อีกทั้งใช้เวลาในการดำเนินงานมาก จึงทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงเกินความจำเป็น ดังนั้นการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง จึงทำให้ได้เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะที่เหมาะสมมากกว่าเป็นไปตามเงื่อนไขความจุของรถและใช้เวลาในการทำงานต่อวันที่คุ้มค่า ซึ่งสอดคล้องกับผลงานของ Cheewaworanontree and Boonrak [17] ที่วิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางรถขนส่งกรณีสึกษาบริษัทผู้ผ่าน เพื่อปรับปรุงการจัดเส้นทางที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และทำการเปรียบเทียบเส้นทางใหม่กับเส้นทางที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งได้ข้อสรุปว่า เส้นทางใหม่สามารถลดระยะทางได้ 38 กิโลเมตร และลดต้นทุนค่าขนส่งได้ 122.36 บาทต่อเดือน หรืองานวิจัยของ Paphan and Kaewpradid [19] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการจัดเส้นทางรถขนส่งสินค้าโดยขั้นตอนวิธีแบบประหยัดของโรงงานเม็ดพลาสติกกรณีสึกษา ซึ่งเดิมมีการขนส่งโดยที่น้ำหนักไม่เต็มคันและใช้ประสบการณ์ของพนักงานในการตัดสินใจเป็นหลัก จึงแก้ปัญหาด้วยการใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด เพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้นที่สุด และได้ข้อสรุปว่า สามารถลดระยะทางลงได้ 1,086.50 กิโลเมตร และใช้รถเพียง 5 คัน จากเดิมที่ใช้ทั้งหมด 7 คัน นอกจากนี้ Pichpibul and Kawtummachai [15] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้วิทยาการศึกษานักหรือฮิวริสติก ที่พัฒนาจาก Clarke-Wright algorithm กับปัญหาการจัดเส้นทางแบบเปิด ได้ให้ข้อสรุปว่า ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุงให้ผลลัพธ์ในการจัดเส้นทางที่เหมาะสมกว่าขั้นตอนวิธีแบบประหยัด ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่สรุปได้จากงานวิจัยในครั้งนี้เช่นเดียวกัน

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ พบว่า การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด แม้จะให้ระยะทางโดยรวมสูงกว่าวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา แต่ใช้เวลาทำงานเพียง 4 วัน ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่า ส่วนขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งสองวิธี และเป็นขั้นตอนวิธีที่ไม่ซับซ้อน สามารถประยุกต์ใช้ได้ดีทั้งกับปัญหามิติขนาดเล็กและขนาดปานกลางหรือปัญหาที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นหากหน่วยงานกรณีสึกษานำไปประยุกต์ใช้ จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้ 1,805.99 บาทต่อสัปดาห์ ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 18.83

7) ข้อเสนอแนะ

นอกจากการนำขั้นตอนวิธีแบบประหัตและขั้นตอนวิธีแบบประหัตที่ปรับปรุง ไปประยุกต์ใช้กับหน่วยงานกรณีศึกษาแล้วยังสามารถขยายผลเพื่อนำแนวทางดังกล่าวไปใช้กับพื้นที่กรณีศึกษาอื่นหรือขอบเขตพื้นที่ที่กว้างขึ้น เช่น การจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะของทุกสำนักงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในอำเภอ หรือแม้กระทั่งนำไปประยุกต์ใช้กับการจัดเส้นทางเดินรถของหน่วยงานภาครัฐอื่นหรือภาคธุรกิจที่มีขอบเขตพื้นที่และจำนวนโหนดบริการไม่มาก

ทั้งนี้เนื่องจากการแก้ปัญหการจัดเส้นทางรถสำหรับยานพาหนะสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายวิธี ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตเกี่ยวกับการจัดเส้นทางยานพาหนะสำหรับรวบรวมและขนส่งขยะ ยังสามารถประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (mathematical programming) โดยพัฒนาตัวแบบและกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุดหรือระยะทางรวมต่ำที่สุด ร่วมกับการกำหนดสมการหรือสมการข้อจำกัด (constraints) เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกของรถและเวลาในการทำงานต่อวัน หรือเงื่อนไขอื่น ๆ การใช้วิธีแบบแมนตรนี้ แม้จะให้คำตอบแบบเหมาะสมที่สุด (optimal solution) แต่จะแก้ปัญหได้เฉพาะปัญหาที่มีขนาดเล็ก เพราะถ้าเป็นปัญหาขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการประมวล สำหรับวิธีวิทยาการศึกษาสำนึก (heuristics) ที่นอกเหนือจากขั้นตอนวิธีแบบประหัตและขั้นตอนวิธีแบบประหัตที่ปรับปรุง ยังมีอีกหลายวิธีโดยเฉพาะวิธีเมตา-ฮิวริสติก เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม วิธีวิวัฒนาการผลต่างเป็นต้น ซึ่งประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาขนาดใหญ่ สามารถให้คำตอบได้รวดเร็ว แม้จะเป็นเพียงคำตอบแบบใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด (near optimal solution) ดังนั้นในการประยุกต์ใช้วิธีแบบแมนตรเทียบกับวิธีวิทยาการศึกษาสำนึกภายใต้ขอบเขตปัญหาขนาดเดียวกัน นอกจากการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้แล้ว จึงควรเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลด้วย

นอกจากนี้ หากปัญหาที่มีความซับซ้อนมากและพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความไม่แน่นอน การประยุกต์ใช้แนวทางการจำลอง จะทำให้สามารถจำลองปัญหาสำหรับกรณีวิเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า เช่น แบบจำลองด้วยโปรแกรม Arena แบบจำลองด้วยโปรแกรม FlexSim หรือแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางด้าน GIS เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารและบุคลากรหน่วยงานองค์การบริหารส่วนตำบลกรณีศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นสถานที่วิจัยและให้ข้อมูลประกอบการวิจัยจนแล้วเสร็จตามวัตถุประสงค์

REFERENCES

- [1] K. Apiprachyasakul, *Transportation Management*, 2nd ed. Bangkok, Thailand: Focus Media and Publishing (in Thai), 2008.
- [2] E. J. Bardi, J. J. Coyle, and R. A. Novack, *Management of Transportation*, 6th ed. Mason, OH, USA: Thomson/South-Western, 2006.
- [3] D. J. Bowersox and D. J. Closs, *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [4] D. M. Lambert, J. R. Stock, and L. M. Ellram, *Fundamentals of Logistics Management*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1998.
- [5] M. Lamanee, S. Kaensing, and R. Homchalee, "The development of logistics performance index for transportation services providers," (in Thai), *Suranaree J. Soc. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 50–72, 2020.
- [6] G. M. Monzambe, K. Mpofu, and I. A. Daniyan, "Optimal location of landfills and transfer stations for municipal solid waste in developing countries using non-linear programming," *Sustain. Futures*, vol. 3, 2021, Art. no. 100046.
- [7] Health Impact Assessment Division, Department of Health, Ministry of Public Health. *Manual: Health impact assessment in the case of solid waste management for local administrative organizations* (in Thai). (2021). [Online]. Available: <https://hia.anamai.moph.go.th/th/publications/2887#wow-book/>
- [8] P. Jeamponk, "The Study of household behavior on solid waste and wastewater management at Bangnanglee sub-district, Amphawa district, Samut Songkram province," (in Thai), *Res. Develop. J. Suan Sunandha Rajabhat Univ.*, vol. 3 no. 1, pp. 4–13, 2011.
- [9] P. Sinlapajaroen, "Household hazardous waste management of Nakhon Pathom City Municipality," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Public Private Manage., Silpakorn Univ., Phetchaburi, Thailand, 2019.



- [10] R. Pitakaso, *Metaheuristic Methods for Solving Production Planning and Logistics Management Problems*. Bangkok, Thailand: Technology Promotion Association (Thailand-Japan) (in Thai), 2011.
- [11] G. Clarke and J. W. Wright, "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points," *Operations Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, 1964.
- [12] T. J. Gaskell, "Bases for vehicle fleet scheduling," *OR*, vol. 18, no. 3, pp. 281–295, 1967.
- [13] P. C. Yellow, "A computational modification to the savings method of vehicle scheduling," *Oper. Res. Quart. (1970-1977)*, vol. 21, no. 2, pp. 281–283, 1970.
- [14] I. K. Altinel and T. Öncan, "A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 56, no. 8, pp. 954–961, Aug. 2005.
- [15] T. Pichpibul and R. Kawtummachai, "A heuristic approach based on Clarke-Wright algorithm for open vehicle routing problem," *Scientific World J.*, vol. 2013, Dec. 2013, Art. no. 874349.
- [16] N. Chaiwongsakda *et al.*, "Vehicle routing by using a saving algorithm and the traveling salesman problem: A case study of a drinking water factory," (in Thai), *Thai J. Oper. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 51–61, 2015.
- [17] W. Cheewaworanontree and N. Boonrak, "A heuristic method for vehicle routing problem to reduce transportation cost, case study: Curtain manufacturer," (in Thai), *Adv. Sci. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 76–90, 2018.
- [18] P. Chunchaiphak, "School bus routing: A case study of Prasitsuksasongkroh School," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., Ubon Ratchathani Univ., Ubon Ratchathani, Thailand, 2016.
- [19] N. Paphan and P. Kaewpradid, "The application of saving algorithms for vehicle routing problem: A case study of plastic beads factory," (in Thai), B.S. project, Dept. Manage. Logistics Eng., Dhurakij Pundit Univ., Bangkok, Thailand, 2020.
- [20] Energy Policy and Planning office (EPPO), "Oil Price," Ministry of Energy, Thailand, Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th/petroleum/>

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

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 13 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568

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 13 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568

ตัวอย่างที่ 4 การอ้างอิงจากการประชุมทางวิชาการ (Conferences and Conference Proceedings)

Basic Format:

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

นุชสรุา เกรียงกรกฎ, ปรีชา เกรียงกรกฎ, สกาวเดือน พรหมทุ่ง และวิจิตรา ภิรมย์สุข, "งานวิจัยการลดชิ้นส่วนงานซ่อมในขั้นตอนการเย็บของโรงงานผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป," *การประชุมวิชาการระดับชาติ มอช. 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 13 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568

“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)
- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศทางธุรกิจดิจิทัล (Digital 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.: HR)
- 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)
- หลักสูตรการจัดการระบบการผลิตและโลจิสติกส์แบบสิ้น (Lean Manufacturing System and Logistics Management, M.B.A.: LMS)

คณะสื่อสารสากล

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

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

คณะเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อธุรกิจอุตสาหกรรม

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน (Logistics and Digital Supply Chain, B.S.: LD)

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