



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 40 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2566

บทความวิจัย

1. ความเป็นไปได้ในการใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจักรภัทร ปริธิดาวัฒน์ สุชาลิณี มธุรสมนตรี เอกตินัย จันทร์ศรี และ ณรงค์ชัย โอเจริญ 1
2. การประยุกต์ใช้แนวคิดลิ้นและโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อช่วยในการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญในสำนักงาน
พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม อณัญญา จันทวุฒิ และ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข 10
3. การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอนในการออกแบบระบบฟื้นคอมโพสิต
สิทธิศักดิ์ อันสนั่น อัครนัย ทาเกา และ เรืองรุชดี ชีระโรจน์ 27
4. การวางแผนการผลิตที่มีหลายกลุ่มผลิตภัณฑ์และการจัดสรรแรงงานที่มีทักษะหลากหลายด้วยตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม กรณีศึกษาผู้ผลิตชุดสายไฟรถยนต์
วุฒินันท์ นุ่นแก้ว มาริษา กิมาพร และ ชฎาพร สิงห์กุม 40
5. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน
อภิญา อ่อนสาร สุพัฒน์พงษ์ มัตราช วิภาดา เดชะปัญญา กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา เทียมมะณี รัตนวิระพันธ์ และ สมภาพ สอนองราชกูร์ 57
6. การเลือกตัวทำละลายสำหรับการสกัดไมทราไจนีน โดยใช้พารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน
สิริวิชญ์ ดิษฐาพรเศรษฐ์ ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์ และ สุรัตน์ อาริรัตน์ 72
7. การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งรายเดือนด้วยตัวแบบผสมของโหนดและซัพพอร์ต
เวกเตอร์รีเกรสชันที่เน้นการลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบ
ธรณินทร์ สัจจวิริยทรัพย์ 85
8. การประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนา ร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมของวาฟ
หลังค่อมสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีช่วงเวลายืดหยุ่น
ศิริชัย ยศวังใจ และ กิตติพงษ์ ม้าลำพอง 98
9. การศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี
การติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับ
สมพล สกูลหลง สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์ และ ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ 115
10. การส่งเสริมค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดด้วยเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบาย
ความร้อน
พงศ์ธร ญาติพร้อม และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ 126
11. การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยฮิลโคลมิงอัลกอริทึม
กิตติศักดิ์ บรรณสาร และ อลงกรณ์ ละม่อม 139
12. สภาพที่เหมาะสมในการกักตุนหน้าเรียบผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกต่อค่าความขรุขระผิว
ธเนศ รัตนวิไล สมศักดิ์ จินาพงษ์ และ ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร 153

“วิศวกรรมลาดกระบ้ง”

วิศวกรรมลาดกระบ้งเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ตีพิมพ์บทความที่มีคุณภาพสูงทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ
2. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนผลงานวิจัยและองค์ความรู้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างนักศึกษา นักวิจัย และอาจารย์ ตลอดจนผู้สนใจ
4. เป็นเอกสารรวบรวมบทความวิจัยและผลงานทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนกับงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิด หรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ และมีทฤษฎีประกอบ หรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมีใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่นำเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

ชื่อเรื่อง	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน	ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ
สถานที่ทำงาน	ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน
บทคัดย่อ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
เนื้อความ	ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อตามลำดับ

1. บทนำ
 2. ทฤษฎี
 3. การทดลองและผลการทดลอง
 4. สรุป
- 2.1 หลักการของ.....
 - 2.2 หลักการใหม่.....

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง

การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิงโดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, “The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic,” Ladkrabang Engineering Journal, vol.30, no.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltess, “Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits,” IEEE Trans. Circuits and Systems, vol.39, no.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความอยู่ระหว่าง 8–14 หน้ากระดาษ A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบ้ง และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ติดต่อ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ได้ที่ ลิงก์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8301# 207

โทรสาร (662) 329-8301# 207

ที่ปรึกษา

คนบดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อุมา สืบญะเรือง

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร.พิณช ธนชัยโชคศิริกุล

กองบรรณาธิการเฉพาะด้าน (Transaction)

ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภากร ลาภเจริญสุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิดา นอบน้อม

ติดต่อประสานงาน

จัดทำต้นฉบับ Artwork

นายวิรัช จุลไกรวัลสุจริต

พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

นายทนงศักดิ์ ใจชื่นแสน

ออกแบบปก



วิศวกรรมลาดกระบัง

School of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒ สุจิตรจรร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย รั้วรุจา

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติเชต สุริรักษา

ภาควิชาวิศวกรรมดนตรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร (เกษียณอายุ)

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ (เกษียณอายุ)

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

School of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 1 เมษายน 2565

เรื่อง แจ้งเพื่อทราบ

เรียน อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง” มีความประสงค์ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิศวกรรมลาดกระบัง ดังนี้

1. เว็บไซต์ใหม่ของวารสาร คือ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lei>
2. เนื้อหาของบทความอยู่ระหว่าง 8-14 หน้ากระดาษขนาด A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง
3. การส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง ผู้เขียนบทความสามารถเสนอรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญในสาขาที่ท่านส่งมา จำนวน 2 ท่าน โดยแนบมาพร้อมแบบฟอร์มการส่งบทความด้วยทุกครั้ง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.อูมา สีนุญเรือง)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ความเป็นไปได้ในการใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

Potential use of Recycled Plastic Bags in Rotational Molding Process

จักรภัทร ปรีดาวัฒน์¹, สุชาลิณี มหุระสมนตรี¹, เอกนัย จันทรศรี² และ ณรงค์ชัย โอเจริญ^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก, คลองหลวง ปทุมธานี 12110

²ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์, คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์, องครักษ์ นครนายก 26120

Jakkaphat Preedawat,¹ Suchaline Mathurosemontria¹, Ektinai Jansri² and Narongchai O-Charoen^{1,*}

¹ Department of Materials and Metallurgical Engineer, Faculty of Engineer, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong Hok, Khlong Luang, 12110, Thailand

² Division of Polymer Materials Technology, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok, 26120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: narongchai.o@en.rmutt.ac.th

Received: Jul 11, 2022; Revised: Sep 21, 2022; Accepted: Sep 23, 2022

บทคัดย่อ

ถุงพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้งานในชีวิตประจำวัน ส่งผลให้เกิดปริมาณขยะจากถุงพลาสติกหลังการใช้งานเป็นจำนวนมากขึ้นในทุกๆปี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับมาขึ้นรูปอีกครั้งด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน รวมไปถึงการศึกษาสมบัติด้านต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้ โดยใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในเขตพื้นที่ปทุมธานีซึ่งพบว่าส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene; LDPE) เปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน ภายในงานวิจัยมีการเตรียมวัสดุสำหรับการขึ้นรูปต้องมีการลดขนาดถุงพลาสติกให้อยู่ในรูปอนุภาคผงด้วยเครื่องฟลิวไรเซอร์ (Pulverizer) พร้อมทั้งวัดขนาดอนุภาค ค่าความกลม (Circularity) ด้วยเทคนิคทางสถิติทางวิทยาศาสตร์ ความสามารถในการไหลแบบแห้ง (Pourability) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของอนุภาคและทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus) ที่รอบการหมุน 7 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 190°C พร้อมบันทึกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงภายในแม่พิมพ์ และทดสอบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการวัดการกระจายความหนาของชิ้นงาน การทนต่อการเจาะทะลุ การทนต่อแรงดึงและค่าความแข็งที่ผิว โดยพบว่าขนาดอนุภาคผงพลาสติกที่เตรียมได้จากถุงพลาสติกมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าและค่าความกลมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคผงพลาสติกชนิด LLDPE ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน ส่งผลให้การกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยอนุภาคผงจากถุงพลาสติกน้อยกว่าและมีความทนต่อการเจาะทะลุ การทนต่อแรงดึงและความแข็งที่ผิวลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ผงพลาสติกชนิด LLDPE

คำสำคัญ: ฟิล์มพลาสติก, พอลิเอทิลีน, การรีไซเคิล, กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

Abstract

Plastic bags are one of the most widely used products because it can provide convenience to users in everyday life. As a result, the amount of waste from plastic bags after use increases every year. The objective of this research is to study the preparation of used plastic bags to be in a suitable form for recycling by the rotational molding process. Including the study of various properties of molded products by using plastic bags that have been used in Pathum-Thani area, most of them are Low Density Polyethylene (LDPE) compared to Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) used in the rotational molding industry. In this research, the material for molding must be prepared by reducing the size of plastic bags to the powder particles by a Pulverizer, as well as measuring the particle size, roundness (Circularity) by morphological techniques. The pourability bulk density and melt flow index of the particles were tested and molded by an Axial Powder Flow Apparatus with the rotation speed at 7 rpm, temperature 190°C and recorded the behavior of changes within the mold and test the molded specimen by measuring the thickness distribution of the specimen, puncture resistance, tensile strength and surface hardness. It was found that the particle size of plastic powder prepared from plastic bags was larger and less roundness compared to the particle size of LLDPE powder used in the rotational molding industry. As a result, the thickness distribution of the workpieces produced with powder particles from plastic bags is inferior and the penetration resistance, tensile strength and surface hardness are reduced compared to using LLDPE.

Keywords: Plastic film, Polyethylene, Recycle, Rotational Molding

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานเป็นจำนวนมากในแต่ละวัน และพบว่าถุงพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานอย่างมากชนิดหนึ่ง แต่มีปริมาณการนำกลับมารีไซเคิลน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความบางและค่อนข้างอ่อนตัว ทำให้การเตรียมวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้วให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำกลับมาขึ้นรูปใหม่อีกครั้งค่อนข้างยาก ทำให้ถุงพลาสติกถูกนำไปทิ้งในรูปของขยะเป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นสาเหตุให้ถุงพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ในขณะที่กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน (Rotational Molding) ใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเป็นวัตถุดิบหลัก นิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กลางขนาด

ใหญ่ เช่น ถังบรรจุน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย ถังขยะ ฯลฯ ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุค่อนข้างมากในการผลิต[1] และมากกว่า 90% ของผลิตภัณฑ์ในการผลิตถุงพลาสติกเป็นส่วนใหญ่จะใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนเป็นหลัก งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะนำวัสดุจากถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วและถูกทิ้งในรูปของขยะมูลฝอยกลับมาใช้ในการขึ้นรูป

ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการนำถุงมาตัดให้อยู่ในรูปแบบฟิล์ม จึงขอใช้คำว่าฟิล์มแทนคำว่าถุง อีกทั้งช่วยงานวิจัยนี้จะช่วยให้ผู้ผลิตภายในประเทศไทยสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ และยังช่วยลดปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อมของปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นในพื้นที่จังหวัดปทุมธานีได้อีกทางหนึ่งด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุในการทดลอง

ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากแต่ละอำเภอของจังหวัดปทุมธานีซึ่งได้แก่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอลองหลวง อำเภอหนองเสือ อำเภอลาดหลุมแก้ว อำเภอลำลูกกา อำเภอสสามโคก

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) เกรดทางค้า LL9641UP จากบริษัท PTT Global Chemical

2.2 การเตรียมอนุภาคผงฟิล์ม

การเตรียมอนุภาคผงฟิล์มที่ผ่านการใช้งานแล้ว (r-Film) เริ่มจากทำความสะอาดถุงด้วยน้ำและนำมาผึ่งลมให้แห้งในที่ร่ม เนื่องจากการนำพลาสติกมาตากแดดจะทำให้

พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ จากนั้นตัดแต่งถุงให้อยู่ในรูปของฟิล์มและลดขนาดฟิล์มให้อยู่ในรูปของอนุภาคผงเพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [1] โดยการนำไปอัดเป็นแผ่นขนาด 20×20 เซนติเมตรหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ในแต่ละครั้งจะใช้ฟิล์ม 70–80 กรัม ใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 150 บาร์ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และหล่อเย็นเป็นระยะเวลา 6 นาที จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบไม้อัดพลาสติกเป็นเวลา 5 นาที จะได้เศษพลาสติกขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร แล้วจึงนำมาบดด้วยเครื่องฟัลเวอร์ไรเซอร์ (Pulverizer) แบบค้อนเหวี่ยง ครั้งละ 20 กิโลกรัม เวลา 15 นาที ทำให้ได้อนุภาคผง r-Film ที่มีขนาดเล็กที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแบบหมุน

2.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว (The Axial Powder Flow Apparatus) ดังรูปที่ 1 โดยเครื่องนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมภายในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร ใช้สภาวะการขึ้นรูปที่หมุนด้วยความเร็ว 7 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 190°C ให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์ ใช้วัสดุตัวอย่างครั้งละ 50 กรัม ใช้เวลาขึ้นรูปทั้งกระบวนการประมาณ 50 นาที ในระหว่างการเตรียมชิ้นงานได้มีการบันทึกภาพบริเวณฝาแม่พิมพ์และบันทึกอุณหภูมิตลอดการขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว

(The Axial Powder Flow Apparatus)

3. ผลการทดลอง

3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผงพลาสติก

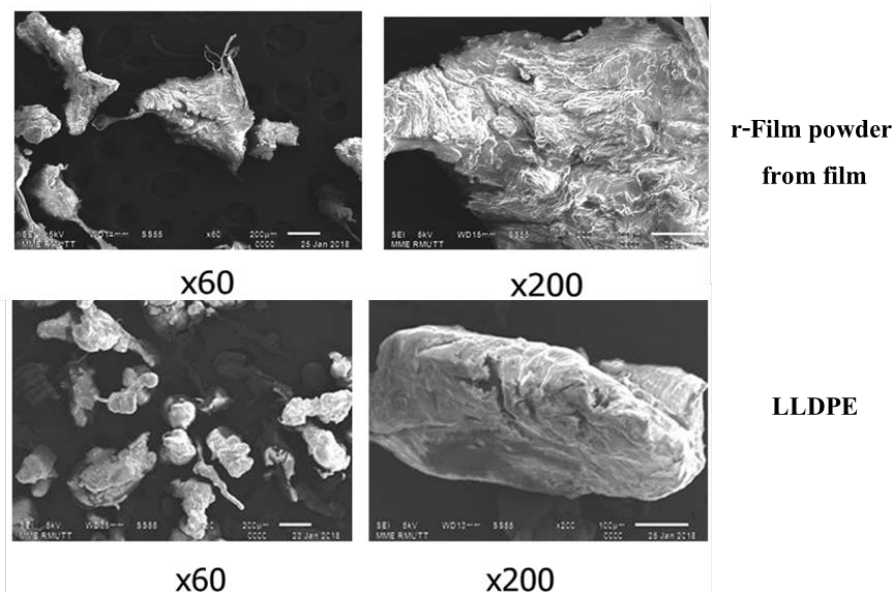
ผลการตรวจสอบลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคป และผลการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคผง r-Film จำนวน 200 อนุภาค ด้วยโปรแกรม ImageJ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคผง r-film ที่เตรียมได้มีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่า LLDPE ที่ขนาด 400 และ 250 ไมโครเมตร ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 1 และค่าความกลม (Circularity) ของอนุภาคผง r-Film และ LLDPE เท่ากับ 0.58 และ 0.68 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่สมมาตรและกลมน้อยกว่า

ตารางที่ 1 ผลการวัดขนาดและค่าความกลมของอนุภาค

Material (Powder form)	Particle Size (μ)	Circularity
LLDPE	250 ± 70.94	0.68 ± 0.09
r-Film	400 ± 131.2	0.58 ± 0.12

จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ชัดว่าอนุภาคผง r-Film มีขนาดใหญ่กว่า LLDPE และอนุภาคผง r-Film มีลักษณะกลมน้อยกว่า LLDPE ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีส่วนที่เกิดจากการยึดตัวเมื่อถูกตัดเฉือนเป็นลักษณะเหมือนหาง (Tail) ที่เห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ LLDPE ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคป อย่างชัดเจนและส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และการไหลแบบแห้ง (Pour ability)

โดยการทดสอบความหนาแน่นรวม ตามมาตรฐาน ASTM D1895 พบว่าอนุภาคผง r-Film ผ่านการลดขนาดมีค่า 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ LLDPE มีค่าเท่ากับ 0.39 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นรวมของอนุภาคผง r-Film น้อยกว่า LLDPE เกิดจากอนุภาคผง r-Film ที่เตรียมมีขนาดใหญ่กว่าและมีส่วนของหางมากกว่า (ค่าความกลมต่ำกว่า) ทำให้มีช่องว่างอนุภาคมากกว่า [2–3] นอกจากนี้ส่วนของหางยังขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคทำให้อัตราการไหลลักษณะเป็นของแข็งต่ำหรือไม่เกิดการไหล

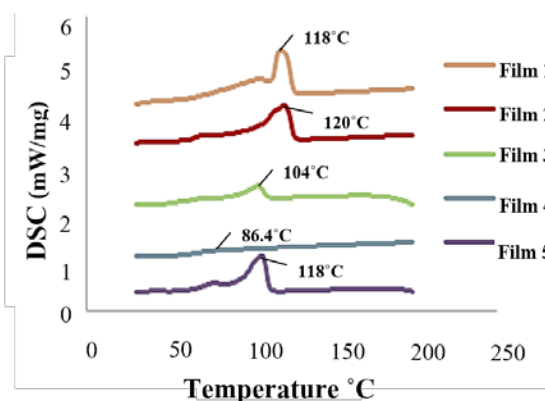


รูปที่ 2 ภาพถ่ายที่กล้องขยาย 60 เท่า และ 200 เท่าจากกล้อง SEM ของอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

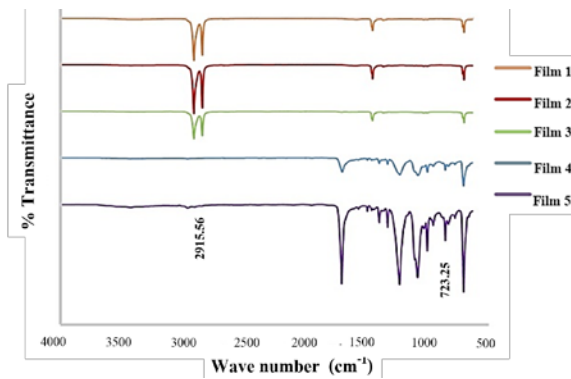
3.2 การทดสอบลักษณะเฉพาะของฟิล์มพลาสติก

จากลักษณะของถุงพลาสติกที่เก็บรวบรวมมาพบว่า มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันอยู่ 5 ตัวอย่าง จึงทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ซึ่งผลที่ได้พบว่าจากกราฟความร้อนพบว่า มีจุดหลอมเหลวที่ในฟิล์มชนิดที่ 1–3 มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 118, 120 และ 104 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับพลาสติกในตระกูลพอลิเอทิลีน (PE) ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 100–130 โดยฟิล์มชนิดที่ 3 มีค่าจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ซึ่งมีค่าจุดหลอมเหลวที่ 100–115 องศาเซลเซียส ส่วนฟิล์มชนิดที่ 1 และ 2 ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ที่มีค่าจุดหลอมเหลวที่ 115–130 องศาเซลเซียส ส่วนฟิล์มชนิดที่ 4 พบค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่ 86.4 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ที่ 85–125 องศาเซลเซียส ในส่วนของฟิล์มชนิดที่ 5 สันนิษฐานว่าจะเป็นพลาสติกผสม [4] จึงได้นำตัวอย่าง 5 ชิ้นมาทดสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแบบฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป (FTIR) ซึ่งให้ผลแสดง

ดังรูปที่ 4 พบว่าฟิล์มชนิดที่ 1–3 แสดงแถบการดูดกลืนรังสีเปอร้เซ็นต์ดูดกลืนมากที่สุดที่ช่วงคลื่นที่ 2915.96 cm^{-1} , 2916.11 cm^{-1} และ 2915.97 cm^{-1} ซึ่งมีเลขคลื่นใกล้เคียงกับสารประกอบ C-H ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก DSC ที่สันนิษฐานเป็นพอลิเอทิลีน ฟิล์มชนิดที่ 4 มีช่วงคลื่นที่ 723.12 cm^{-1} และ 723.25 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นใกล้เคียงกับสารประกอบแอโรมาติก (Aromatic) สอดคล้องผลจาก DSC จึงสันนิษฐานเป็นพอลิสไตรีนที่ ส่วนฟิล์มชนิดที่ 5 พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันอื่นประกอบอยู่ด้วยจึงสันนิษฐานว่าเป็นพลาสติกผสมหรือฟิล์มแบบมัลติเลเยอร์ [5]



รูปที่ 3 กราฟผลการทดสอบฟิล์มทั้ง 5 ชนิดด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC)



รูปที่ 4 กราฟผลการทดสอบฟิล์มทั้ง 5 ชนิด ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแบบ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

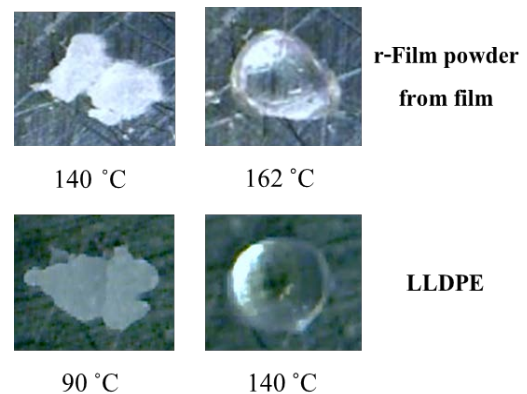
3.3 การทดสอบสมบัติการไหลแบบหลอมเหลว

การทดสอบอัตราการไหลเพื่อทราบถึงค่าดัชนีการไหล (MFI) ซึ่งมีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยใช้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ผลการทดลองพบว่าอนุภาค r-Film มีค่าดัชนีการไหลที่ 1.37 กรัมต่อ 10 นาที และ LLDPE อยู่ที่ 4 กรัมต่อ 10 นาที ซึ่งอนุภาค r-Film มีความหนืดมากกว่า LLDPE เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการจะมีความหนืดสูงกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนและอื่นๆ [6] อีกทั้งอนุภาค r-Film ที่เตรียมได้มีการผสมกันของพลาสติกหลายชนิดซึ่งอ้างอิงจากผลจากเทคนิค DSC และ FTIR

3.4 การทดสอบอัตราการหลอม

การทดสอบนี้ทดสอบโดยการนำอนุภาค r-Film และ LLDPE วางคู่กันบนแผ่นให้ความร้อนพร้อมให้ความร้อนและบันทึกอุณหภูมิพร้อมกับถ่ายวิดีโอ ผลการทดสอบอัตราการหลอมของอนุภาค r-Film ที่เตรียมได้กับ LLDPE พบว่า LLDPE มีอัตราการหลอมติดกันที่อุณหภูมิ 90°C และอนุภาคหลอมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 110°C ในขณะที่อนุภาค r-Film เริ่มหลอมติดกันที่อุณหภูมิ 140°C และหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 162°C ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการหลอมของอนุภาค r-Film มีอัตราการหลอมที่ต่ำกว่าเนื่องจากชนิดของฟิล์มที่นำมาใช้เคลือบนั้น 2 ใน 3 เป็นฟิล์มที่อยู่ในกลุ่ม HDPE ที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่า

LLDPE [7] และสอดคล้องกับผลดัชนีการไหลที่แสดงถึงความหนืดของอนุภาค r-Film ที่มากกว่า



รูปที่ 5 ภาพถ่ายอัตราการหลอมของอนุภาค r-Film และ LLDPE

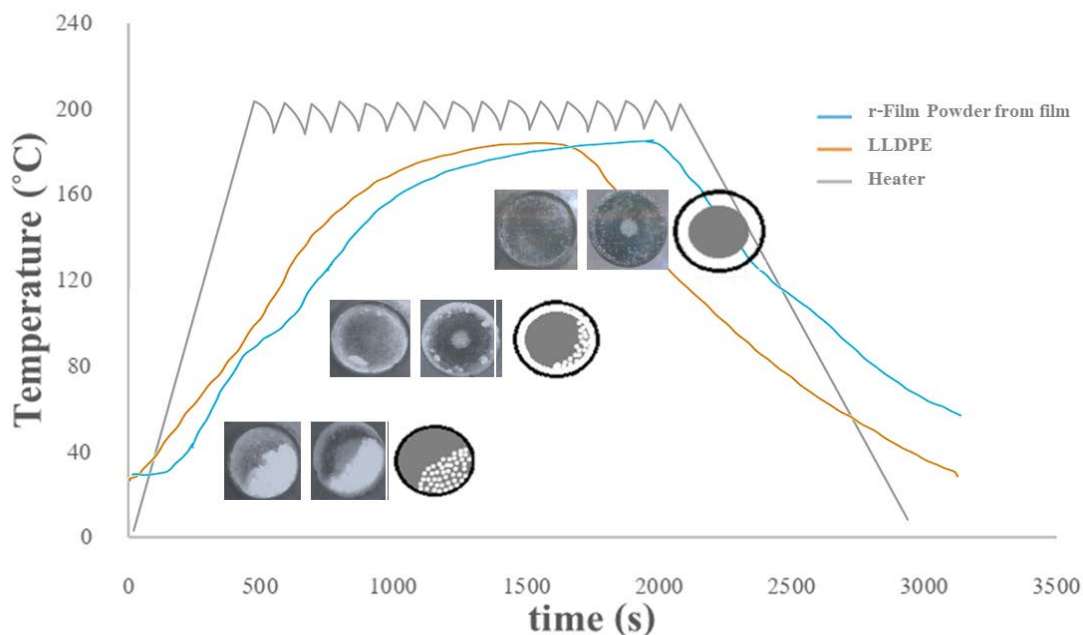
3.5 การทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว

การทดสอบนี้จะทำโดยการเปรียบเทียบค่าเวลาของวัสดุ 2 ชนิด คือ อนุภาค r-Film และ LLDPE นำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาในการขึ้นรูปผ่านไป ซึ่งค่าอุณหภูมิของระบบแสดงไว้ในแผนภูมิเส้นบนสุดที่แสดงถึงอุณหภูมิในการขึ้นรูปจนถึง 190°C ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมภายในเช่น สภาวะที่พลาสติกเริ่มติดผนังแม่พิมพ์ (Tack Temperature) สภาวะที่ผนังพลาสติกเกาะกับผิวแม่พิมพ์ทั้งหมด (Kink Temperature) และสภาวะที่พลาสติกเปลี่ยนจากของแข็งไปของเหลวที่สภาวะนี้พลาสติกจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นลักษณะของอสัณฐาน (Amorphous phase) ทั้งหมดแล้ว ซึ่งสังเกตเห็นภายในแม่พิมพ์ได้ชัดว่าวัสดุที่ติดผิวของแม่พิมพ์จะมีลักษณะใสทั้งหมด โดยกราฟจะแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ขึ้นรูปของ r-Film นานกว่า LLDPE เนื่องจากอนุภาค r-Film มีขนาดใหญ่และความหนาแน่นรวมมากกว่ารวมถึงอัตราการหลอมต่ำกว่าทำให้การแพร่ผ่านความร้อนระหว่างอนุภาคต่ำกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กและกลม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดขนาด ความกลมและอัตราการหลอมที่อัตราการหลอมของอนุภาค r-Film มีอัตราการหลอมที่ต่ำกว่า LLDPE [2],[7]

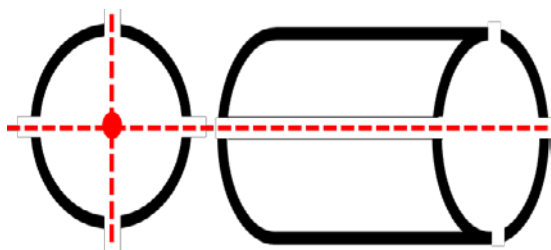
3.6 การวัดการกระจายความหนาของชิ้นงานทดสอบ

จากชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film และ LLDPE ทำการตัดเพื่อเตรียมวัดการกระจายความหนาของชิ้นงาน โดยตัดชิ้นงานออกเป็น 4 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 7 แล้วทำการวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) จากส่วนหน้าของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร) ไปตามความยาวครึ่งละ 1 เซนติเมตร ไปจนสุดชิ้นงานและนำค่า

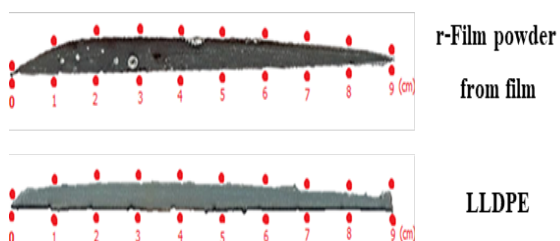
ความหนาที่ได้มาเปรียบเทียบกับ 2 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 8 ผลการวัดค่ากระจายความหนาพบว่าความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง LLDPE มีค่าใกล้เคียงกันตลอดชิ้นงานมากกว่าการใช้ผง r-Film ที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากลักษณะรูปร่างของ LLDPE มีขนาดเล็กและความกลมของ LLDPE มีความกลมมากกว่าอนุภาคผง r-Film [2] เป็นเหตุให้การกระจายความหนาของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว



รูปที่ 7 ภาพการเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการวัดขนาด



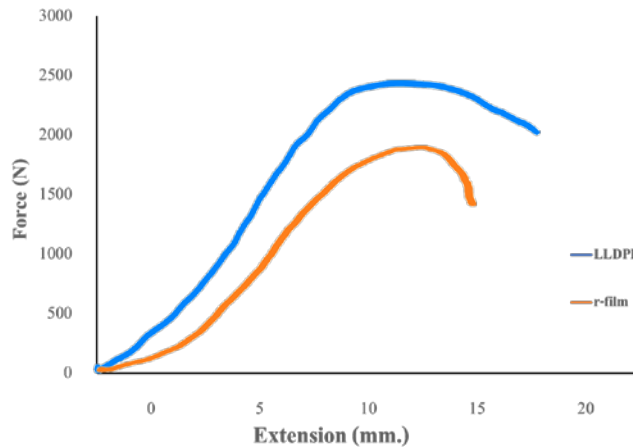
รูปที่ 8 การกระจายของความหนาของชิ้นงาน

3.7 การทดสอบสมบัติการทนต่อการเจาะทะลุ

การทดสอบสมบัติการทนต่อการเจาะทะลุทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D3787 โดยชิ้นงานทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร สภาวะการทดสอบ โหลดเซลล์ 5,000 นิวตัน, ระยะกด 30 มิลลิเมตร, ความเร็ว 305 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะสิ้นสุด 28 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE สามารถรับแรงกดได้ 2,500 นิวตัน และชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film สามารถรับแรงกดได้ 1,946.3 นิวตัน ในขณะที่เดียวกันระยะการขีดตัวของชิ้นงานที่เตรียมได้จากอนุภาคผง r-Film มีค่า 15.384 มิลลิเมตร และระยะขีดของชิ้นงาน LLDPE อยู่ที่ 18.620 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งการรับแรงกดและระยะขีดของชิ้นงานที่ได้เตรียมจาก LLDPE มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-

Film ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เมื่อมีการนำกลับมาใช้ขึ้นรูปอีกครั้งจะมีปัญหาทั้งในเรื่องของการเจือปนกับวัสดุอื่นๆ และการลดลงของน้ำหนักโมเลกุล เนื่องจากการขาดของสายโซ่ [7] ส่งผลสมบัติทางกลที่ต่ำลง เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุใหม่ซึ่งพบว่าในงานวิจัยนี้

ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้จากวัสดุรีไซเคิลมีผลสอดคล้องกันในเรื่องสมบัติทางกล กล่าวคือมีค่าทนต่อการเจาะทะลุได้ต่ำกว่าการใช้วัสดุใหม่ และความเหนียวของวัสดุก็ลดลง โดยสามารถสังเกตเห็นได้จากกระยะยืดที่ลดลงของชิ้นงานทดสอบเมื่อได้รับแรงกระทำ

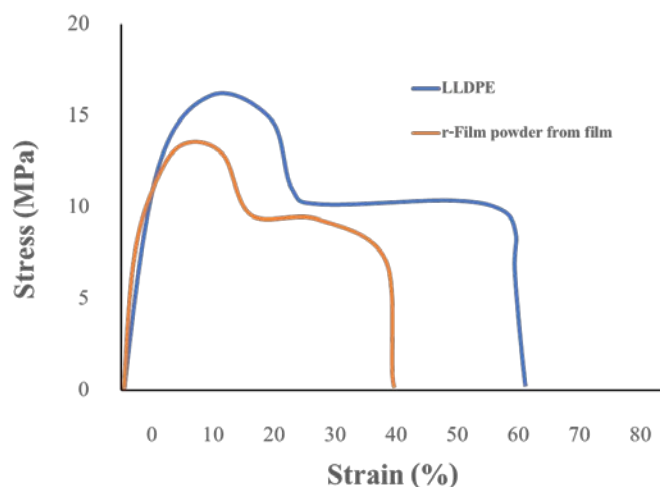


รูปที่ 9 ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อการเจาะทะลุของชิ้นงานที่เตรียมได้จากอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

3.8 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง

การทดสอบการทนสมบัติการต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยมีสภาวะการทดสอบความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะจับชิ้นงาน 115 มิลลิเมตร, โหลดเซลล์ 500 นิวตัน ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film มีค่าทนต่อแรงดึง 11.18 เมกะปาสคาล ในขณะที่ค่าการทนต่อแรงดึงของชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE เท่ากับ 16.80 เมกะปาสคาล แสดงดังรูปที่ 10

ซึ่งสอดคล้องกับผลการทนต่อการเจาะทะลุที่ r-Film มีความแข็งแรงน้อยกว่า LLDPE แสดงให้เห็นว่า วัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะมีค่าสมบัติทางกลที่ลดลง เนื่องจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลจากการขาดของสายโซ่ ส่งผลให้การทนต่อแรงดึงลดลง [8],[9] นอกจากนี้ในงานขึ้นรูปที่ใช้วัสดุรีไซเคิลยังอาจพบปัญหาสมบัติทางกลที่ต่ำลงเนื่องจากการเจือปนของวัสดุอื่นๆ ได้อีกด้วย [8],[10]



รูปที่ 10 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจากอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

3.9 การทดสอบความแข็งที่ผิว

การทดสอบความแข็งที่ผิวด้วยเครื่อง Rockwell Hardness ตามมาตรฐาน ASTM D785 โดยมีสภาวะการทดสอบในโหมด HRR น้ำหนักกด 60 นิวตัน ขนาดหัวกด 0.5 นิ้ว โดยผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film มีค่าความแข็งที่ผิว เท่ากับ 20.62 และค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE เท่ากับ 26.78 แสดงตารางที่ 2 เนื่องจากชิ้นงานที่เตรียมจาก r-Film มีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณผลึก เนื่องจากการขาดของสายโซ่ทำให้เกิดช่องว่างของสายโซ่เพิ่มขึ้น [9],[11] ส่งผลให้ความแข็งลดลง อีกทั้งชิ้นงานเตรียมจากฟิล์มที่เป็นวัสดุมีความแข็งที่ผิวน้อย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่เตรียมได้จาก r-Film และ LLDPE

ชิ้นงาน	ความแข็งของผิวชิ้นงาน
LLDPE	26.78 ± 0.89
r-Film powder from film	20.62 ± 4.1

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดลองพบว่าสามารถนำผงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วทั้ง 5 ชนิดมาขึ้นรูปใหม่ ซึ่งพบปัญหาในการลดขนาดผงพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบผงจึงมีวิธีการเตรียมผงพลาสติกจากลักษณะบางและเหนียวให้อยู่ในลักษณะแข็งด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปและบดลดขนาดด้วยเครื่องบดละเอียดให้อยู่ในรูปแบบผงที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยลักษณะของอนุภาคผง r-Film ที่เตรียมจากเครื่องบด มีขนาดเล็กเฉลี่ย 400 ไมครอน และค่าความกลม 0.58 ซึ่งแตกต่างจาก LLDPE ที่มีขนาด 250 ไมครอน และค่าความกลม 0.68 ส่งผลให้ค่าการกระจายความหนาของชิ้นงานจากอนุภาคผง r-Film ไม่สม่ำเสมอ

ผลการทดลองอัตราการไหลพบว่าความหนืดของอนุภาคผง r-Film สูงกว่า LLDPE เนื่องจากการผลิตฟิล์มจำเป็นต้องใช้พลาสติกที่มีความหนืดสูงส่งผลกับอัตราการหลอมและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การนำขยะพลาสติกมาขึ้นรูปใหม่จะทำให้สมบัติการทน

ต่อการเจาะทะลุลดลง 22.5% สมบัติการทนต่อแรงดึงลดลงที่ 33.5% และความแข็งที่ผิวลดลง 23% เมื่อเทียบกับ LLDPE ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกที่มีการผ่านความร้อนหลายครั้งและระยะเวลาที่นานในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก กรอบงานวิจัยแผนงานสำคัญ (Flagship) ประจำปีงบประมาณ 2563 ชุมชนนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน จากหน่วยบริหารและจัดการทุนวิจัยด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) สัญญาเลขที่ CBLRMUTT63B08 ภายใต้การบริหารทุนวิจัยและสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1.] P. J. Nugent and R. J. Crawford, "INTRODUCTION TO ROTATIONAL MOLDING," in Rotational Molding of Plastics, New York, NY, USA: John Wiley and Sons Inc., 1992, ch. 1, sec. x, pp. 1–14.
- [2.] J. Olinek, C. Anamd and C. T. Bellehumeur, "Experimental Study on the Flow and Deposition of Powder Particles in Rotational Molding," *Polymer Engineering and science*, vol. 45, no. 1, pp.62–73, 2005, doi: 10.1002/pen.20230.
- [3.] A. López Córdoba and S. Goyanes, "Food Powder Properties," in Reference Module in Food Science, 2017, doi: 10.1016/b978-0-08-100596-5.21198-0.
- [4.] A. Scoppio, D. Cavallo, A. J. Müller and D. Tranchida, "Temperature modulated DSC for composition analysis of recycled polyolefin blends," *Polymer Testing*, vol. 113, 2022, Art. no. 107656, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107656.
- [5.] M. Bredács, C. Barretta, L. F. Castillon, A. Frank, G. Oreski, G. Pinter and S. Gergely, "Prediction of

- polyethylene density from FTIR and Raman spectroscopy using multivariate data analysis,” *Polymer Testing*, vol. 104, 2021, Art. no. 107406, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107406.
- [6.] lyondellbasell, “Molecular Structure and Composition Affect Properties and Processability,” in *A Guide to Polyolefin Film Extrusion*, Houston, TX, USA: LyondellBasell, 2015, ch. 3, pp.3–5.
- [7.] B. I. Chaudhary, T. Elizabeth and V. John , “Processing enhancers for rotational molding of polyethylene,” *Polymer Engineering and Science*, vol. 41, no. 10, pp.1731–1742, 2001, doi: 10.1002/pen.10870.
- [8.] Q. Fu, Y. Men and G. Strobl. “Understanding of tensile deformation in HDPE/LDPE blends based on their crystal structure and phase morphology,” *Polymer*, vol. 44, no. 6, pp. 1927–1933, 2003, doi: 10.1016/S0032-3861(02)00940-0.
- [9.] C. N. Kartalis, C. D. Papaspyrides and R. Pfaedner. “Recycling of post-used PE packaging film using the restabilization technique,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 70, no. 2, pp.189–197, 2000, doi: 10.1016/S0141-3910(00)00106-3.
- [10.]H. Jin, J. Gonzalez-Gutierrez, P. Oblak, B. Zupancic, and I. Emri, “The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 97, no. 11, pp. 2262–2272, 2012, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.039.
- [11.]S. P. Cestari, P. J. Martin, P. R. Hanna, M. P. Kearns, L. C. Mendes and B. Millar, “Use of virgin/recycled polyethylene blends in rotational moulding,” *Journal of Polymer Engineering*, vol. 41, no. 6, pp. 509–516, 2021, doi: 10.1515/polyeng-2021-0065.

การประยุกต์ใช้แนวคิดลีนและโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อช่วยในการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญในสำนักงาน

Applying Lean Concept and Software Packages to Support Critical Issue Monitoring Process in Office

พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม¹, อณัญญา จันทวุฒิ² และ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข^{2*}

¹ สาขาวิชาบริหารการปฏิบัติการ, คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พระบรมมหาราชวัง
พระนคร กรุงเทพมหานคร 10200

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Pichawadee Kittipanya-ngam¹, Anunya Chanthavutti² and Kittiwat Sirikasemsuk^{2*}

¹ Department of Operations Management, Thammasat Business School, Thammasat University, Phra Barom Maha
Ratchawang, Pranakorn, Bangkok, 10200, Thailand

² Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Lat Krabang, Lat Krabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: kittiwa.sirikasemsuk@gmail.com

Received: Apr 16, 2022; Revised: Sep 13, 2022; Accepted: Oct 18, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญ (Critical Issue) ของสำนักงานกรณีศึกษาแห่งนี้ โดยปัญหา คือ กระบวนการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญ (Critical Issue) ไม่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้อาศัยแนวคิดลีน (Lean Concept) มาใช้ เริ่มต้นด้วยการศึกษาและแต่งงาน วิเคราะห์งานพร้อมหาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา หลังจากนั้นเทคนิค ECRS ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงกิจกรรม งานวิจัยฉบับนี้ได้นำแพลตฟอร์ม Microsoft Office 365 คือ Microsoft Planner เข้ามาใช้ในการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญ หลังจากการปรับปรุงกระบวนการทำงาน สามารถลดกิจกรรมที่ 2 (ผู้ประสานงาน 5 ฝ่ายจะทำการรวบรวมแบบฟอร์มของส่วนงานที่เกี่ยวข้อง) และ 4 (ผู้ประสานงานส่วนกลางสรุปแบบฟอร์มของทั้ง 5 ฝ่ายให้เป็นแบบฟอร์มของหน่วยงาน) จะถูกตัดทิ้ง นอกจากนี้กิจกรรมอื่น ๆ จะถูกทำงานได้ง่ายขึ้น สุดท้ายสามารถลดเวลากระบวนการทำงานที่เกิดความสูญเปล่าลงได้มากกว่า 50 % และสามารถช่วยลดภาระงานของผู้ประสานงานได้เป็นอย่างมาก

คำสำคัญ: แนวคิดลีน, เทคนิค ECRC , ความสูญเปล่า, กระบวนการติดตามผลการดำเนินงาน, งานสำคัญ

Abstract

The purpose of this research was to improve the performance monitoring process of critical issues in a case study company. The problem was that the process of tracking the performance of critical issues was ineffective. This research applied the lean concept. We started with the study and analysis of the work in order to find the root causes of the problem

by means of the fishbone diagram. Subsequently, ECRS techniques were used to improve activities. The researcher used Microsoft Office 365 platforms, i.e., Microsoft Planner, to track the performance of the important tasks. After work process improvement, the activities 1 (the coordinator of the five departments collected the department forms) and 4 (the central coordinator summarized the forms of the five departments into the agency's form) could be reduced. Finally, the wasteful process time was reduced by more than 50 %. Also, the workload of coordinators was greatly reduced.

Keywords: Lean Concept, ECRS Techniques, Wastes, Performance Monitoring Process, Critical Issue

1. บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ธุรกิจจึงควรจะเรียนรู้ และปรับตัวให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีใหม่ๆ อีกทั้งเนื่องด้วยผลกระทบของโควิด-19 ซึ่งสร้างการเปลี่ยนแปลงให้ทุกธุรกิจ ทุกอุตสาหกรรม องค์กรทุกวันนี้นี้จึงไม่ได้มีแค่การใช้งานแบบออฟไลน์ (Offline) อีกต่อไป วันนี้ดิจิทัลเทคโนโลยีเข้ามาเป็นตัวเร่งให้การขับเคลื่อนองค์กร และธุรกิจปรับตัวเร็วจากเดิม ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงองค์กรให้เป็นดิจิทัล จึงสามารถทำให้ธุรกิจมีความสามารถในการแข่งขัน และสามารถขับเคลื่อนต่อไปได้

จากการที่ทางผู้วิจัยได้เข้าไปศึกษากระบวนการทำงานของสำนักงานกรณีศึกษาแห่งนี้ และสอบถามและรับข้อเสนอแนะ (Feedback) จากพนักงานที่มีส่วนโดยตรงกับการทำงานนั้น ในระหว่างเดือน มิถุนายน-พฤศจิกายน 2564 มีรายละเอียดเบื้องต้น ดังนี้ การติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญรายสัปดาห์ เป็นการกรอกแบบฟอร์มในโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งทางผู้วิจัยพบปัญหา เช่น มีการะงานที่ผู้ประสานงานต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือ (Manual) ซ้ำ ๆ จำนวนหลายครั้ง ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานแบบไม่ลีน (Non-Lean Process) และก่อให้เกิดความสูญเปล่า การรายงานงานสำคัญ (Critical Issue) และการติดตามการแก้ไขในวงประชุมขาดประสิทธิภาพ เนื่องจากผู้เข้าประชุมไม่ใช่เจ้าของงานโดยตรง รวมทั้งข้อเสนอแนะและข้อสรุปจากห้องประชุมไม่เชื่อมต่อดิจิทัลไปยังแบบฟอร์มติดตามงานสำคัญ (Critical Issue) ของสัปดาห์ถัดไป เป็นต้น

ข้อความแห่งปัญหาหลัก (Statement of Problem) สามารถสรุปได้ดังนี้ ระบบการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญ (Critical Issue) ซึ่งรวมถึงงานประจำ (Routine) และ

งานโครงการ (Project) ไม่มีประสิทธิภาพ นั่นคือ ระยะเวลาในกระบวนการสรุปงานสำคัญ (Critical Issue) และสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขนาน ใช้เวลานานในการทำงาน

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ คือ ต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญ (Critical Issue) ของสำนักงานกรณีศึกษาแห่งนี้ โดยปรับปรุงระบบให้เป็นไปตามแนวคิดลีน (Lean) โดยจะใช้โปรแกรม Microsoft Planner ในแพลตฟอร์ม (Platform) ของ Microsoft Office 365

โดยมีดัชนีวัดผลของโครงการวิจัย คือ ระยะเวลาเริ่มกระบวนการสรุปงานสำคัญ (Critical Issue) จนกระทั่งผู้บริหารส่งข้อเสนอแนะการแก้ไขกลับมา (มีหน่วยเป็นวัน) โดยมีค่าก่อนปัจจุบันจำนวน 5 วัน ซึ่งผู้บริหารของบริษัทกรณีศึกษาถือว่าเป็นเวลาที่ล่าช้าเป็นอย่างมาก

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เริ่มจากการกำหนดหัวข้อปัญหาวัตถุประสงค์ และตัววัดความสำเร็จของงานวิจัย (ดูในหัวข้อที่ 1 บทนำ) การศึกษาสภาพปัจจุบัน (ดูในหัวข้อที่ 2) การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (ดูในหัวข้อที่ 3) การออกแบบแนวทางการแก้ไขปัญหา (ดูในหัวข้อที่ 4) การเปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลัง (ดูในหัวข้อที่ 5) และสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ (ดูในหัวข้อที่ 6)

1.2. การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดการผลิตแบบลีน คือ แนวคิดหรือระบบการผลิตที่มุ่งเน้นเรื่องการจัดหรือลดความสูญเปล่าในทุกกระบวนการทำงานลง หรือเน้นเรื่องการเพิ่มคุณค่าของกิจกรรมแต่ละกิจกรรม (Value Added Activity) นำไปสู่การไหลของวัสดุที่ราบเรียบมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าทั้งเรื่องคุณภาพ ระยะเวลาการส่งมอบ ปริมาณ ความหลากหลายของสินค้า และ ต้นทุนหรือราคา

นอกจากนี้การผลิตแบบอื่นจะคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรผลิตน้อยที่สุด [1]

ลักษณะการผลิตแบบอื่นที่น่าสนใจ คือ จะใช้วัตถุดิบหรือวัสดุที่น้อยรวมถึงชิ้นงานระหว่าง กระบวนการและผลิตภัณฑ์ชิ้นสำเร็จในคลังที่น้อย, เงินลงทุนที่น้อย, จำนวนพนักงานหรือเวลาที่น้อย พื้นที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่น้อย [1]

หลักการ ECRS คือ หลักการที่เป็นหนึ่งในหลายเทคนิคที่มีประสิทธิภาพมากในการปรับปรุงวิธีการทำงาน และเป็นอีกหนึ่งเทคนิคพื้นฐานของการศึกษาการเคลื่อนไหว (Motion Study) อีกทั้งยังเป็นหลักการที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและค่อนข้างจะครอบคลุมแนวคิดของวิธีการปรับปรุงการทำงาน ภายใต้จุดเด่นดังกล่าวนี้ [1]

หลักการ ECRS จึงถูกรวมเข้าเป็นส่วนหนึ่งของเทคนิคการเพิ่มผลิตภาพ, ไคเซ็น (Kaizen), และการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) หลักการ ECRS จะประกอบด้วย 4 หลักการ คือ

1. หลักการกำจัด (Eliminate)
2. หลักการรวมกัน (Combine)
3. หลักการจัดใหม่ (Re-arrange)
4. หลักการทำให้ง่าย (Simplify)

ปัญหาใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ หลักการ ECRS จะถูกนึกถึงเป็นอันดับแรก ๆ เพื่อเป็นแนวทางของการปรับปรุง หลักการ ECRS มักจะถูกใช้หลังจากที่แตกภารกิจ (Work Task) หรือขั้นตอนการทำงานออกเป็นงานย่อย (Work Element) หรือส่วนย่อยการเคลื่อนไหวพื้นฐาน (Basic Motion Element) [1]

จากการทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยพบงานวิจัยหลาย ๆ งานที่ต้องการปรับปรุงกระบวนการติดตามผลการดำเนินงานของหน่วยงาน โดยใช้ซอฟต์แวร์รวมทั้งเครื่องมืออื่น ๆ มาช่วย ทำให้สามารถติดตามงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว เช่น ในงานวิจัยของ Yupu et al. [2] ได้ศึกษาและนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาประยุกต์ใช้กับการรายงานและติดตามผลการดำเนินงาน โครงการ (Performance Agreement; PA) ให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงและทำงานร่วมกันได้พร้อมกันบนคลาวด์คอมพิวเตอร์

(Cloud Computing) เพื่อลดเวลาและขั้นตอนการทำงาน มีความสะดวกในการเข้าถึง สามารถติดตามความคืบหน้าและตรวจสอบประวัติการกรอกข้อมูลได้โดยใช้กูเกิ้ลแอป (Google App) ผ่านบัญชี (Account) ของมหาวิทยาลัย ซึ่งวิธีการทำระบบนั้นใช้หลักการของวงจรการพัฒนากระบวนการสารสนเทศ (System Development Life Cycle; SDLC) ซึ่งพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยให้การรายงานผลการดำเนินงานโครงการมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในงานวิจัยของ Taron [3] ได้ศึกษาวิเคราะห์ ออกแบบและจัดทำระบบการติดตามงานโครงการที่มีภายใน (ผู้ใช้งานสามารถบันทึกส่งงานให้กับงานที่เกี่ยวข้องและแจ้งสาเหตุปัญหาและความล่าช้าในงานผ่านทางเว็บไซต์) ด้วยการพัฒนารูปแบบระบบในลักษณะการทำงานแบบไคลเอนต์เซิร์ฟเวอร์ (Client Server) ร่วมกับการทำงานในระบบเว็บแอปพลิเคชัน (Web-Based Application) โดยนำเสนอข้อมูลผ่านทางระบบเว็บไซต์ที่ใช้งานภายในองค์กร

ในงานวิจัยของ Thongnoppakoon [4] ได้ศึกษาและเสนอวิธีการปรับปรุงกระบวนการแจ้งซ่อมสิ่งพิมพ์โดยอาศัยเทคนิคลีน (Process Improvement for Defected Notification by Lean Technique) โครงการนี้เป็นการจัดการปรับปรุงระบบงานแจ้งซ่อมสิ่งพิมพ์ของหน่วยซ่อมสิ่งพิมพ์ ซึ่งแต่เดิมได้ทำการจัดเก็บข้อมูลแบบลงสมุด ทำให้งานเกิดความล่าช้า ซึ่งต้องทำการเขียนข้อมูลซ้ำ ๆ โดยได้นำเอาแนวทางการปรับเปลี่ยนกระบวนการงานเดิม (Process Improvement) โดยใช้หลักการของลีน (Lean) มาใช้เพื่อลดขั้นตอนในการแจ้งซ่อมสิ่งพิมพ์ และลดเวลาในการทำงาน โดยได้ทำการพัฒนาโปรแกรม (Windows Form) ติดต่อกับฐานข้อมูล เข้ามาใช้ในโครงการ โดยลดขั้นตอนจาก 5 ขั้นตอน เหลือเพียง 3 ขั้นตอน และสามารถลดเวลาการทำงานลง ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดต้นทุนค่าล่วงเวลา

ในงานวิจัยของ Vajeenuruksakulchai [5] ได้ศึกษาเรื่องการหาสาเหตุเพื่อแก้ปัญหาความล่าช้าของโครงการปรับปรุงพื้นที่ โดยใช้การวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา และจัดลำดับความสำคัญของปัญหาด้วยแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) แล้วจึงใช้เทคนิคการปรับปรุงกระบวนการทำงานด้วยแนวคิด ECRS มาใช้เพื่อออกแบบ

กระบวนการทำงานใหม่ จึงทำให้เกิดการสร้างกระบวนการทำงานใหม่ที่มีมาตรฐาน ลดระยะเวลาในการทำงานลงได้ และสามารถบริหารจัดการโครงการปรับปรุงพื้นที่ให้เสร็จตามแผนงานที่กำหนด

ในงานวิจัยของ Intarachim [6] ได้ศึกษาและนำแนวคิดลีน (Lean) มาประยุกต์ใช้ในการให้บริการทรัพยากรสารสนเทศประเภทเอกสารรายงานวิจัยระดับปริญญาตรีของคณะเศรษฐศาสตร์ภายในห้องสมุดคณะเศรษฐศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เพื่อลดขั้นตอนและระยะเวลาในการปฏิบัติงานของห้องสมุด เพิ่มประสิทธิภาพการบริการเอกสารรายงานวิจัย และสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้ใช้บริการเอกสารรายงานวิจัย

ในงานวิจัยของ Mihajlovic และ Velasevic [7] ได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่เรียกว่า ซอฟต์แวร์ด้านการบริหารจัดการโครงการ (Software Project Management System; SPMS) โดย SPMS ช่วยสนับสนุนการวางแผนและการติดตามกิจกรรมทั่วไปของโครงการที่เกี่ยวข้องกับซอฟต์แวร์ (Software Projects) และการทดสอบการทำงานของฟังก์ชันต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กัน โดยหน้าที่หลักของ SPMS เกี่ยวกับการติดตามกิจกรรมทั่วไป จากการเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่ช่วยในการจัดการโครงการแบบทั่วไป (Standard Project Management Tool) พบว่า SPMS เหมาะสมในการนำมาติดตามผลการดำเนินงานของโครงการมากกว่า เนื่องจากง่ายต่อการติดตามงาน รวมทั้งประหยัดเวลามากขึ้น

ในงานวิจัยของ Jittavani et al. [8] ได้ศึกษาและออกแบบระบบติดตามและประเมินผลงาน เพื่อนำมาทดแทนกระบวนการมอบหมายงานแบบเดิม ๆ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือในการติดตามงานที่ได้ทำการมอบหมายงานของพนักงานแต่ละคนด้วย เนื่องจากจำนวนนักศึกษาในสถาบันอุดมศึกษามีจำนวนลดลงทั่วทุกมหาวิทยาลัย การรักษาระดับจำนวนคนให้มีความเหมาะสมกับงานจึงเป็นสิ่งสำคัญในการบริหารจัดการสถาบัน จึงได้คิดค้นระบบการติดตามงาน (Job Tracking and Assessment System; JTS) ซึ่งนอกจากจะช่วยเรื่องงานที่เป็นงานประจำและกระบวนการติดตามงานแล้ว ยังช่วยในเรื่องการมอบหมายงานให้พนักงานแต่ละคนอย่างสมดุลและมีความเหมาะสม

ในงานวิจัยของ Garcia-Lopez และ Fischer [9] ได้ศึกษาและจัดทำระบบติดตามงาน (Work Tracking System; WTS) สำหรับงานก่อสร้าง ระบบนี้สามารถจัดการกระแสข้อมูลระหว่างผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการเพื่อให้การสื่อสารระหว่างช่างงานดีขึ้น ทั้งในเรื่องของขอบเขตงาน ความคืบหน้า และความสำเร็จ WTS จะทำการรายงานความคืบหน้าในการทำงานโดยอัตโนมัติ และเปรียบเทียบกับแผนเดิม ทำให้ผู้คุมงานและพนักงานมีความเข้าใจตรงกันเรื่องสถานะของโครงการ

ในงานวิจัยของ Shweta [10] ได้ศึกษาและจัดทำระบบติดตามเวลาการทำงานร่วมกัน สำหรับพนักงาน (Collaborative Time Tracking System; CTTS) ซึ่งได้ถูกออกแบบมาเพื่ออำนวยความสะดวกในเรื่องของการจัดการองค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจัดให้มีระบบรวมศูนย์ที่สามารถใช้ร่วมกันระหว่างเจ้าหน้าที่ได้ วัตถุประสงค์หลักคือการสร้างผลประโยชน์ให้กับบริษัท เช่น การดึงข้อมูลมาใช้ได้อย่างรวดเร็ว โดยหลีกเลี่ยงความสับสนและสถานการณ์ที่คลุมเครือซึ่งความผิดพลาดอาจก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงทั้งในแง่ของปัจจัยทางการเงินและเวลา ระบบนี้ถือว่าประสบความสำเร็จ เนื่องจากทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงระบบได้ผ่านทางออนไลน์ สามารถดึงข้อมูลได้ทุกที่และทุกเมื่อที่ต้องการ และจัดทำรายงานงานสำคัญเพื่อสนับสนุนงานประจำของพนักงาน

เมื่อปี 2011 Khumlamay [11] ได้ประยุกต์ใช้หลักการบริหารโครงการ จุดเด่นในงานวิจัยนี้ คือ การนำระบบเทคโนโลยีสารสนเทศมาใช้ในการจัดการสินค้าคงคลังเพื่อแก้ปัญหาการทำงานที่ซับซ้อน และช่วยจัดการฐานข้อมูลคลังสินค้าให้เป็นแบบทันที (Real-time) ในขณะปี 2015 Dowsuk และ Kawtummachai [12] การประยุกต์ใช้แนวคิดลีนเพื่อเพิ่มผลผลิตภาพกรณีศึกษาการจัดการสินค้ากลุ่มเบเกอรี่ของร้านสะดวกซื้อแห่งหนึ่งอาศัยหลัก SWIH เพื่อวิเคราะห์กระบวนการทำงาน โดยได้ลดการทำงานที่ไม่จำเป็นปรับกระบวนการบางกระบวนการลงได้ ในปีเดียวกันนั้น Udomphan และ Khonchoho [13] ได้พัฒนาตัวแบบระบบบาเซลทูลของธนาคารกสิกรไทย โดยอาศัยหลักการลีน ซิกซ์ซิกมา โดย

สามารถการกำจัดความสูญเปล่าโดยลดการทำงานของโปรแกรมที่ซ้ำซ้อน ลดจำนวนข้อผิดพลาดลง และสามารถกำจัดความสูญเปล่าภายในกระบวนการเพื่อส่งรายงานได้ก่อนกำหนดเวลา อนึ่ง ระบบบาเซลทูจะมีมาโครเพิ่มแพจเป็นเครื่องมือในตรวจสอบข้อมูลและฟรีเทสโพรเซสเป็นการทดสอบและประมวลผลข้อมูล

และเมื่อเร็ว ๆ นี้ ปี 2021 Dechasirikun และ Pisitkasem [14] ได้ปรับปรุงกระบวนการจัดซื้อและจัดส่งสินค้าเกษตรของบริษัท โดยหาสาเหตุของปัญหาโดยการใช้เครื่องมือ 5WHI ทำการสรุปด้วยแผนภูมิแก๊งปลาและทำการปรับปรุงด้วยแนวคิดแบบลีน (Lean) โดยใช้เครื่องมือ ECRS และทฤษฎีการขนส่ง หลังการปรับปรุงพบว่าเมื่อปรับปรุงกระบวนการแล้วสามารถจัดซื้อสินค้าได้ปริมาณตามที่ต้องการและยังลดระยะเวลาในขั้นตอนการจัดซื้อและจัดส่งลงไปได้กว่า 68 เปอร์เซ็นต์

จากการทบทวนวรรณกรรม จะเห็นได้ว่า มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งต้องเสียเวลาในการพัฒนาโปรแกรมเอง เพื่อที่จะแก้ปัญหาในระบบการติดตามงานทั่วไป รวมทั้งไม่มีการแบ่งงานตามระดับของความสำคัญ (Priority) นอกจากนี้ มีงานวิจัยจำนวนไม่มากที่ประยุกต์ใช้หลักการของลีนมาช่วยในการวางแผนและพัฒนาระบบการติดตามการทำงานในสำนักงาน (เพื่อกำจัดและลดขั้นตอนที่เป็นความสูญเปล่าออกไป) ทั้ง ๆ ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมีการประยุกต์ใช้ลีนมาช่วยในการแก้ปัญหาในระบบการติดตามงานสำคัญภายในสำนักงาน เพื่อให้สามารถอัพเดทและส่งข้อมูลได้ในทันที (Real time) อีกทั้งยังมีการแบ่งงานตามระดับของความสำคัญ (Priority) ออกเป็น 3 สถานะ เพื่อให้สามารถคำนึงได้ว่างานไหนควรทำก่อนหรือหลัง

งานวิจัยนี้อาศัยแนวคิดลีน (Lean Concept) มาใช้เริ่มต้นด้วยการศึกษาและแต่งงาน วิเคราะห์งานพร้อมหาสาเหตุของปัญหาคด้วยแผนผังแก๊งปลา หลังจากนั้นเทคนิค ECRC ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงกิจกรรม

2. การศึกษาสภาพปัจจุบัน

ผู้วิจัยสามารถทำการวิจัยในบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นลักษณะสำนักงาน เพื่อสนับสนุนธุรกิจค้าปลีกและค้าส่ง เมื่อ

พิจารณาเฉพาะในสำนักงานกรณีศึกษา จะมีหน้าที่การวางแผนสถานที่ วิเคราะห์ความคุ้มค่า จัดสร้างสถานที่ ตกแต่งสถานที่ และจัดเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวก ซึ่งจะทำหน้าที่สนับสนุนการมีลูกค้ามาติดต่อว่าจ้างหรือกลุ่มบริษัทในเครือให้บริษัทแห่งนี้ช่วยดำเนินงานแทนให้ เช่น การเปิดร้านขายชิ้นส่วนรถยนต์ การเปิดร้านขายอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

หน่วยงานบริหารการก่อสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งฝ่ายที่เกี่ยวข้องได้ 5 ฝ่าย ได้แก่ ฝ่ายบริหารสำนักงาน ฝ่ายบริหารกลยุทธ์ ฝ่ายควบคุมงานก่อสร้าง ฝ่ายวิจัยและพัฒนางานก่อสร้าง และฝ่ายบริหารทรัพย์สิน

ในแต่ละฝ่าย จะมีงานสำคัญ (Critical Issue) ที่ยังคงค้างอยู่ และต้องถูกดำเนินงาน โดยจะแบ่งงานตามระดับของความสำคัญ (Priority) ออกเป็น 3 สถานะ (ดังตารางที่ 1) ได้แก่

1. สีแดง หมายถึง งานที่มีความสำคัญและเร่งด่วน
2. สีเหลือง หมายถึง งานที่มีความสำคัญแต่ไม่เร่งด่วน
3. สีเขียว หมายถึง งานที่ไม่มีความสำคัญและไม่เร่งด่วน

ในสำนักงานกรณีศึกษา กระบวนการสรุปงานสำคัญ (Critical Issue) และสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขรายสัปดาห์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 จะมีกิจกรรมทั้งหมด 7 กิจกรรม โดยใช้ระยะเวลาในกระบวนการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขเฉลี่ยทั้งหมด 5 วัน โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้พิจารณาข้อมูลในช่วงระยะเวลา 1 เดือน

กิจกรรมที่ 1 ผู้ประสานงานฝ่ายทำการสรุปงานสำคัญ และสิ่งที่ต้องแก้ไขลงแบบฟอร์ม จากนั้นทำการส่งแบบฟอร์มให้กับผู้ประสานงาน 5 ฝ่าย ซึ่งภายในหน่วยงานจะมีการติดตามงานสำคัญผ่านการกรอกแบบฟอร์มในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อค้นหางานสำคัญ และติดตามแนวทางแก้ไขรายสัปดาห์ โดยพนักงานจะต้องกรอกแบบฟอร์มสรุปงานสำคัญ (Critical Issue) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานะ โดยหน่วยงานจะใช้สีเป็นตัวบ่งบอกเพื่อทำการจัดลำดับความสำคัญของงานว่างานไหนเป็นงานที่มีความสำคัญและเร่งด่วน รวมทั้งบอกความคืบหน้าสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อผู้รับผิดชอบ และกำหนดเวลาเสร็จ

งาน ดังตัวอย่างการกรอกแบบฟอร์มดังตารางที่ 1 ซึ่งกิจกรรมนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 1 วัน

กิจกรรมที่ 2 ผู้ประสานงาน 5 ฝ่ายจะทำการรวบรวมแบบฟอร์มของส่วนงานที่เกี่ยวข้องลงแบบฟอร์มฝ่ายแล้วส่งมอบให้คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย ซึ่งกิจกรรมนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 1 วัน

กิจกรรมที่ 3 คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบฟอร์ม แล้วทำการส่งแบบฟอร์มให้กับผู้ประสานงานส่วนกลาง เพราะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของงานอยู่เสมอ ซึ่งกิจกรรมนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 1 วัน

กิจกรรมที่ 4 ผู้ประสานงานส่วนกลางสรุปแบบฟอร์มของทั้ง 5 ฝ่ายให้เป็นแบบฟอร์มของหน่วยงาน จากนั้นส่งให้คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย ซึ่งกิจกรรมนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 0.5 วัน

กิจกรรมที่ 5 คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย รายงานงานสำคัญแก่ผู้บริหาร เพื่อรับข้อเสนอแนะ ซึ่งกิจกรรมนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 0.22 วัน

กิจกรรมที่ 6 ผู้บริหารให้ข้อเสนอแนะและติดตามความคืบหน้าของสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ เพราะผู้บริหารจำเป็นต้อง

จะต้องให้ข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขและปรับปรุงต่อไป ซึ่งกิจกรรมนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 0.5 วัน

กิจกรรมที่ 7 ผู้ประสานงานส่วนกลางสรุปข้อเสนอแนะจากการประชุมส่งอีเมลให้ผู้ประสานงานฝ่ายเพื่อให้แต่ละฝ่ายรับรู้แนวทางการแก้ไขปัญหา ซึ่งกิจกรรมนี้ใช้เวลาเฉลี่ย 0.78 วัน

โดยสามารถสรุปตำแหน่งหรือกลุ่มของพนักงานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

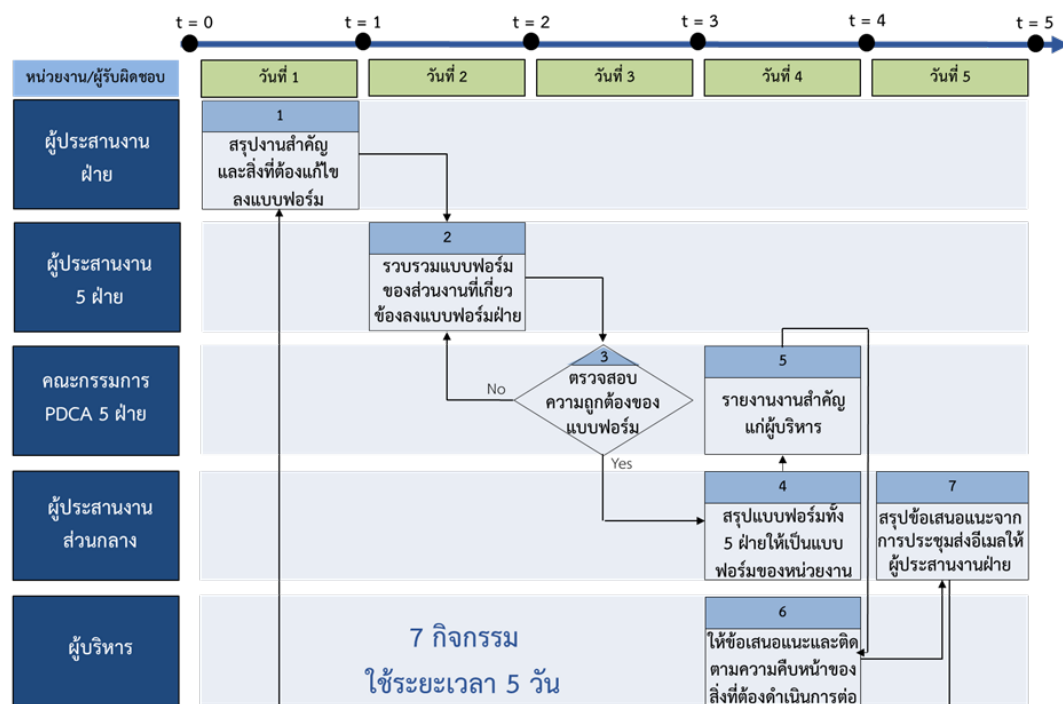
- ผู้ประสานงานฝ่าย (กิจกรรมที่ 1) ทำหน้าที่สรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องแก้ไข

- ผู้ประสานงาน 5 ฝ่าย (กิจกรรมที่ 2) มีเพียง 1 คน ทำหน้าที่รวบรวมแบบฟอร์มจากผู้ประสานงานแต่ละฝ่าย

- คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย (กิจกรรมที่ 3 และ 5) มีเพียง 1 คณะ ทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของแบบฟอร์ม

- ผู้ประสานงานส่วนกลาง (กิจกรรมที่ 4 และ 7) มีเพียง 1 คน ทำหน้าที่สรุปแบบฟอร์มทั้ง 5 ฝ่ายให้เป็นแบบฟอร์มของหน่วยงาน

- ผู้บริหาร (กิจกรรมที่ 6) มีหน้าที่ให้ข้อเสนอแนะและติดตามความคืบหน้าของสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ



รูปที่ 1 ฟังงานกระบวนการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไข (ก่อนปรับปรุง)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแบบฟอร์มสรุปงานสำคัญ (Critical Issue)

หน่วยงาน	งานสำคัญ	ระดับความ เร่งด่วน เขียว / เหลือง / แดง**	ตอบโต้ทางด้าน Hard Side Soft Side Quality Side**	ความคืบหน้า ณ วันที่	สิ่งที่ต้อง ดำเนินการต่อ	ผู้รับผิดชอบ	กำหนดเสร็จ
หน่วยงาน บริหารการ ก่อสร้าง	การเคลียร์ผลการ ตรวจนับทรัพย์สิน	สีแดง	Hard Side			คุณ A	31 ม.ค. 21
	ระบบการจัดการ ทรัพย์สินไม่เป็น มาตรฐาน	สีเขียว	Hard Side			คุณ B	31 ม.ค. 21
	ติดตามแผนการ จัดการทรัพย์สิน	สีแดง	Hard Side			คุณ C	28 ก.พ. 21
	แผนเคลียร์ ทรัพย์สินตกค้าง	สีเหลือง	Hard Side			คุณ D	28 ก.พ. 21

หมายเหตุ : *สีแดง หมายถึง สำคัญ เร่งด่วน, สีเหลือง หมายถึง สำคัญแต่ไม่เร่งด่วนและสีเขียว หมายถึง ไม่สำคัญและไม่เร่งด่วน

**Hard Side หมายถึง ความรู้ด้านทฤษฎี การบริหาร และการจัดการต่างๆ

Soft Side หมายถึง ความรู้เกี่ยวกับด้านจิตใจหรือจิตวิญญาณ

Quality Side หมายถึง ความรู้เกี่ยวกับด้านคุณภาพ

จากรูปที่ 1 (ก่อนการปรับปรุง) ในปัจจุบัน พบว่า ระบบการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญล่าช้า โดยใช้ระยะเวลาทั้งหมด 5 วัน

3. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและวิธีการทำงาน

จากปัญหาคือ ระยะเวลาในกระบวนการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขนาน สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุของปัญหาได้ดังรูปที่ 2 โดยมีคำอธิบายดังนี้

กิจกรรมที่ 1 ผู้ประสานงานฝ่ายทำการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องแก้ไขลงแบบฟอร์ม จากนั้นทำการส่งแบบฟอร์มให้กับผู้ประสานงาน 5 ฝ่าย เนื่องจากปัจจุบันเป็นแบบฟอร์ม Excel ทำให้เมื่อต้องการแก้ไขแบบฟอร์มจะต้องแจ้งเรื่องไปยังผู้ประสานงาน 5 ฝ่าย ทำให้เกิดความยุ่งยากในการสื่อสาร รวมทั้งข้อมูลไม่อัปเดตในทันที จะแก้ไขโดยการทำให้ง่าย กรณีที่มีการแก้ไขข้อมูลในแบบฟอร์มจะสามารถอัปเดตข้อมูลใหม่ได้ในทันที

กิจกรรมที่ 2 ผู้ประสานงาน 5 ฝ่ายรวบรวมแบบฟอร์มของส่วนงานที่เกี่ยวข้องลงแบบฟอร์มฝ่าย เนื่องจากการทำงานเดิมช้า ๆ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ไม่จำเป็น

กิจกรรมที่ 3 คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบฟอร์ม แล้วทำการส่งแบบฟอร์มให้กับผู้ประสานงานส่วนกลาง เนื่องจากปัจจุบันมีการส่งแบบฟอร์มผ่านทางอีเมล ทำให้เกิดความยุ่งยากและเสียเวลา ซึ่งเป็นภาระงานของคณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย จะแก้ไขโดยการทำให้ง่าย โดยให้สามารถเข้าถึงแบบฟอร์มได้ โดยไม่ต้องส่งตัวแบบฟอร์มไปมาให้เสียเวลาและยุ่งยาก

กิจกรรมที่ 4 ผู้ประสานงานส่วนกลางสรุปแบบฟอร์มทั้ง 5 ฝ่าย ให้เป็นแบบฟอร์มของหน่วยงาน เนื่องจากการทำงานเดิมช้า ๆ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ไม่จำเป็น

กิจกรรมที่ 5 คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย รายงานงานสำคัญแก่ผู้บริหาร เนื่องจากปัจจุบันเป็นการส่งไฟล์ผ่านทางอีเมล ทำให้เกิดความยุ่งยากและเสียเวลา ซึ่งเป็นภาระงานของคณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย จะแก้ไขโดยการทำให้ง่าย โดย

ให้สามารถเข้าถึงแบบฟอร์มได้ โดยไม่ต้องส่งตัวแบบฟอร์มไปมาให้เสียเวลาและยุ่งยาก

กิจกรรมที่ 6 ผู้บริหารให้ข้อเสนอแนะและติดตามความคืบหน้าของสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ เนื่องจากปัจจุบัน ผู้บริหารให้ข้อเสนอแนะในห้องประชุม ซึ่งผู้เข้าประชุมไม่ใช่เจ้าของงานโดยตรง ทำให้การรายงานงานสำคัญและการติดตามแก้ไขในวงประชุมขาดประสิทธิภาพ จะแก้ไขโดยการทำให้ง่าย โดยให้เจ้าของสามารถเข้าถึงไฟล์นั้นได้ด้วยตนเอง รวมทั้งสามารถรับรู้ข้อเสนอแนะได้โดยตรงไม่ต้องผ่านคนกลาง

กิจกรรมที่ 7 ผู้ประสานงานส่วนกลางสรุปข้อเสนอแนะจากการประชุมส่งอีเมลให้ผู้ประสานงานฝ่าย เนื่องจากปัจจุบัน ข้อเสนอแนะและข้อสรุปห้องประชุมไม่เชื่อมต่ออัตโนมัติไปยังแบบฟอร์มติดตามงานสำคัญของสัปดาห์ถัดไป จะแก้ไขโดยการทำให้ง่ายโดยการทำให้ข้อเสนอแนะและข้อสรุปจากห้องประชุมสามารถถ่ายทอดสู่เจ้าของงานได้โดยตรงและไม่ผ่านคนกลาง รวมทั้งข้อมูลอัพเดทในทันที

จะพบว่าในกระบวนการนี้มีขั้นตอนที่ต้องทำงานเดิมซ้ำ ๆ ซึ่งเป็นภาระของผู้ประสานงานที่ต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือ (Manual) จำนวนหลายครั้ง และในกรณีที่มีการแก้ไขข้อมูลในแบบฟอร์ม ผู้ประสานงานจะต้องรวบรวมแบบฟอร์มซ้ำ ๆ ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานแบบไม่ลีน (Non-Lean Process) และก่อให้เกิดความสูญเปล่าเนื่องจากกระบวนการทำงานไม่มีประสิทธิภาพ (Inefficient Process) ทำให้สูญเสียเวลาและประสิทธิภาพการทำงาน

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่า สาเหตุหลักของปัญหาในกิจกรรมคือการรวบรวมข้อมูลแบบไม่อัตโนมัติ คือ ข้อมูลไม่เชื่อมต่อกันถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคนได้ในทันที (Real Time) โดยต้องผ่านคนกลาง รวมทั้งไม่สามารถให้เจ้าของงานสามารถรายงาน (หรือดูรายงาน) และติดตามการแก้ไขปัญหาได้ด้วยตนเอง โดยสามารถเขียนอธิบายสาเหตุของปัญหาได้ดังนี้

- มีภาระงานที่ผู้ประสานงานต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือซ้ำ ๆ จำนวนหลายครั้ง ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานที่เกิดความสูญเปล่า (กิจกรรมที่ 2 และ 4)

- กรณีมีการแก้ไขข้อมูลในแบบฟอร์ม ผู้ประสานงานจะต้องรวบรวมแบบฟอร์มซ้ำ ๆ เนื่องจากข้อมูลไม่เชื่อมต่อกันอัตโนมัติ (กิจกรรมที่ 1 และ 2)

- การรายงานงานสำคัญและการติดตามการแก้ไขในวงประชุมขาดประสิทธิภาพ เนื่องจากผู้เข้าประชุมไม่ใช่เจ้าของงานโดยตรง (กิจกรรมที่ 5, 6 และ 7)

- ข้อเสนอแนะและข้อสรุปห้องประชุมไม่เชื่อมต่ออัตโนมัติไปยังแบบฟอร์มติดตามงานของสัปดาห์ถัดไป (กิจกรรมที่ 5, 6 และ 7)

สามารถจำแนกกิจกรรมออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. กิจกรรมที่เพิ่มคุณค่า (Value Added (VA) Activity) ได้แก่ กิจกรรมที่ 1, 5, 6 และ 7

2. กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (Non-Value Added (NVA) Activity) ได้แก่ กิจกรรมที่ 2 และ 4 ซึ่งจัดว่าเป็นความสูญเปล่า (Waste) ตามหลักการของลีน

3. กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าแต่จำเป็น (Necessary but Non-Value Added (NNVA) Activity) ได้แก่ กิจกรรมที่ 3

จากการนำทฤษฎี ECRS มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงระบบ สามารถเขียนผังงานกระบวนการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขรายสัปดาห์ได้ ดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 จากการวิเคราะห์สาเหตุจะพบว่า กิจกรรมที่ไม่สามารถตัดออกได้ คือ กิจกรรมที่ 1, 3, 5, 6 และ 7 แต่กิจกรรมที่สามารถตัดออกได้ ได้แก่ กิจกรรมที่ 2 และ กิจกรรมที่ 4

อนึ่ง กิจกรรมที่ 1, 3, 5, 6, และ 7 อาจจะถูกปรับปรุงโดยใช้หลักการของการทำให้ง่าย (Simplify) ในหลักการของ ECRS

4. การออกแบบแนวทางการแก้ไขปัญหา

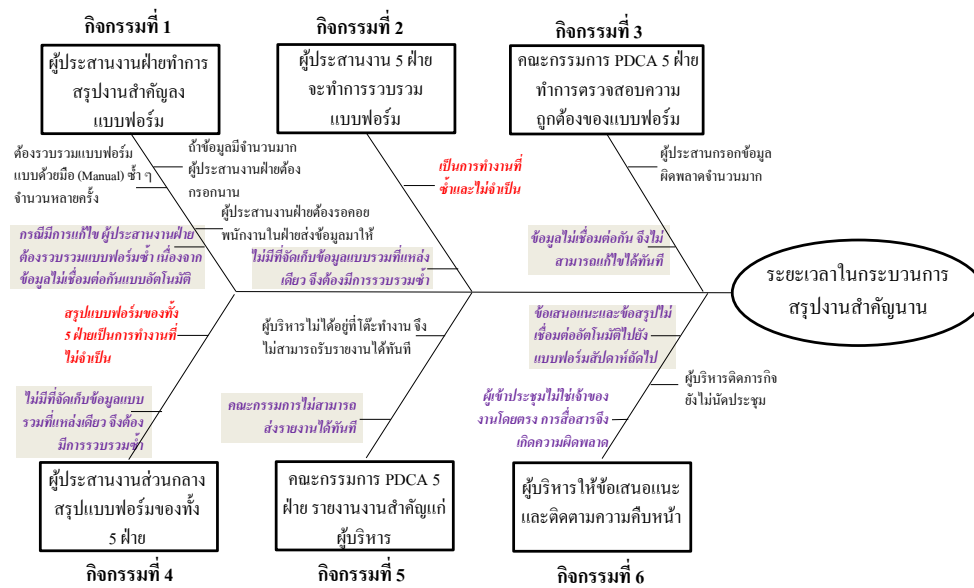
4.1.เกณฑ์ที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว

จากปัญหาเรื่องกระบวนการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญไม่มีประสิทธิภาพ โดยเกณฑ์ที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพและรวดเร็วมีดังนี้

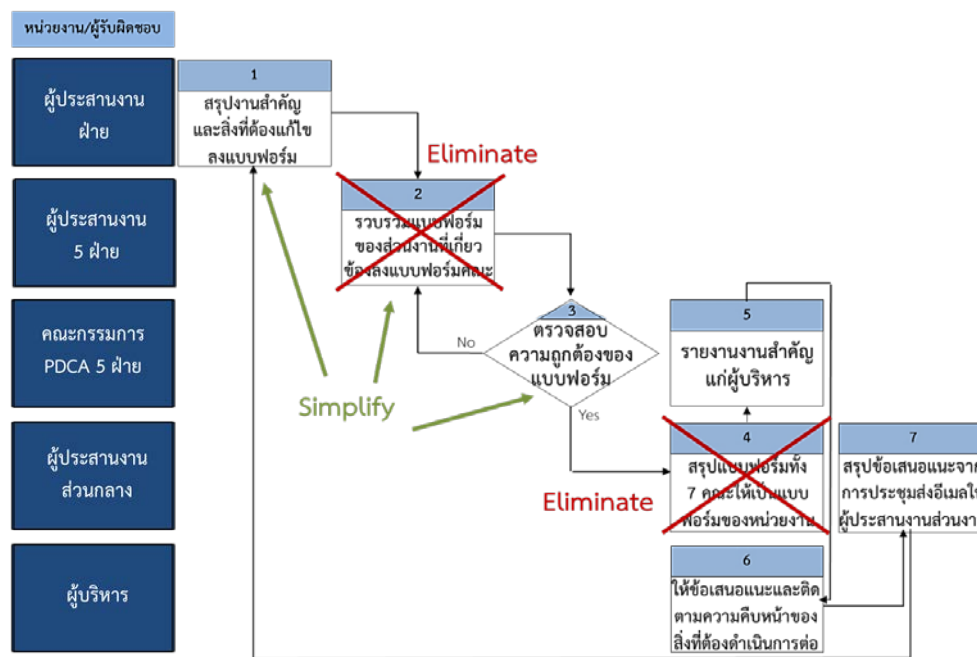
- สามารถอัพเดทข้อมูลการเปลี่ยนแปลงได้ในทันที (Real Time) โดยข้อมูลเชื่อมต่อกับผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคน

- เจ้าของงานสามารถรายงาน และติดตามการแก้ไขปัญหาได้ด้วยตนเอง

- ลดภาระงานของผู้ประสานงานที่ต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือ (Manual)



รูปที่ 2 แผนผังก้างปลา



รูปที่ 3 แนวทางการปรับปรุงผังงานกระบวนการสรุปรายงานสำคัญโดยใช้ทฤษฎี ECRS

4.2.แนวทางการแก้ปัญหา

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา จะสามารถสรุปการ
ออกแบบแนวทางการแก้ปัญหาได้ ดังตารางที่ 2

จากปัญหาหลัก สามารถสรุปการออกแบบแนวทางการ
แก้ปัญหาได้ โดยมีการนำหลักการ ECRS มาร่วมแก้ไขปัญห
บนพื้นฐานของดิน โดยกิจกรรมที่ 2 และ กิจกรรมที่ 4 จะถูก
กำจัด (Eliminate) เนื่องจากได้มีการนำเอาซอฟต์แวร์มาช่วย
แล้ว ส่วนกิจกรรมที่ 1, 3, 5, 6 และ 7 จะใช้หลักการทำให้ง่าย

ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ในการจัดเก็บข้อมูลและสื่อสาร ซึ่ง
ซอฟต์แวร์ดังกล่าวที่เป็นไปได้ ได้แก่ แนวทางที่ 1 Excel
Online แนวทางที่ 2 MS Forms และแนวทางที่ 3 MS Planner

จะเห็นได้ว่าจะมีการนำซอฟต์แวร์มาช่วยในการสื่อสาร
ในการบันทึกข้อมูล รวมทั้งการเรียกใช้ข้อมูลแบบทันที (Real
time) จากการระดมความคิดเห็นจะมีทั้งหมด 3 โปรแกรมดังนี้
Excel Online MS Forms และ MS Planner

ตารางที่ 2 แนวทางการแก้ปัญหา

ปัญหา	สาเหตุของปัญหา	แนวทางการแก้ไข
กระบวนการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญไม่มีประสิทธิภาพ	- มีภาระงานที่ผู้ประสานงานต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือซ้ำ ๆ จำนวนหลายครั้ง ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานที่เกิดความสูญเปล่า (กิจกรรมที่ 2 และ 4) - กรณีมีการแก้ไขข้อมูลในแบบฟอร์ม ผู้ประสานงานจะต้องรวบรวมแบบฟอร์มซ้ำ ๆ เนื่องจากข้อมูลไม่เชื่อมต่อกันอัตโนมัติ (กิจกรรมที่ 1 และ 2) - การรายงานงานสำคัญและการติดตามการแก้ไขในวงประชุมขาดประสิทธิภาพ เนื่องจากผู้เข้าประชุมไม่ใช่เจ้าของงานโดยตรง - ข้อเสนอแนะและข้อสรุปห้องประชุมไม่เชื่อมต่อกับอัตโนมัติไปยังแบบฟอร์มติดตามงานสำคัญของสัปดาห์ถัดไป	กิจกรรมที่ 2 และ 4 จะถูกกำจัด (Eliminate) เนื่องจากได้มีการนำเอาซอฟต์แวร์มาช่วยแล้ว กิจกรรมที่ 1, 3, 5, 6 และ 7 จะใช้หลักการทำให้ง่ายด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ในการจัดเก็บข้อมูลและสื่อสาร *หมายเหตุ ซอฟต์แวร์ดังกล่าวที่เป็นไปได้ได้แก่ แนวทางที่ 1 : Excel Online แนวทางที่ 2 : MS Forms แนวทางที่ 3 : MS Planner

4.3. การประเมินแนวทางเลือกเครื่องมือ

การนำมาแก้ปัญหา โดยนำจุดดีและจุดเสียของแต่ละ

สามารถประเมินแนวทางเลือกเครื่องมือที่เหมาะสมใน

เครื่องมือที่ทำการศึกษามาเปรียบเทียบกันได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบจุดดีและจุดเสียของเครื่องมือ

ประเภทเครื่องมือ	จุดดี	จุดเสีย
ก่อนปรับปรุง	- เป็นโปรแกรมที่ไม่ต้องลงทุนเพิ่มเติม - เป็นเครื่องมือที่พนักงานส่วนใหญ่คุ้นเคยในการใช้งาน - สามารถสร้างเอกสารที่ต้องมีการคำนวณและเชื่อมโยงสูตรได้ดี	- ข้อมูลแต่ละสัปดาห์ไม่ส่งต่อกันอัตโนมัติ - มีภาระงานที่ผู้ประสานงานต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือซ้ำ ๆ จำนวนหลายครั้ง - การรายงานงานสำคัญ และการติดตามการแก้ไขในวงประชุมขาดประสิทธิภาพ เนื่องจากผู้เข้าประชุมไม่ใช่เจ้าของงานโดยตรง - ข้อเสนอแนะและข้อสรุปจากห้องประชุมไม่เชื่อมต่อกับอัตโนมัติไปสัปดาห์ถัดไป
แนวทางที่ 1 MS Excel Online	- สามารถเปิดสิทธิให้แก้ไขข้อมูลในไฟล์ได้ร่วมกัน ณ จุดเดียว	- ไม่ค่อยแตกต่างจากการใช้ Microsoft Excel ปกติมาก - กรณีมีผู้ใช้งานหลายคน อาจจะเผลอลบหรือแก้ไขข้อมูลคนอื่นจนข้อมูลหายได้
แนวทางที่ 2 MS Forms	- ผู้กรอกข้อมูลสามารถกรอกข้อมูลเป็นข้อ ๆ ผ่านแบบฟอร์ม ทำให้ใช้งานง่าย - สามารถออกแบบช่องคำถามให้สอดคล้องกับแบบฟอร์มเดิมได้ง่าย	- กรณีข้อมูลผิดพลาดจะไม่สามารถเข้าไปแก้ไขหรือเห็นการแสดงผลข้อมูลได้ด้วยตนเอง - ต้องนำข้อมูลออกมาเป็นไฟล์ Microsoft Excel - การติดตามงานไม่เป็นแบบทันที (Real time)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบจุดดีและจุดเสียของเครื่องมือ (ต่อ)

ประเภทเครื่องมือ	จุดดี	จุดเสีย
แนวทางที่ 3 MS Planner	- เจ้าของงานสามารถ กรอกข้อมูลได้ด้วยตนเอง - แก้ไขข้อมูลได้ทันที - สามารถเพิ่มอีเมลของผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานนั้น - ทำให้ใช้งานร่วมกันได้	- เจ้าของงานจำเป็นต้องมีความรับผิดชอบในการเข้าไปอัปเดตข้อมูลด้วยตนเอง

ดังนั้น จากการวิเคราะห์จุดดีและจุดเสียของแต่ละเครื่องมือมาเปรียบเทียบกันและขอความคิดเห็นจากผู้บริหาร จึงสรุปได้ว่าควรที่จะเลือกใช้เครื่องมือ Microsoft Planner ซึ่งอยู่ในแพลตฟอร์ม Microsoft Office 365 เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงจุดดีของ Microsoft Planner แล้วมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ติดตามงานมากที่สุด และสามารถนำมาประกอบการแก้ปัญหาได้

อนึ่ง Microsoft Office 365 รวมถึง Microsoft Planner ทางองค์กรกรณีศึกษาได้จัดซื้อตามลิขสิทธิ์มาอย่างถูกต้อง

4.4.การประยุกต์ใช้ MS Planner ตามแนวทางการแก้ไข ปัญหา

หลังจากที่ตัดสินใจแก้ปัญหาดังกล่าวโดยนำ MS Planner มาใช้ในสำนักงานกรณีศึกษา โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การศึกษาความต้องการทางด้าน ใน MS Planner
2. การศึกษาความสอดคล้องกันของข้อมูลและออกแบบโครงสร้างโปรแกรม

3. การจัดทำคู่มือ สื่อสารมาตรฐานการสร้างงานสำคัญผ่าน MS Planner

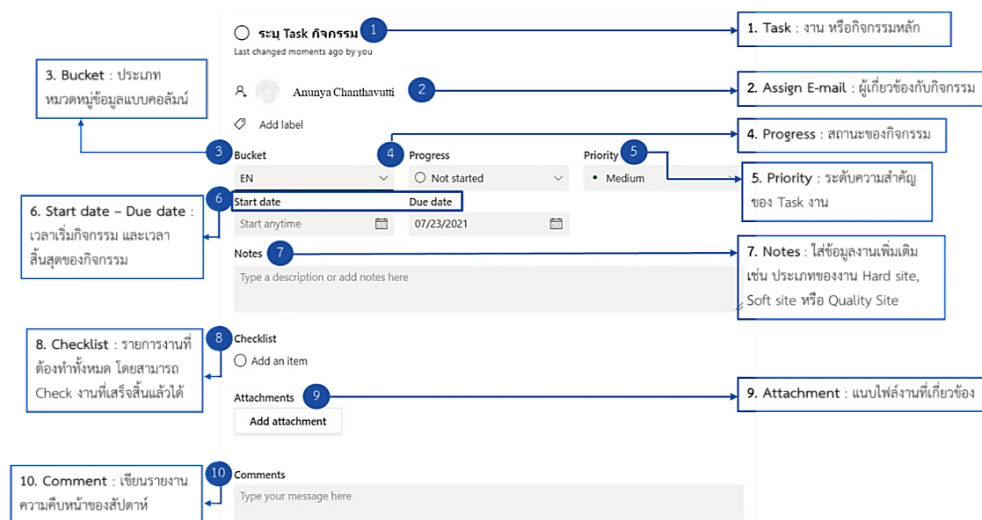
4. จัดทำคู่มือ สื่อสารมาตรฐานการรายงานความคืบหน้าของงานสำคัญ รวมถึงการแจ้งปิดเรื่องงานสำคัญ

4.5.การศึกษาความต้องการทางด้านข้อมูล (Data Requirement) ใน Microsoft Planner

โดยสามารถศึกษาความต้องการทางด้านข้อมูล (Data Requirement) ในโปรแกรม MS Planner ซึ่งจะพบว่าข้อมูลที่ต้องกรอกในโปรแกรม ได้แก่ 1. Task 2. Assign E-mail 3. Bucket 4. Progress 5. Priority 6. Start date – Due date 7. Notes 8. Checklist 9. Attachment 10. Comment

4.6.การศึกษาความสอดคล้องกันของข้อมูล

โดยการนำความต้องการทางด้านข้อมูล (Data Requirement) ในโปรแกรม MS Planner และแบบฟอร์มการกรอกข้อมูลงานสำคัญโปรแกรม MS Excel มาทำการเปรียบเทียบหาความสอดคล้อง ได้ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 4



รูปที่ 4 ความต้องการทางด้านข้อมูล (Data Requirement) ด้วย Microsoft Planner

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความสอดคล้องกันของความต้องการทางด้านข้อมูล (Data Requirement)

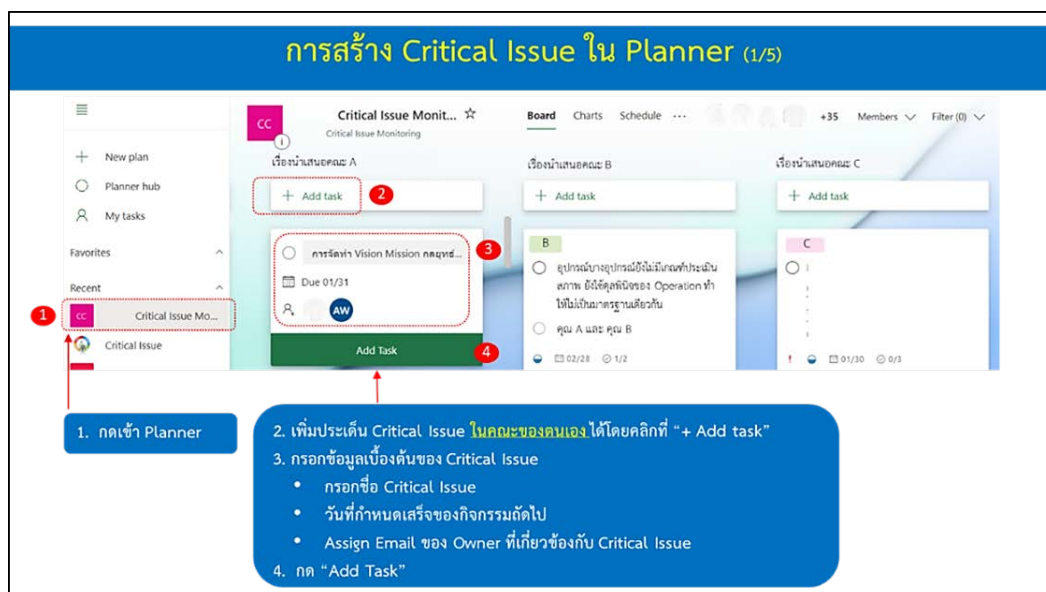
ข้อมูลที่ต้องการจากแบบฟอร์ม Microsoft Excel	ช่องข้อมูลที่ใกล้เคียง ใน Microsoft Planner	หมายเหตุ
หน่วยงานที่แจ้งเรื่องงานสำคัญ	“Bucket” แยกแต่ละหน่วยงาน	-
ชื่องานสำคัญ	“Task” ในคณะของตนเอง	-
ระดับความเร่งด่วน	“Priority” ของภาระงาน	-
ประเภทการตอบโจทย Hard Side Soft Side Quality Side	ระบุเพิ่มในช่อง “Note”	เป็นข้อมูลที่ควรมีแต่ไม่มีความจำเป็นที่ขาดไม่ได้ เป็นข้อมูลที่สามารถมีหรือไม่มีก็ได้
รายงานความคืบหน้าสัปดาห์นี้	รายงานความคืบหน้าใน “Comment”	เมื่อรายงานความคืบหน้าแล้วจะ ไม่สามารถแก้ไข ข้อมูลได้
สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ	แจกแจงรายละเอียดกิจกรรมที่ ต้องดำเนินการต่อใน “Check list”	สามารถปรับกิจกรรมย่อยขึ้นถัดไปได้ใน “Checklist”
ผู้รับผิดชอบ	“Assign E-mail” ผู้เกี่ยวข้องกับ กิจกรรม	1. มีอีเมลแจ้งเตือนอัตโนมัติ เมื่อมีการแก้ไข ข้อมูลให้กับผู้เกี่ยวข้องกับกิจกรรมรับรู้
วันที่กำหนดเสร็จ	“Due Date”	2. แจ้งเตือนอัตโนมัติเมื่อใกล้กำหนดวันเสร็จ

4.7.การจัดทำคู่มือ สื่อสารมาตรฐานการสร้างงานสำคัญ ผ่าน Microsoft Planner

จัดทำคู่มือสื่อสารมาตรฐานการสร้างงานสำคัญ ผ่านโปรแกรม Microsoft Planner เพื่อสื่อสารให้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรง โดยสามารถแสดงตัวอย่างคู่มือ (Manual) สื่อสารมาตรฐานการสร้างงานสำคัญ ผ่าน MS Planner ได้ดังรูปที่ 5

4.8.จัดทำคู่มือ สื่อสารมาตรฐานการรายงานความคืบหน้า ของงานสำคัญ รวมถึงการแจ้งปิดเรื่องงานสำคัญ

จัดทำคู่มือสื่อสารมาตรฐานการรายงานความคืบหน้าของงานสำคัญรวมถึงการแจ้งปิดเรื่องงานสำคัญ เพื่อสื่อสารให้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรง โดยสามารถแสดงตัวอย่างคู่มือ (Manual) สื่อสารมาตรฐานการรายงานความคืบหน้าของงานสำคัญ รวมถึงการแจ้งปิดเรื่องงานสำคัญ ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ตัวอย่างการเขียนคู่มือการรายงานงานสำคัญผ่าน Microsoft Planner

กรณี แจ้งปิดงานเรื่องที่สำเร็จและต้องการแชร์ในวงประชุม PDCA (1/2)

1. ลาก Critical Issue ที่ต้องการแจ้งปิดงานไป คอลัมน์/ Lane "เรื่องที่สำเร็จ และต้องการแชร์"

2. เลือก สถานะของ Critical Issue เป็น Completed/ เสร็จสมบูรณ์

3. เลือก Priority ของงานเป็น Low/ สถานะสีเขียว

4. ใส่เหตุผลใน Note เช่น แจ้งปิดงาน

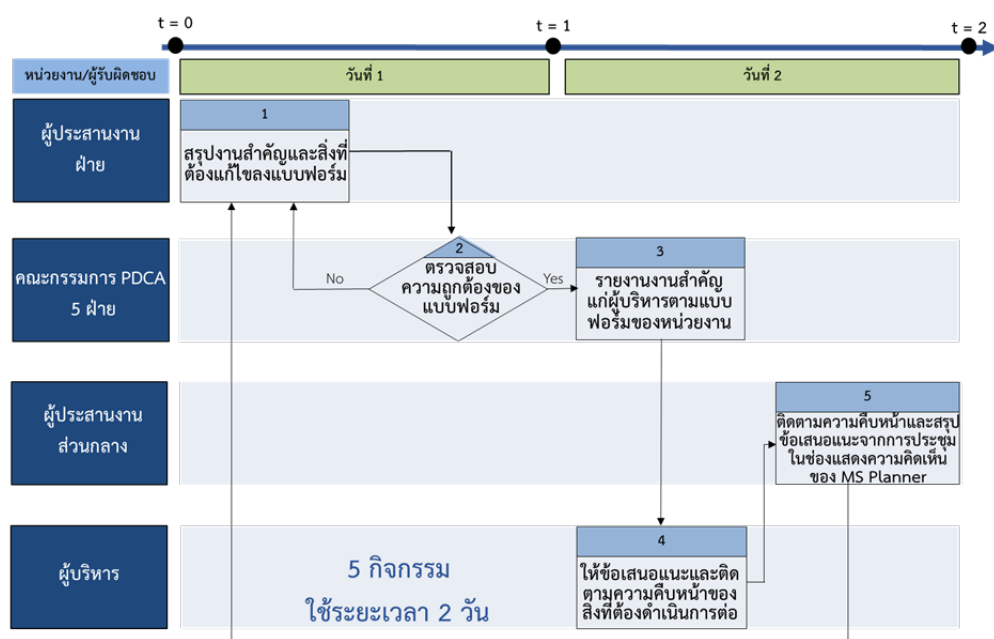
หมายเหตุ: ผู้ที่นำ Task งานมาบรรจุใน Lane "เรื่องที่สำเร็จ และต้องการแชร์" ให้เตรียม นำเสนอข้อมูลสั้นๆ เรื่องการปิดงาน ในวงประชุม PDCA

รูปที่ 6 ตัวอย่างการเขียนคู่มือการแจ้งปิดเรื่องงานสำคัญผ่าน Microsoft Planner

5. การเปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลัง

หลังจากที่มีการใช้โปรแกรม MS Planner มาช่วยดำเนินงาน เริ่มจากผู้ประสานงานส่วนงานทำการสรุปงานสำคัญ และสิ่งที่ต้องแก้ไขลงแบบฟอร์ม ให้กับคณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย จากนั้นคณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบฟอร์มของหน่วยงาน และรายงานงานสำคัญแก่ผู้บริหาร โดยผู้บริหาร

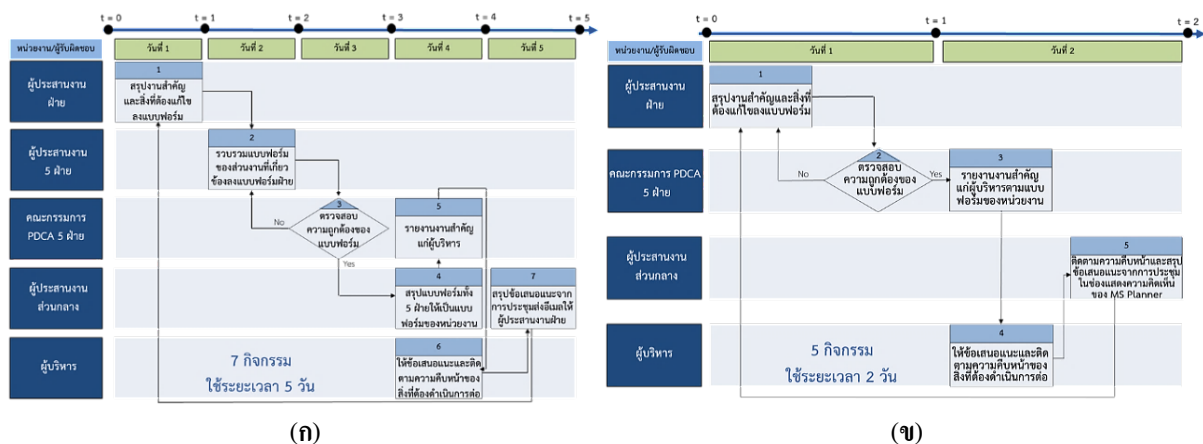
จะทำการให้ข้อเสนอแนะ และติดตามความคืบหน้าของสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ ซึ่งผู้ประสานงานส่วนกลางจะเป็นผู้สรุปข้อเสนอแนะที่ได้รับจากผู้บริหารจากการประชุมในช่องแสดงความคิดเห็นของ MS Planner โดยสามารถเขียนผังงาน (Flowchart) กระบวนการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขรายสัปดาห์หลังปรับปรุงได้ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผังงานกระบวนการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขรายสัปดาห์ (หลังปรับปรุง)

หลังจากทำการพัฒนาแนวทางและระบบในการติดตามความคืบหน้าของงานสำคัญด้วย Microsoft Planner แล้วสามารถเปรียบเทียบผังงาน (Flowchart) ของกระบวนการก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงดังรูปที่ 8 ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบตัววัดความสำเร็จของงานวิจัย ได้ดังตารางที่ 5-6 ส่วนความสามารถแสดงผลพัทธ์การดำเนินงานก่อนและหลังปรับปรุง โดยคำนึงถึงเกณฑ์ที่กำหนดได้ดังตารางที่ 7

จากตารางที่ 5-6 จะพบว่าเมื่อทำการปรับปรุงแล้วสามารถลดระยะเวลาการดำเนินงานได้จาก 5 วัน เหลือ 2 วัน ซึ่งก็ลดลงได้ถึง 60 % (ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมาย คือ ลดลงมากกว่า 50%) และจากเดิม 7 กิจกรรม เหลือ 5 กิจกรรม โดยที่การนำ Microsoft Planner มาประยุกต์ใช้ทำให้กิจกรรมที่ 1, 3, 5, 6 และ 7 (หมายเลขอ้างอิงกิจกรรมเดิม) ลดเวลาลงไปประมาณ 50% และกิจกรรมที่ 2 และ 4 จะถูกตัดทิ้ง และหลังการปรับปรุงจะไม่ต้องมีตำแหน่งผู้ประสานงาน 5 ฝ่ายแล้ว



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผังงาน(ก) ก่อนปรับปรุง (ข) หลังปรับปรุง

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบตัววัดความสำเร็จของงานวิจัย

ปัญหา	ตัวชี้วัดความสำเร็จของงานวิจัย	ค่าปัจจุบัน	ค่าเป้าหมาย	ค่าหลังการปรับปรุง
กระบวนการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญไม่มีประสิทธิภาพ	ระยะเวลาในกระบวนการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องดำเนินการแก้ไขรายสัปดาห์	5 วัน	ลดได้ 50 %	2 วัน ลดได้ 60 %

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบเวลาของกิจกรรมก่อนและหลังปรับปรุง

รายละเอียด	เวลาก่อนการปรับปรุง	เวลาหลังการปรับปรุง	หมายเหตุหลังปรับปรุง
กิจกรรมที่ 1 ผู้ประสานงานฝ่ายทำการสรุปงานสำคัญและสิ่งที่ต้องแก้ไขลงแบบฟอร์ม ใช้เวลาเฉลี่ย 1 วัน	1 วัน	0.5 วัน	--
กิจกรรมที่ 2 ผู้ประสานงาน 5 ฝ่ายจะทำการรวบรวมแบบฟอร์มของส่วนงานที่เกี่ยวข้อง	1 วัน	0 วัน	กิจกรรมนี้ถูกตัดทิ้ง
กิจกรรมที่ 3 คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย ทำการตรวจสอบความถูกต้อง	1 วัน	0.5 วัน	กิจกรรมนี้เปลี่ยนเป็นกิจกรรมที่ 2

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบเวลาของกิจกรรมก่อนและหลังปรับปรุง(ต่อ)

รายละเอียด	เวลาก่อนการปรับปรุง	เวลาหลังการปรับปรุง	หมายเหตุหลังปรับปรุง
กิจกรรมที่ 4 ผู้ประสานงานส่วนกลางสรุปแบบฟอร์มของทั้ง 5 ฝ่ายให้เป็นแบบฟอร์มของหน่วยงาน	0.5 วัน	0 วัน	กิจกรรมนี้ถูกตัดทิ้ง
กิจกรรมที่ 5 คณะกรรมการ PDCA 5 ฝ่าย รายงานงานสำคัญแก่ผู้บริหารตามแบบฟอร์มของหน่วยงาน	0.22 วัน	0.20 วัน	กิจกรรมนี้เปลี่ยนเป็นกิจกรรมที่ 3
กิจกรรมที่ 6 ผู้บริหารให้ข้อเสนอแนะและติดตามความคืบหน้าของสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ	0.50 วัน	0.40 วัน	กิจกรรมนี้เปลี่ยนเป็นกิจกรรมที่ 4
กิจกรรมที่ 7 ผู้ประสานงานส่วนกลางสรุปข้อเสนอแนะจากการประชุมส่งให้ผู้ประสานงานฝ่าย	0.78 วัน	0.4 วัน	กิจกรรมนี้เปลี่ยนเป็นกิจกรรมที่ 5
รวม	5 วัน	2 วัน	ลดได้ 60 %

หมายเหตุ กำหนดให้ 1 วันมีเวลาทำงาน 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 7 ผลลัพธ์การดำเนินงานก่อนและหลังปรับปรุงโดยคำนึงถึงเกณฑ์ที่กำหนด

เกณฑ์ที่คำนึงถึงเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
สามารถอัพเดทข้อมูลการเปลี่ยนแปลงได้ในทันที (Real Time) โดยข้อมูลเชื่อมต่อถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคน	ทำไม่ได้	ทำได้
เจ้าของงานสามารถรายงาน และติดตามการแก้ไขปัญหาได้ด้วยตนเอง	ทำไม่ได้	ทำได้
ลดภาระงานของผู้ประสานงานที่ต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือ (Manual)	ทำไม่ได้	ทำได้

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการที่ผู้วิจัยได้เข้าไปศึกษาในสำนักงานกรณีศึกษาพบว่า กระบวนการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญมีปัญหาเกิดขึ้น คือ มีการทำงานเดิมซ้ำ ๆ เนื่องจากข้อมูลไม่เชื่อมต่อกันอัตโนมัติ รวมทั้งการรายงานและการติดตามงานไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีการนำเอาแนวคิด และใช้โปรแกรม MS Planner มาแก้ไข

ผู้วิจัยได้ดำเนินงาน โดยการใช้ ECRS ตามหลักการของลิน และใช้ MS Planner มาช่วยในการสื่อสาร การบันทึกข้อมูล และการเรียกใช้ข้อมูลแบบทันที พบว่า

- ทำให้ KPI ลดได้มากกว่า 50 % จากเดิมใช้ระยะเวลา 5 วัน เหลือ 2 วัน

- สามารถอัพเดทข้อมูลได้ในทันที (Real Time) โดยข้อมูลเชื่อมต่อถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคน

- เจ้าของงานสามารถรายงาน และติดตามการแก้ไขปัญหาได้ด้วยตนเอง

- ลดภาระงานของผู้ประสานงานที่ต้องรวบรวมแบบฟอร์มด้วยมือ (Manual)

จะเห็นได้ว่าหลักการของลินรวมกับการนำเอา MS Planner มาช่วยในการติดตามผลการดำเนินงานของงานสำคัญ สามารถนำมาแก้ไขปัญหาได้อย่างดี ซึ่งสามารถขยายไปยังธุรกิจอุตสาหกรรมและภาคบริการอื่น ๆ

อนึ่ง Microsoft Planner เป็นแอปพลิเคชันสำหรับจัดการวางแผนและจัดการโครงการ จะช่วยให้ทีมงานทุกคนสามารถทำงานร่วมกันได้และสื่อสารกันได้อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ โดยผู้ใช้และทีมงานสามารถเพิ่มงานกำหนดงาน แชรฟ์ไฟล์, ติดต่อสื่อสาร ยังมีระบบสถิติและปฏิทิน ทำให้เห็นภาพรวมของแผนงาน

ข้อจำกัดของการนำเอา MS Planner มาใช้ คือ เจ้าของงานจำเป็นต้องมีความรับผิดชอบในการเข้าไปอัปเดตข้อมูลด้วยตนเอง ดังนั้นในอนาคตอาจจะสามารถเพิ่มในเรื่องการแจ้งเตือนให้เจ้าของงานรับรู้ว่าจะควรเข้าไปอัปเดตข้อมูลเมื่อใด

บทความฉบับนี้ หลักการของลีนสามารถนำมาใช้ในงานสำนักงาน (หรือกิจกรรมการบริหาร) ได้ด้วย ไม่เพียงแต่นำไปใช้ในการผลิตเท่านั้น สิ่งที่เหมือนกันของการนำหลักการลีนไปใช้ในงานทางด้านสำนักงานและการผลิต คือ จำเป็นต้องศึกษาและวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงาน นำไปสู่การบ่งชี้กิจกรรมที่เกิดคุณค่าและไม่เกิดคุณค่า สิ่งที่แตกต่างกัน คือ ในการผลิตอาจจะมีอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (Hardware) เช่น จิ๊กและฟิกซ์เจอร์ มาช่วยในการปรับปรุง แต่ในงานสำนักงาน (หรือกิจกรรมการบริหาร) จะนำซอฟต์แวร์ (Software) มาช่วยในการปรับปรุงการทำงาน ดังนั้น จึงจัดว่าหลักการของลีนมีประโยชน์มากทั้งการผลิตและงานสำนักงาน (หรือกิจกรรมการบริหาร)

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sirikasemsuk, "Work improvement ideas," *Industrial Work Study for Lean Manufacturing*, 1st ed., Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press, 2022, ch. 5, sec. 5.2, pp. 117–120.
- [2] A. Yupu, W. Samransap and S. Ditsup, "Development Format and Monitoring, Reporting (PA) Online," *Journal of Professional Routine to Research*, vol. 5, pp. 46–53, 2018.
- [3] S. Taron, "Project Progress Tracking System Case Study: Data preparation Department of Information and Communication Center, National Statistical Office," M.S. thesis, Dept. Computer and Communication Technology, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2011.
- [4] A. Thongnoppakoon, "Process Improvement for Defected Notification by Lean Technique," B.S. thesis, Dept. Information Technology and Digital Innovation, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand, 2011.
- [5] N. Vajeenuraksakulchai, "The consulting on reduction of construction project delay by ECRS framework: a case of facility management department of an autonomous public hospital," M.B.A. thesis, Dept. Commerce and Accountancy, Thammasat University, Bangkok, Thailand, 2019.
- [6] G. Intarachim, "Optimization of Research Reports Service with Lean Thinking," *PULINET Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 96–102, 2015.
- [7] Z. Mihajlovic and D. Velasevic, "Tracking Progress in Software Projects and Version Control," in *The 16th IFIP World Computer Congress, International Conference on Software*, Seattle, Washington, USA, Poster, May 16–21, 1994.
- [8] P. Jittavani, W. Khunrattanasiri and S. Kitisin, "Job Tracking and Assessment System Design and Implementation with UI/UX and Agile Methodology," in *2018 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, Chonburi, Thailand, Aug 14–16, 2018, pp. 59–62, doi: 10.1109/WIECON-ECE.2018.8783172.
- [9] N. P. Garcia-Lopez and M. Fischer, "A system to track work progress at construction jobsites," in *Proc. 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference*, Montréal, Canada, May 31–3, 2014, pp. 3403–3412.
- [10] A. S. Shweta, "Collaborative Time Tracking System for Employees," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 7, no. 11, pp. 1–9, 2018, doi: 10.17148/IJARCCCE.2018.71117.
- [11] P. Khumlamay, "Project management: implementation of information systems used in the inventory

- management systems of the sample beverage industry,” M.S. Thesis, Dept. Industrial Eng, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand, 2011.
- [12] S. Dowsuk and R. Kawtummachai, “Applying lean concept to improve productivity: a case study of bakery product management system of convenient store,” *Journal of Business Administration the Association of Private Higher Education Institutions of Thailand*, vol. 4, no. 2, pp.99–102. 2015.
- [13] W. Udomphan, and V. Khonchoho, “Incident reduction procedure by lean six sigma methodology of Basel II system,” *Suan Dusit Graduate School Academic Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 53–61, 2015.
- [14] P. Dechasirikun and P. Pisitkasem, “The improvement of agricultural product procurement and delivery process of coconut siam export company limited by lean,” *Journal of Humanities and Social Sciences, Rajapruk University*, vol. 7, no. 3, pp. 358–374, 2021.

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน ในการออกแบบระบบพื้นคอมโพสิต

Application of Teaching-learning-based optimization for design of composite floor system

สิทธศักดิ์ อันสนั่น¹, อัสนัย ทาภา² และ เรืองรุชต์ ชีระโรจน์^{1,*}

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ขามเรียง กันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

²สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น ในเมือง
เมืองขอนแก่น ขอนแก่น 40000

Sittisak Ansanan¹, Assanai Tapao² and Raungrut Cheerarot^{1,*}

¹Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kham Rieng, Kantharawichai,
Mahasarakham, 44150, Thailand

²Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen,
Nai Mueang, Muang, Khon Kaen, 40000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: raungrut.c@msu.ac.th

Received: Aug 02, 2022; Revised: Oct 18, 2022; Accepted: Oct 26, 2022

บทคัดย่อ

พื้นคอมโพสิตถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างอาคารเนื่องจากความประหยัด แต่ในการออกแบบพื้นคอมโพสิตให้มีความประหยัดนั้นค่อนข้างยากและซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน (TLBO) ในการออกแบบที่ประหยัดของระบบพื้นคอมโพสิตตามมาตรฐาน AISC วิธีคำนวณด้านทานและน้ำหนักบรรทุก (LRFD) ซึ่งขั้นตอนวิธีสำหรับออกแบบถูกพัฒนาโดยใช้ภาษา Visual basic โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือราคารวมที่ต่ำที่สุด และตรวจสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี TLBO ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยตัวอย่างการออกแบบพื้นคอมโพสิตจากงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวน 3 ตัวอย่าง จากผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO มีการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วโดยใช้จำนวนการประเมินฟังก์ชันที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีอื่นๆ และสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่างานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบกับอยู่ในช่วงร้อยละ 0.61–14.9

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน, การออกแบบระบบพื้นคอมโพสิต, การออกแบบที่เหมาะสม

Abstract

Composite floors are widely used in building structures due to their economy, but an economical design of composite floors is rather difficult and complicated. Therefore, this research presents the application of Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) to design the optimum of composite floor system according Load and Resistance Factor Design method (LRFD) by AISC standard. This design algorithm is developed using Visual basic language to determine the lowest total cost of structures. The efficiency of the TLBO for search the optimal solution is tested by three composite floor examples from the literature. The test results show that the

TLBO answer converges quickly to the optimal solution with fewer function evaluations compared to other algorithms and the TLBO found the optimal solution better than the compared research in the range of 0.61–14.9%

Keywords: Teaching-learning-based optimization, Design of composite floor system, Optimum design

1. บทนำ

ระบบพื้นคอมโพสิตคือพื้นที่ประกอบด้วยส่วนของคอนกรีตที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นพื้น และส่วนของคานเหล็ก รูปพรรณที่รองรับแผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งทั้งสองส่วนจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันสลับรับแรงเฉือนเพื่อทำให้ระบบพื้นมีพฤติกรรมเชิงประกอบ เมื่อมีโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกมากระทำ ระบบพื้นคอมโพสิตจะทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่หรือทั้งหมดของแผ่นพื้นคอนกรีตรับแรงอัด และพื้นที่ส่วนใหญ่หรือทั้งหมดของคานเหล็กรูปพรรณรับแรงดึง ดังนั้นคานเหล็กรูปพรรณจึงสามารถต้านทานโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น นอกจากนี้ระบบพื้นคอมโพสิตยังแข็งแรงและเบาว่าระบบพื้นอื่นๆมาก ซึ่งสิ่งนี้อาจทำให้โครงสร้างอื่นๆที่รองรับน้ำหนักของแผ่นพื้นรวมทั้งฐานรากมีขนาดเล็กลงด้วย และข้อได้เปรียบหลักของพื้นคอมโพสิตเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นระบบอื่นๆ คือพื้นคอมโพสิตก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็วกว่า [1] สำหรับในการออกแบบระบบพื้นประเภทนี้ผู้ออกแบบจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของตนเพื่อที่จะกำหนดค่ากำลังอัดของคอนกรีต ความหนาของแผ่นพื้น ขนาดหน้าตัดและระยะห่างของคานเหล็กรูปพรรณ และจำนวนสลับรับแรงเฉือน ที่สามารถต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัย ซึ่งขั้นตอนนี้จะดำเนินการผ่านกระบวนการลองผิดลองถูก (Trial and error) หลายครั้ง เนื่องจากตำแหน่งของแกนกลางคาน (Plastic neutral axis) อาจเกิดขึ้นภายในพื้นคอนกรีต ปีกหรือเอวของคานเหล็ก ดังนั้นจึงค่อนข้างยากในการกำหนดค่าต่างๆของตัวแปรการออกแบบ เพราะค่าของตัวแปรการออกแบบหนึ่งจะส่งผลต่อค่าตัวแปรการออกแบบอื่นๆ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่าการออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตนั้นค่อนข้างที่จะซับซ้อน [2] และผลการออกแบบที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ประหยัดที่สุด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization technique) จึงถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว โดยขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติก (Meta-heuristic algorithms) เป็น

หนึ่งในเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่มีลักษณะการค้นหาคำตอบที่เป็นแบบสุ่มที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการแก้ปัญหาค้นหาแบบที่เหมาะสมทางวิศวกรรม เนื่องจากมีแนวคิดที่ค่อนข้างเรียบง่ายและสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเทคนิคนี้จะเป็นการเลียนแบบปรากฏการณ์ทางกายภาพ พฤติกรรมแบบกลุ่มของสัตว์ หรือกฎการวิวัฒนาการในธรรมชาติ [3] สำหรับขั้นตอนวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบพื้นคอมโพสิตได้แก่ ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) [4] ที่เลียนแบบวิธีการคัดเลือกในธรรมชาติ เพื่อให้กำเนิดลูกหลานที่มีความสามารถ และให้เผ่าพันธุ์คงอยู่ต่อไป ขั้นตอนวิธีฮาร์โมนีโมเนียรีซ (Harmony search algorithm: HS) และขั้นตอนวิธีฮาร์โมนีโมเนียรีซที่ได้รับการปรับปรุง (Improved harmony search algorithm: IHS) [5] ที่เลียนแบบกระบวนการในการค้นหาความกลมกลืนของเสียงของนกดนตรี ซึ่งอัลกอริทึมเหล่านี้ให้ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่ประหยัดขึ้นตามลำดับ

ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน (Teaching-learning-based optimization: TLBO) เป็นหนึ่งในเทคนิคเมตาฮิวริสติก ที่เลียนแบบกระบวนการเรียนการสอนระหว่างครูและนักเรียนในชั้นเรียน [6] ซึ่งครูพยายามให้ความรู้แก่นักเรียนเพื่อเพิ่มระดับความรู้ของทั้งชั้นเรียนตามความสามารถของตน ครูที่เก่งกว่าจะสามารถยกระดับความรู้ของนักเรียนได้มากกว่า และนักเรียนยังมีการเรียนรู้เพิ่มเติมจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันและกันเพื่อที่จะพัฒนาความรู้ของตนเอง สำหรับในการหาค่าที่เหมาะสม ตัวแปรการตัดสินใจจะเปรียบเสมือนวิชาเรียนของนักเรียน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเปรียบเสมือนคะแนนหรือเกรดเฉลี่ยที่นักเรียนได้รับ และนักเรียนที่มีเกรดเฉลี่ยที่ดีที่สุดหรือมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็นครูและถ่ายทอดความรู้ของตนให้กับนักเรียนคนอื่นๆ โดยขั้นตอนวิธี TLBO มีข้อได้เปรียบเหนือขั้นตอนวิธีอื่นๆ คือ สามารถทำงานได้โดยใช้เฉพาะพารามิเตอร์ควบคุมทั่วไปเท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ควบคุมเฉพาะ ด้วยสิ่งนี้ทำให้

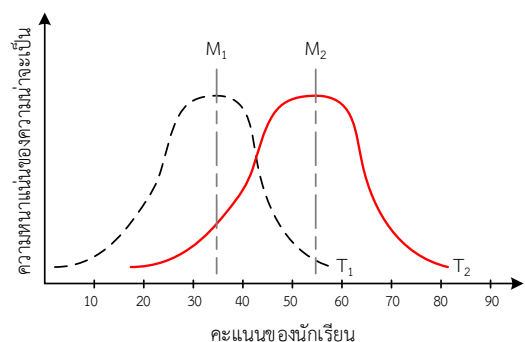
อัลกอริทึม TLBO ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาต่างๆ ตัวอย่างเช่น Toğan [7] ได้นำขั้นตอนวิธี TLBO มาใช้สำหรับการออกแบบโครงข้อแข็งเหล็กที่มีน้ำหนักรวมของโครงสร้างที่น้อยที่สุด ซึ่งพบว่าผลการออกแบบของขั้นตอนวิธี TLBO มีน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่เปรียบเทียบ Degertekin และ Hayalioglu [8] ได้ออกแบบโครงถักที่เหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธี TLBO โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาขนาดหน้าตัดของแต่ละชิ้นส่วนที่ทำให้น้ำหนักรวมของโครงถักมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO ค้นพบคำตอบที่มีน้ำหนักน้อยกว่าและมีลักษณะการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่เร็วกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ Öztürk และคณะ [9] นำขั้นตอนวิธี TLBO มาใช้สำหรับออกแบบกำแพงกันดินแบบเคาเตอร์ฟอร์ทที่มีต้นทุนการก่อสร้างที่ประหยัดที่สุด ซึ่งพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO ค้นพบคำตอบที่มีต้นทุนที่ประหยัดกว่าและมีผลลัพธ์ทางสถิติที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ และ Rout และคณะ [10] วางแผนเส้นทางออฟไลน์ (Offline trajectory) ที่เหมาะสมที่สุดของหุ่นยนต์เชื่อมโดยใช้ขั้นตอนวิธี TLBO ซึ่งพบว่าคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี TLBO ให้เวลาในการเดินทางที่น้อยกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ

ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตนั้นค่อนข้างที่จะซับซ้อนกว่าการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทอื่นๆ ซึ่งผู้ออกแบบจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของตนเพื่อที่จะกำหนดค่าของตัวแปรการออกแบบที่มีผลกระทบต่อกันและกัน อีกทั้งผลการออกแบบที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ประหยัดที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธีที่มีศักยภาพที่สูงกว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้โดยทั่วไป และจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธี TLBO มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน และยังไม่มีการนำขั้นตอนวิธี TLBO มาใช้สำหรับออกแบบระบบพื้นคอมโพสิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี TLBO สำหรับออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตเพื่อหาต้นทุนรวมในการก่อสร้างที่ประหยัดที่สุด ตามมาตรฐาน AISC วิธีคำนวณด้านทานและน้ำหนักบรรทุก (LRFD) [11]

และใช้วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก (Plastic stress distribution method) ในการวิเคราะห์กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัด จากนั้นทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการออกแบบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีนี้ โดยเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับตัวอย่างการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ตัวอย่าง [5],[12]

2. ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน

ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน (Teaching-learning-based optimization: TLBO) เป็นกระบวนการแบบกระบวนการเรียนรู้การสอนระหว่างครูและนักเรียนเรียนในชั้นเรียน ซึ่งนำเสนอโดย Rao และคณะในปี ค.ศ. 2011 [6] โดยครูพยายามให้ความรู้แก่หมู่นักเรียนเพื่อเพิ่มระดับความรู้ของทั้งชั้นเรียนและช่วยให้นักเรียนได้คะแนนหรือเกรดที่ดีขึ้น ดังนั้นครูจึงเพิ่มค่าเฉลี่ยของชั้นเรียนตามความสามารถของตน โดยครูที่มีความรู้มากกว่าจะสามารถยกระดับความรู้ของนักเรียนได้มากกว่าดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสมมติให้ครู T_2 มีความรู้มากกว่าครู T_1 ดังนั้นระดับคะแนนเฉลี่ยของนักเรียน M_2 ที่สอนโดยครู T_2 จึงสูงกว่าระดับคะแนนเฉลี่ยของนักเรียนเรียน M_1 ที่สอนโดยครู T_1 และนอกจากการเรียนรู้จากครูแล้วนักเรียนยังมีการเรียนรู้เพิ่มเติมจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันและกัน ทำให้ระดับความรู้เฉลี่ยของนักเรียนในชั้นเรียนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งตามแนวคิดนี้แบบจำลองของขั้นตอนวิธี TLBO ทางคณิตศาสตร์จะประกอบด้วย 2 ระยะ คือ ระยะการสอน (Teaching phase) และระยะการเรียนรู้ (Learning phase)



รูปที่ 1 ระดับคะแนนเฉลี่ยของนักเรียนที่สอนโดยครู T_1 และ T_2

2.1.ระยะการสอน

ในการหาค่าที่เหมาะสมจะกำหนดคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดเป็นครู และครูจะพยายามปรับปรุงคำตอบเฉลี่ยของนักเรียนไปยังคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ซึ่งคำตอบใหม่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$X_{new,i} = X_i + r(X_{teacher} - T_F X_{mean}) \quad (1)$$

โดยที่ $X_{new,i}$ และ X_i คือ คำตอบใหม่และคำตอบปัจจุบันของนักเรียน i ตามลำดับ $X_{teacher}$ คือ คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดซึ่งกำหนดให้เป็นครู X_{mean} คือ คำตอบเฉลี่ยของนักเรียนทั้งหมด r คือ ตัวเลขสุ่มระหว่าง $[0, 1]$ และ T_F คือ เฟกเตอร์การสอน (Teaching factor) ซึ่งมีค่าเป็น 1 หรือ 2 [6] หากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(X_{new,i})$ น้อยกว่า $f(X_i)$ ให้แทนที่คำตอบ X_i ด้วย $X_{new,i}$

2.2.ระยะการเรียนรู้

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นักเรียนยังสามารถปรับปรุงความรู้โดยอาศัยการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันและกัน ดังนั้น ในระยะนี้จะทำการสุ่มคำตอบ j ในหมู่นักเรียนทั้งหมดขึ้นมา และนำมาแลกเปลี่ยนข้อมูลกับคำตอบ i (คำตอบปัจจุบัน) โดยคำตอบใหม่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$X_{new,i} = X_i + r(X_i - X_j) \text{ if } f(X_i) < f(X_j) \quad (2)$$

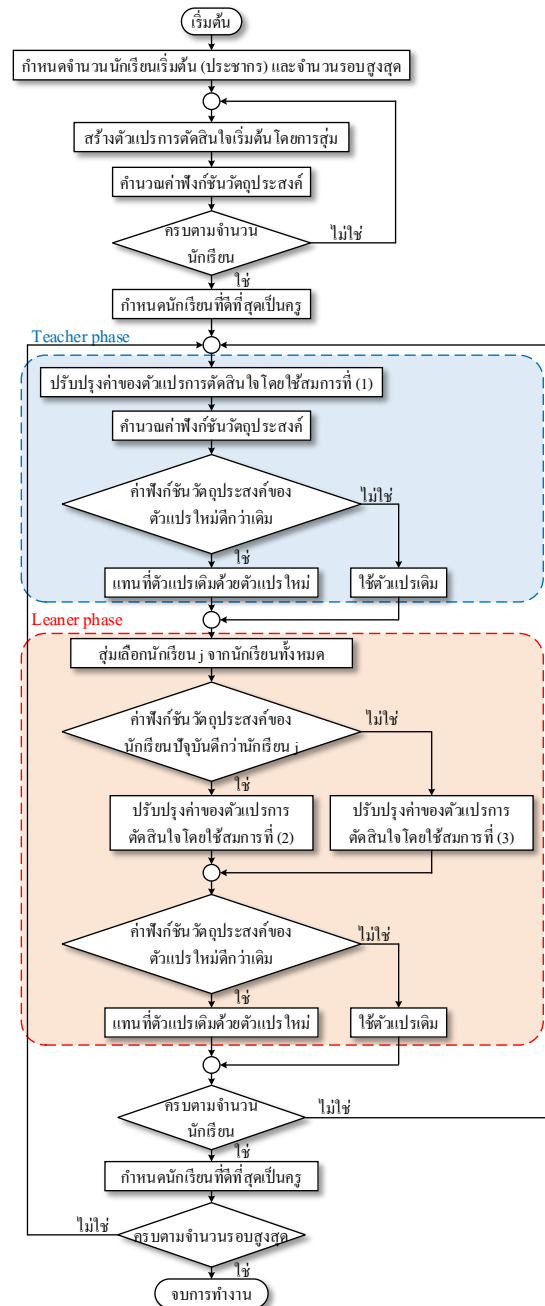
$$X_{new,i} = X_i + r(X_j - X_i) \text{ if } f(X_i) > f(X_j) \quad (3)$$

โดยที่ $X_{new,i}$ และ X_i คือ คำตอบใหม่และคำตอบปัจจุบันของนักเรียน i ตามลำดับ X_j คือ คำตอบที่เลือกจากการสุ่มในหมู่นักเรียน และ $f(X_i)$ และ $f(X_j)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบปัจจุบัน i และคำตอบที่เลือกจากการสุ่ม j ตามลำดับ ซึ่งเช่นเดียวกับระยะการสอน หากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(X_{new,i})$ น้อยกว่า $f(X_i)$ ให้แทนที่คำตอบ X_i ด้วย $X_{new,i}$

สำหรับแผนผัง (Flowchart) ของขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอนแสดงดังรูปที่ 2

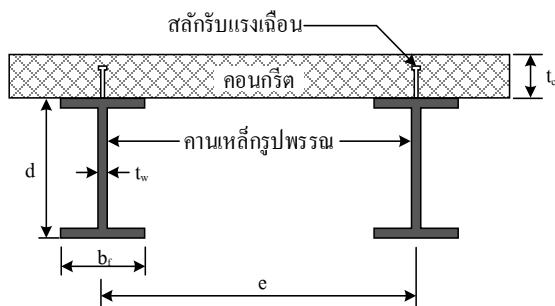
3. การออกแบบโครงสร้างพื้นคอมโพสิต

พื้นคอมโพสิตที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นพื้นคอนกรีตและส่วนที่เป็นคานเหล็กรูปพรรณ (หน้าตัดรูปตัวไอ) โดยทั้งสองส่วนนี้ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยสลักกรับแรงเฉือน (Shear studs) ที่ยึดติดกับเหล็กรูปพรรณโดยการเชื่อม เพื่อที่จะให้พื้นคอมโพสิตนี้มีพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite behaviors) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แผนผังของขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน

เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำต่อโครงสร้างพื้นคอมโพสิต จะทำให้เกิดแรงภายในขึ้นภายในโครงสร้าง และยังทำให้โครงสร้างเกิดการโก่งตัว ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในขณะที่กำลังก่อสร้างและใช้งานจึงต้องทำการออกแบบให้โครงสร้างสามารถต้านทานแรงภายในเหล่านี้และมีการโก่งตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้มาตรฐานการออกแบบที่กำหนดโดย AISC วิธี LRFD [11] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 ระบบพื้นคอมโพสิต

3.1. กำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิต

การคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิต มี 2 กรณีที่จะต้องพิจารณาคือ กรณีแรก ขณะที่กำลังก่อสร้าง คอนกรีตยังไม่แข็งตัว ทำให้โครงสร้างยังไม่มีพฤติกรรมเชิงประกอบ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเฉพาะกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของคานเหล็กรูปพรรณที่เกิดจากน้ำหนักขณะก่อสร้าง โดย AISC ได้กำหนดให้กำลังรับโมเมนต์ดัดครีของคานเป็นไปตามสมการที่ (4)

$$M_{u\text{-noncomposite}} \leq \phi M_{n\text{-noncomposite}} \quad (4)$$

โดยที่ $M_{u\text{-noncomposite}}$ และ $M_{n\text{-noncomposite}}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยและกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของคานเหล็ก เนื่องจากน้ำหนักขณะก่อสร้าง และ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9

สำหรับกรณีที่ 2 เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ทำให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเชิงประกอบ ดังนั้นในกรณีนี้จะพิจารณากำลังรับโมเมนต์ดัดครีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน

และน้ำหนักบรรทุกจร โดย AISC ได้กำหนดให้กำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิตเป็นไปตามสมการที่ (5)

$$M_{u\text{-composite}} \leq \phi M_{n\text{-composite}} \quad (5)$$

โดยที่ $M_{u\text{-composite}}$ และ $M_{n\text{-composite}}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยและกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิต เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งานและน้ำหนักบรรทุกจร ส่วน ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85

สำหรับการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดครีของงานวิจัยนี้ กำหนดให้ใช้วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก (Plastic stress distribution method) โดยจะสมมุติให้หน่วยแรงในคอนกรีตเท่ากับ $0.85f'_c$ กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รับแรงอัดประสิทธิผล และกำหนดให้หน่วยแรงในเหล็กมีค่าเท่ากับหน่วยแรงครากที่กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รับแรงดึงและแรงอัด [12]

3.2. กำลังรับแรงเฉือนของพื้นคอมโพสิต

การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนระบุของพื้นคอมโพสิต จะพิจารณาให้เฉพาะเหล็กรูปพรรณรับแรงเฉือน โดย AISC ได้กำหนดกำลังรับแรงเฉือนระบุให้เป็นไปตามสมการที่ (6)

$$V_u \leq \phi V_n \quad (6)$$

โดยที่ V_u คือ แรงเฉือนประลัย ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง และ V_n คือ กำลังรับแรงเฉือนระบุของเหล็ก มีค่าเท่ากับ $0.60F_yA_wC_v$ โดยที่ F_y คือ กำลังครากของเหล็ก A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของเอว และ C_v คือ สัมประสิทธิ์การเฉือนของเอว ซึ่งเอวของเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มี $h/t_w \leq 2.24\sqrt{E/F_y}$ ถ้า C_v และ ϕ มีค่าเท่ากับ 1.0

3.3. กำลังรับแรงเฉือนของสลักรับแรงเฉือน

โดย AISC กำหนดการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนระบุของสลักรับแรงเฉือนไว้ดังสมการที่ (7)

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_cE_c} \leq R_gR_pA_{sc}F_u \quad (7)$$

เมื่อ Q_n คือ กำลังรับแรงเฉือนระบุของสลัก A_{sc} คือ พื้นที่หน้าตัดของสลัก f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีต E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต F_u คือ แรงดึงต่ำสุดของสลัก รับแรงเฉือน และ R_g และ R_p มีค่าเท่ากับ 1.0

สำหรับระยะห่างขั้นต่ำและระยะห่างสูงสุดของสลักรับแรงเฉือนที่กำหนดโดย AISC มีดังต่อไปนี้ คือ ระยะเรียงของสลักตามแนวขามีค่าอย่างน้อย 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลัก และมีค่าไม่เกิน 8 เท่าของความหนาพื้น

3.4. การโค้งตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

การโค้งตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8)

$$\Delta = \frac{5W_{LL}L^4}{384E_sI_{tr}} \leq \frac{L}{360} \quad (8)$$

โดยที่ Δ คือค่าการโค้งตัวสูงสุด W_{LL} คือ น้ำหนักบรรทุกใช้งานต่อหน่วยความยาว L คือ ความยาวคาน E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก และ I_{tr} คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลง

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

4.1. ขอบเขตของงานวิจัย

เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5],[12] ขอบเขตของตัวแปรการออกแบบพื้นคอมโพสิตในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของพื้นคอนกรีต หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และสลักรับแรงเฉือน โดยในส่วนของพื้นคอนกรีต กำหนดให้ใช้กำลังอัดของคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 200 ถึง 400 กก./ตร.ซม. และความหนาของพื้น (t_c) เท่ากับ 80 ถึง 200 มม. สำหรับหน้าตัดคาน กำหนดให้ใช้เหล็กรูปพรรณรูปตัวไอมาตรฐานยุโรปจำนวน 29 หน้าตัด และเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองนี้ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดเหล็กเช่น พื้นที่หน้าตัด (A_s) ความลึก (d) ความหนาของเวอ (t_w) ความหนาของปีก (t_f) และอื่นๆ จะถูกรวมเป็นตัวแปรเดียวซึ่งเรียกว่าหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ โดยกำหนดให้ใช้หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ INP120 ถึง IPB300 ตามมาตรฐาน

European [13] ซึ่งมีระยะห่างระหว่างกัน (e) เท่ากับ 500 ถึง 4000 มม. และสำหรับขนาดและจำนวนของสลักรับแรงเฉือนกำหนดให้เท่ากับ 13 ถึง 22 มม. และ 10 ถึง 50 ตัวตามลำดับ

4.2. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสมที่สุดคือ ผลรวมของราคาที่น้อยที่สุด ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

$$C_t = C_c + C_s + C_{sd} \quad (9)$$

โดยที่ C_t คือ ผลรวมของราคา และ C_c , C_s , C_{sd} คือ ราคารวมของคอนกรีต ราคารวมของเหล็กรูปพรรณ และ ราคารวมของสลักรับแรงเฉือน ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (10)–(12) ดังต่อไปนี้

$$C_c = LWt_cC'_c \quad (10)$$

โดยที่ L คือความยาวของคานเหล็ก W คือความกว้างของพื้น t_c คือความหนาของพื้นคอนกรีต และ C'_c คือราคาของคอนกรีตต่อหน่วย

$$C_s = \left(\frac{W}{e} + 1\right) W_s L C'_s \quad (11)$$

โดยที่ e คือระยะห่างระหว่างคานเหล็ก W_s คือน้ำหนักต่อหน่วยความยาวของคานเหล็ก C'_s คือราคาของคานเหล็กต่อหน่วยน้ำหนัก

$$C_{sd} = N_s \left(\frac{W}{e} + 1\right) C'_{sd} \quad (12)$$

โดยที่ N_s คือจำนวนของสลักเหล็กรับแรงเฉือน C'_{sd} คือราคาวัสดุและการติดตั้งสลักเหล็กรับแรงเฉือน 1 ตัว

สำหรับราคาของวัสดุและค่าแรงในการดำเนินการอ้างอิงมาจากการวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5] เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความประหยัดจากการออกแบบได้

ตารางที่ 1 ขอบเขตของตัวแปรการออกแบบพื้นคอมโพสิต

รายการ	ตัวแปรการตัดสินใจ	รายละเอียด
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	X_1	200, 250, 300, 350, 400
ความหนาของพื้นคอนกรีต (มม.)	X_2	80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200
หน้าตัดเหล็ก รูปพรรณ	X_3	INP120, INP140, INP160, INP180, INP200, INP220, INP240, INP260, INP280, INP300, IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240, IPE270, IPE300, IPB120, IPB140, IPB160, IPB180, IPB200, IPB220, IPB240, IPB260, IPB280, IPB300
ระยะห่างระหว่างคานเหล็ก (มม.)	X_4	500, 800, 1000, 1600, 2000, 4000
ขนาดของสลักรับแรงเฉือน (มม.)	X_5	13, 16, 19, 22
จำนวนสลักรับแรงเฉือน (ตัว)	X_6	10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50

โดยราคาของคอนกรีตต่อหน่วย C'_c เท่ากับ 50 ดอลลาร์/ลบ.ม. ราคาของคานเหล็กต่อหน่วยน้ำหนัก C'_s เท่ากับ 1 ดอลลาร์/กก. และราคาวัสดุและการติดตั้งสลักเหล็กรับแรงเฉือนหนึ่งตัว C'_{sd} เท่ากับ 0.5 ดอลลาร์/ตัว

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการออกแบบของขั้นตอนวิธี TLBO กับขั้นตอนวิธีอื่นๆ จึงจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์หรือเงื่อนไขการออกแบบเช่นเดียวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แต่เมื่อมีการนำไปใช้งานจริง ผู้ใช้สามารถกำหนดเงื่อนไขการออกแบบ เช่น ขนาดหน้าตัด วัสดุที่ใช้ ราคาวัสดุและค่าแรงและอื่นๆ ได้ตามความเหมาะสมของแต่ละท้องถิ่นนั้นๆ

4.3.การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี

ในการหาค่าที่เหมาะสม ตัวแปรการออกแบบจะเปรียบเสมือนวิชาต่างๆ ที่สอนให้กับนักเรียน และฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเปรียบเสมือนผลลัพธ์ของนักเรียน โดยขั้นตอนการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนการสอนในการออกแบบโครงสร้างพื้นคอมโพสิตแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของขั้นตอนวิธี ซึ่งประกอบด้วยจำนวนนักเรียนและจำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุด

2) ทำการสุ่มตัวแปรการออกแบบเริ่มต้น ซึ่งในขั้นตอนนี้อัลกอริทึมของคอนกรีต ความหนาของพื้น หน้าตัดและระยะห่างของเหล็กรูปพรรณ และขนาดและจำนวนของสลักรับแรงเฉือน จะถูกเลือกโดยการสุ่มจากตารางที่ 1

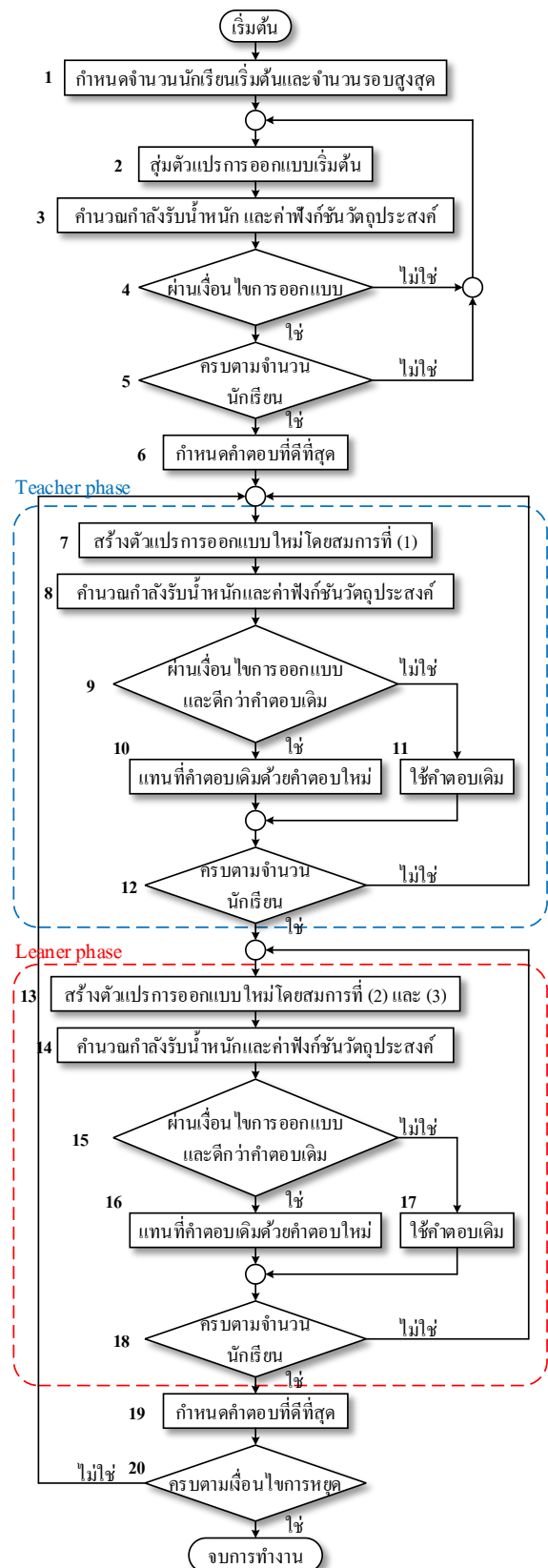
3) คำนวณกำลังรับน้ำหนัก ซึ่งประกอบด้วย กำลังในการต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นของโครงสร้างตามมาตรฐาน AISC และคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งคือราคารวมของโครงสร้าง

4) ตรวจสอบว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบหรือไม่ หากหน้าตัดสามารถต้านทาน โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นไม่เกินค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ หน้าตัดนี้จะถูกพิจารณาว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบ มิฉะนั้นหน้าตัดนี้จะถูกทิ้งและให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง

5) ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้รับนั้นครบตามจำนวนนักเรียนที่กำหนดไว้หรือไม่ หากครบให้ไปขั้นตอนที่ 6 มิฉะนั้นให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง

6) กำหนดให้คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในหมู่นักเรียนทั้งหมดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (เป็นครู)

- 7) สร้างตัวแปรการออกแบบใหม่โดยสมการที่ (1)
- 8) คำนวณกำลังรับน้ำหนักและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง
- 9) ตรวจสอบว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิมหรือไม่ หากเป็นไปตามเงื่อนไขนี้ให้ไปยังขั้นตอนที่ 10 มิฉะนั้นให้ไปยังขั้นตอนที่ 11
- 10) หากคำตอบที่ได้ผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิม (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบเดิม) จะทำการแทนที่คำตอบเดิมด้วยคำตอบใหม่
- 11) หากคำตอบที่ได้ไม่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบหรือมีค่าไม่ดีกว่าคำตอบเดิม ขั้นตอนวิธีจะคงคำตอบเดิมไว้
- 12) ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้รับนั้นครบตามจำนวนนักเรียนที่กำหนดไว้หรือไม่ หากครบให้ไปยังขั้นตอนที่ 13 มิฉะนั้นให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 7 อีกครั้ง
- 13) สร้างตัวแปรการออกแบบใหม่โดยสมการที่ (2) และ (3)
- 14) คำนวณกำลังรับน้ำหนักและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง
- 15) ตรวจสอบว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิมหรือไม่ หากเป็นไปตามเงื่อนไขนี้ให้ไปยังขั้นตอนที่ 16 มิฉะนั้นให้ไปยังขั้นตอนที่ 17
- 16) หากคำตอบที่ได้ผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิม จะทำการแทนที่คำตอบเดิมด้วยคำตอบใหม่
- 17) หากคำตอบที่ได้ไม่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบหรือมีค่าไม่ดีกว่าคำตอบเดิม ขั้นตอนวิธีจะคงคำตอบเดิมไว้
- 18) ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้รับนั้นครบตามจำนวนนักเรียนที่กำหนดไว้หรือไม่ หากครบให้ไปยังขั้นตอนที่ 19 มิฉะนั้นให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 13 อีกครั้ง
- 19) กำหนดให้คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในหมู่นักเรียนทั้งหมดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (เป็นครู)
- 20) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดของขั้นตอนวิธี กล่าวคือ หากจำนวนการวนซ้ำในรอบการวนซ้ำปัจจุบันเท่ากับจำนวนการวนซ้ำสูงสุดที่กำหนดไว้ ขั้นตอนวิธีนี้จะหยุดทำงาน มิฉะนั้นจะกลับไปยังขั้นตอนที่ 7 อีกครั้ง



รูปที่ 4 แผนผังการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี TLBO สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างพื้นคอมโพสิต

5. ตัวอย่างและผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวอย่างการออกแบบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวอย่าง [5],[12] ซึ่งประกอบด้วย พื้นคอมโพสิตขนาด 8×6 ม. ที่มีการใช้ค้ำยันชั่วคราวขณะก่อสร้าง และพื้นคอมโพสิตขนาด 8×6 ม. และขนาด 10×8.5 ม. ที่ขณะก่อสร้างปราศจากค้ำยันชั่วคราว และกำหนดให้ใช้ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกดั่งสมการที่ (13)

$$U = 1.2DL + 1.6LL \quad (13)$$

โดยที่ U คือ น้ำหนักบรรทุกที่คูณค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก DL คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ LL คือ น้ำหนักบรรทุกจร

ซึ่งแบบจำลองการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสมนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษา Visual basic บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel(R) Core(TM) i3-7100 3.90 GHz และหน่วยความจำแรม (RAM) 8.00 GB และเพื่อที่จะแสดงผลการทดสอบทางสถิติ (ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ย) จะทำการทดสอบกับตัวอย่างการออกแบบตัวอย่างละ 30 ครั้ง และกำหนดจำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุดเท่ากับ 100 รอบ และจะนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการออกแบบของ Kaveh และ Abadi [5] ที่ทำการออกแบบพื้นคอมโพสิตโดยใช้ขั้นตอนวิธีฮาร์โมนี (Harmony search algorithm: HS) และขั้นตอนวิธีฮาร์โมนีที่ได้รับการปรับปรุง (Improved harmony search algorithm: IHS) ซึ่งขั้นตอนวิธีเหล่านี้เลียนแบบกระบวนการในการค้นหาความกลมกลืนของเสียงของนักดนตรี และผลการออกแบบของ Thepchatri และ Lenwari [12]

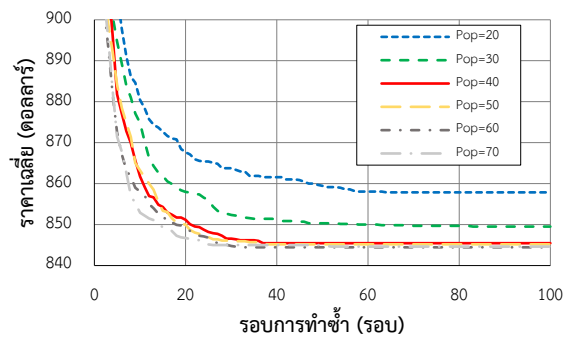
5.1.ตัวอย่างที่ 1

พื้นคอมโพสิตมีความกว้าง 8 ม. และยาว 6 ม. ที่ขณะทำการก่อสร้างมีการใช้ค้ำยันชั่วคราว ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและน้ำหนักบรรทุกจรกระทำเท่ากับ 305.91 และ 203.94 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และมีหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ (f_y) เท่ากับ 2450 กก./ตร.ซม. โดยตัวแปรการออกแบบที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 1

เพื่อทำการวิเคราะห์จำนวนนักเรียนที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี TLBO ได้ทำการทดสอบในตัวอย่างนี้โดยใช้จำนวนนักเรียน 20 30 40 50 60 และ 70 คน โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลทางสถิติสำหรับการทดสอบ 30 ครั้ง จากผลการทดสอบนี้พบว่า ในทุกจำนวนนักเรียนขั้นตอนวิธีนี้ค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดได้เท่ากัน สำหรับค่าที่แย่ที่สุด ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีแนวโน้มแปรผกผันตามจำนวนนักเรียน กล่าวคือค่าทางสถิติเหล่านี้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อจำนวนนักเรียนเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการลู่เข้าของขั้นตอนวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของการทดสอบ 30 ครั้งโดยพบว่าเมื่อจำนวนนักเรียนเพิ่มขึ้น ขั้นตอนวิธีสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีขึ้น และอัตราการลู่เข้าก็เร็วขึ้นด้วย โดยเมื่อจำนวนนักเรียนเท่ากับ 20 30 40 50 60 และ 70 คน ค่าตอบเฉลี่ยที่ค้นพบแตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดร้อยละ 1.65 0.66 0.18 0.15 0.06 และ 0.08 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะการลู่เข้านี้พบว่าการใช้จำนวนนักเรียนเท่ากับ 40 คน นั้นเพียงพอสำหรับการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสม และใช้จำนวนการวนซ้ำประมาณ 40 รอบ ในการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยเฉลี่ย ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมและเพียงพอในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดใช้จำนวนนักเรียนเท่ากับ 40 คน และจำนวนการวนซ้ำสูงสุดเท่ากับ 100 รอบ ในทุกตัวอย่างการทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบทางสถิติสำหรับจำนวนนักเรียนต่างๆ ในตัวอย่างที่ 1

จำนวนนักเรียน	ค่าที่ดีที่สุด	ค่าที่แย่ที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
20	843.96	916.80	857.87	19.59
30	843.96	879.78	849.51	8.87
40	843.96	853.96	845.46	3.39
50	843.96	855.78	845.19	3.60
60	843.96	853.96	844.46	1.00
70	843.96	853.96	844.63	2.20



รูปที่ 5 ลักษณะการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของตัวอย่างที่ 1 สำหรับการทดสอบ 30 ครั้ง

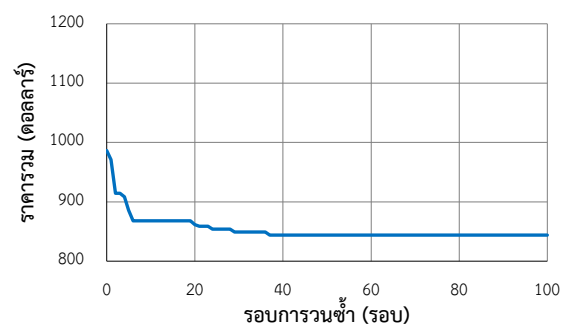
สำหรับผลการออกแบบที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 843.96 ดอลลาร์ ซึ่งน้อยกว่าขั้นตอนวิธี HS [5] และ IHS [5] ร้อยละ 4.42 และ 6.02 ตามลำดับ และขั้นตอนวิธี TLBO ให้คำตอบเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 845.46 และ 3.39 ดอลลาร์ ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้รับแตกต่างจากค่าที่ดีที่สุดเพียงเล็กน้อย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยนี้ แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของขั้นตอนวิธีในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม และนอกจากนี้ ขั้นตอนวิธี TLBO ยังมีจำนวนการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยกว่า ซึ่งเท่ากับ 8000 ครั้ง ในขณะที่ขั้นตอนวิธี HS และ IHS มีจำนวนการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากันซึ่งเท่ากับ 15000 ครั้ง สิ่งนี้เป็นเพราะในระหว่างการสอน ขั้นตอนวิธี TLBO พยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมด (นักเรียน) ให้เข้าใกล้ค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบที่ดีที่สุด (ครู) นอกจากนี้ในระหว่างการเรียนรู้ ขั้นตอนวิธี TLBO ยังพยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมดอีกครั้งโดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน ดังนั้นขั้นตอนวิธี TLBO จึงลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมกว่า และรวดเร็วเมื่อเทียบกับสองขั้นตอนวิธีนี้ สำหรับลักษณะการลู่เข้าสู่ของขั้นตอนวิธี TLBO แสดงดังรูปที่ 6 โดยขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 1

รายการ/ขั้นตอนวิธี	HS	IHS	TLBO
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	350	300	350
ความหนาพื้น (ซม.)	11	11	10
ระยะห่างเหล็ก (ซม.)	200	200	200
หน้าตัดเหล็ก	IPE180	IPE180	IPE180
ขนาดสลัก (มม.)	19	22	19
จำนวนสลัก (ตัว)	22	28	16
ราคารวม (ดอลลาร์)	882.99	897.99	843.96
ร้อยละความแตกต่างเมื่อเทียบกับ TLBO	+4.42	+6.02	0.00
ราคาเฉลี่ย (ดอลลาร์)	-	-	845.46
ค่า ส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน (ดอลลาร์)	-	-	3.39

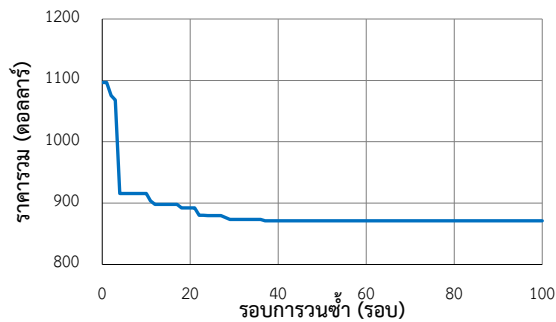
5.2.ตัวอย่างที่ 2

พื้นคอมโพสิต มีความกว้าง ความยาว น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม น้ำหนักบรรทุกจร หน่วยแรงคราก เหมือนกับตัวอย่างที่ 1 แต่ในตัวอย่างนี้ พื้นคอมโพสิตถูกสร้างโดยปราศจากค้ำยันชั่วคราว ซึ่งตัวแปรการออกแบบที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 6 ลักษณะการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1

สำหรับลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี TLBO แสดงดังรูปที่ 7 โดยขั้นตอนวิธีนี้สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 37



รูปที่ 7 ลักษณะการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 2

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 4 โดยคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้รับจากขั้นตอนวิธี HS [5] และ IHS [5] มีค่ามากกว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้รับจากขั้นตอนวิธี TLBO ที่มีค่าเท่ากับ 871.20 ดอลลาร์ ร้อยละ 2.62 และ 0.61 ตามลำดับ โดยขั้นตอนวิธี TLBO ให้คำตอบเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 916.78 และ 72.03 ดอลลาร์ ตามลำดับ และเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 ขั้นตอนวิธีนี้มีจำนวนการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 8000 ครั้ง ในขณะที่ขั้นตอนวิธี HS และ IHS มี 15000 ครั้ง และเช่นเดียวกับตัวอย่างก่อนหน้านี้ สิ่งนี้เนื่องมาจากขั้นตอนวิธี TLBO พยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมด (นักเรียน) ให้เข้าใกล้ค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบที่ดีที่สุด (ครู) ในระยะการสอน และพยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมดอีกครั้งโดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน ดังนั้นขั้นตอนวิธี TLBO จึงมีประสิทธิภาพสูงในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมและมีความรวดเร็วอย่างมากในการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธี HS และ HS

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 2

รายการ/ขั้นตอนวิธี	HS	IHS	TLBO
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	250	350	300
ความหนาพื้น (ซม.)	8	8	8
ระยะห่างเหล็ก (ซม.)	400	400	400
หน้าตัดเหล็ก	INP240	INP240	IPE270

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 2 (ต่อ)

รายการ/ขั้นตอนวิธี	HS	IHS	TLBO
ขนาดสลัก (มม.)	19	22	19
จำนวนสลัก (ตัว)	34	22	20
ราคารวม (ดอลลาร์)	894.60	876.60	871.20
ร้อยละความแตกต่างเมื่อเทียบกับ TLBO	+2.62	+0.61	0.00
ราคาเฉลี่ย (ดอลลาร์)	-	-	916.78
ค่า ส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน (ดอลลาร์)	-	-	72.03

5.3.ตัวอย่างที่ 3

พื้นคอมโพสิตมีความกว้าง 10 ม. และยาว 8.5 ม. ถูกสร้างโดยปราศจากค้ำยันชั่วคราว ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกจรขณะก่อสร้างและน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานกระทำเท่ากับ 200 และ 1000 กก./ตร.ม. ตามลำดับ โดยมีหน่วยแรงคราก (f_y) เท่ากับ 2450 กก./ตร.ซม. โดยตัวแปรการออกแบบที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 1 แต่ในตัวอย่างนี้จะใช้หน้าตัดเหล็กปีกกว้าง (Wide flange) จำนวน 283 หน้าตัด จากตารางเหล็กมาตรฐานที่กำหนดโดย AISC เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เปรียบเทียบ [12]

สำหรับผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 2795.5 ดอลลาร์ ซึ่งประหยัดกว่าผลการออกแบบของ Thepchattri และ Lenwari [12] ที่นำมาเปรียบเทียบร้อยละ 14.90 สำหรับค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขั้นตอนวิธีนี้เท่ากับ 2873.61 และ 92.29 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

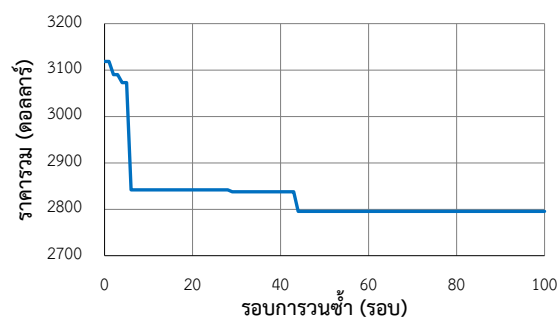
ตารางที่ 5 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 3

รายการ/ขั้นตอนวิธี	Thepchattri และ Lenwari	TLBO
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	210	300
ความหนาพื้น (ซม.)	10	12

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 3 (ต่อ)

รายการ/ขั้นตอนวิธี	Thepchatri และ Lenwari	TLBO
ระยะห่างเหล็ก (ซม.)	250	400
หน้าตัดเหล็ก	W400x66	W530x74
ขนาดสลัก (มม.)	19	19
จำนวนสลัก (ตัว)	22	48
ราคารวม (ดอลลาร์)	3285.0	2795.5
ร้อยละความแตกต่างเมื่อเทียบกับ TLBO	+14.90	0.00
ราคาเฉลี่ย (ดอลลาร์)	-	2873.61
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ดอลลาร์)	-	92.29

ลักษณะการลู่เข้าของขั้นตอนวิธี TLBO แสดงดังรูปที่ 8 โดยเห็นว่าขั้นตอนวิธี TLBO ลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วและมีลักษณะเป็นแบบขั้นบันได โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 44 ซึ่งสิ่งนี้เกิดจากข้อจำกัดด้านการออกแบบ กล่าวคือ เมื่อขั้นตอนวิธี TLBO ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบการทำซ้ำปัจจุบัน ซึ่งในรอบการทำซ้ำถัดไปขั้นตอนวิธี TLBO จะพยายามปรับปรุงคำตอบที่เหมาะสมตามกระบวนการค้นหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมกว่าคำตอบเดิม แต่หากคำตอบที่ได้ในรอบปัจจุบันเข้าใกล้คำตอบที่เหมาะสมแล้ว จึงเป็นเรื่องยากที่จะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่าในรอบถัดไป และหากค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่า คำตอบที่ได้อาจไม่ผ่านข้อจำกัดด้านการออกแบบ เช่น ด้านทานโมเมนต์ดัดได้ไม่เพียงพอ หรือมีค่าการโก่งตัวเกินกว่าค่าที่ยอมให้ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนวิธี TLBO จึงปฏิเสธคำตอบที่ค้นพบและคงคำตอบเดิมไว้ ซึ่งส่งผลให้การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีนี้มีลักษณะเป็นแบบขั้นบันไดนั่นเอง



รูปที่ 8 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของ ตัวอย่างที่ 3

6. สรุป

การออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตนั้นค่อนข้างที่จะซับซ้อนกว่าการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทอื่นๆ ซึ่งค่าของตัวแปรการออกแบบจะมีผลกระทบต่อกันและกัน จึงจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธีที่มีศักยภาพที่สูงกว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี TLBO ในการออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตที่ประหยัดที่สุดตามมาตรฐาน AISC-LRFD และเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการออกแบบที่เหมาะสมแบบจำลองนี้ถูกทดสอบและเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับตัวอย่างการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวอย่าง ซึ่งในตัวอย่างการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่มีความกว้าง 8 ม. และยาว 6 ม. ที่ขณะทำการก่อสร้างมีการใช้ค้ำยันชั่วคราวและไม่มีค้ำยันชั่วคราวดังตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของขั้นตอนวิธี TLBO กับขั้นตอนวิธี HS และ IHS ที่เสนอในวรรณกรรมพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่าใช้จำนวนการประเมินฟังก์ชันที่น้อยกว่าและมีอัตราการลู่เข้าที่รวดเร็ว สำหรับในตัวอย่างที่ 3 เป็นตัวอย่างพื้นคอมโพสิตที่มีความกว้าง 10 ม. และยาว 8.5 ม. ที่ถูกสร้างโดยไม่มีค้ำยันชั่วคราว ขั้นตอนวิธี TLBO ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากหนังสือพฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก โดยงานวิจัยนี้สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่าและมีอัตราการลู่เข้าที่รวดเร็ว ซึ่งจากผลการทดสอบเหล่านี้บ่งชี้ชัดว่า ขั้นตอนวิธี TLBO สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงสร้างพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Kaveh and M.Ahangaran, "Discrete cost optimization of composite floor system using social harmony search model," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 1, pp. 372–381, 2012, doi: 10.1016/j.asoc.2011.08.035.
- [2] A. Kaveh and M.S.Massoudi, "Cost optimization of a composite floor system using ant colony system," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 139–148, 2012, doi: 10.22099/IJSTC.2012.631.
- [3] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51–67, 2016, doi: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [4] A. B. Senouci and M. S. Al-Ansari, "Cost optimization of composite beams using genetic algorithms," *Advances in Engineering Software*, vol. 40, no. 11, pp. 1112–1118, 2009, doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.06.001.
- [5] A. Kaveh and A. S. M. Abadi, "Cost optimization of a composite floor system using an improved harmony search algorithm," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, no. 5, pp. 664–669, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.01.009.
- [6] R. V. Rao, V. J. Savsani and D. Vakharia, "Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Computer-Aided Design*, vol. 43, no. 3, pp. 303–315, 2011, doi: 10.1016/j.cad.2010.12.015.
- [7] V. Toğan, "Design of planar steel frames using teaching–learning based optimization," *Engineering Structures*, vol. 34, no. 3, pp. 225–232, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.08.035.
- [8] S. Degertekin and M. Savsani, "Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization," *Computers & Structures*, vol. 119, pp. 177–188, 2013, doi: 10.1016/j.compstruc.2012.12.011.
- [9] H. T. Öztürk, T. Dede and E. Türker, "Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm," *Structures*, vol. 25, pp. 285–296, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.03.020.
- [10] A. Rout, M. Dileep, G. B. Mohanta, B. Deepak and B. Biswal, "Optimal time-jerk trajectory planning of 6 axis welding robot using TLBO method," *Procedia computer science*, vol. 133, pp. 537–544, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.07.067.
- [11] AISC, *LRFD specification for structural steel buildings*, Chicago, IL, USA: American Institute of Steel Construction, 2005, pp. 77–89.
- [12] T. Thepchatri and A. Lenwari, "Composite members," in *Behavior and Design of Steel Structures*, Bangkok: Chulalongkorn, 2010, ch. 9, sec. 3, pp. 387–441.
- [13] Hot rolled I and H sections; dimensions, mass and static parameters, DIN 1025, the German Institute for Standardisation Registered Association, Berlin, Germany, 1995.

การวางแผนการผลิตที่มีหลายกลุ่มผลิตภัณฑ์และการจัดสรรแรงงานที่มีทักษะ
หลากหลายด้วยตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม กรณีศึกษาผู้ผลิต
ชุดสายไฟรถยนต์

**Multi-Product-Group Production Planning and Multi-Skill Labor Assignment
by Integer Linear Programming Model: A Case Study of an Automotive
Electrical Cable Manufacturer**

วุดินันท์ นุ่นแก้ว*, มารีษา กิมพอร์, และ ชฎาพร สิงห์กุม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

คลองหนึ่ง คลองหลวง ปทุมธานี 12120

Wuttinan Nunkaew*, Marrisa Kimaporn, and Chadaporn Singkum

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus)

Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

*Corresponding Author E-mail: nwuttinan@engr.tu.ac.th

Received: Jun 30, 2022; **Revised:** Nov 02, 2022; **Accepted:** Nov 03, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดสรรแรงงานของโรงงานผลิตชุดสายไฟรถยนต์กรณีศึกษาในประเทศไทย ในการทำงานแบบเดิมของสายการผลิตกรณีศึกษานั้น หัวหน้างานจะอาศัยเพียงประสบการณ์ในการกำหนดแผนการผลิตและแผนการจัดสรรแรงงาน จึงยังไม่สามารถรันคดีได้ว่าแผนดังกล่าวเป็นแผนที่มีประสิทธิภาพที่สุดหรือไม่ นอกจากนี้การผลิตแบบล่วงเวลามักจะต้องเกิดขึ้นอยู่เสมอเพื่อให้สามารถผลิตสินค้าได้ทันกับกำหนดการจัดส่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้น 2 ตัวแบบสำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดสรรแรงงานของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งมีการพิจารณาการกำหนดการผลิตแบบล่วงเวลาตามนโยบายของบริษัท รวมถึงการพิจารณาทักษะที่หลากหลายของพนักงาน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการวางแผนการผลิตที่ไม่มีการกำหนดและมีการกำหนดการผลิตแบบล่วงเวลาจากตัวแบบการวางแผนการผลิตที่นำเสนอ (ตัวแบบ M1) นั้นสามารถลดต้นทุนค่าแรงงานได้มากถึงร้อยละ 13.17 และ 13.14 ของต้นทุนค่าแรงแบบเดิมตามลำดับ และแผนการจัดสรรแรงงานที่ได้จากตัวแบบการจัดสรรแรงงานที่นำเสนอ (ตัวแบบ M2) นั้นดีกว่าแผนแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษาถึงร้อยละ 14.51 และ 14.74 ของค่าทักษะเฉลี่ยแบบเดิมตามลำดับ

คำสำคัญ: การวางแผนการผลิต, การจัดสรรแรงงาน, โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม, การผลิตชุดสายไฟรถยนต์

Abstract

This paper presents a solution to the production planning and labor assignment problems in an automotive electrical cable factory in Thailand. Based on the conventional manner of the case study production line, the production supervisors

made production and workforce plans by their experience. So, efficient plans cannot be guaranteed. Moreover, overtime production was always needed to catch up with the delivery due date. This situation affected the increase in total production cost. Therefore, this research developed two integer linear programming models for solving the case study's production planning and labor assignment problems. The considerations of overtime production based on the company's policy and the worker's multi-skill were included in the proposed models. The results show that, without consideration and with consideration of overtime production, the total labor cost can be reduced using the presented production planning model (model *M1*) which beat the conventional plan by 13.17 and 13.14 percent of the recent total labor cost, respectively. Moreover, workforce plans obtained from the proposed workforce planning model (model *M2*) are better than the conventional plan by 14.51 and 14.74 percent of the current average worker skill.

Keywords: production planning, labor assignment, integer linear programming, automotive electrical cable production

1. บทนำ

แม้ว่าในช่วงเวลา 2 ปีที่ผ่านมาจะเกิดการชะลอตัวของเศรษฐกิจและการผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลก จนส่งผลกระทบต่อยอดขายคำสั่งซื้อรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine, ICE) ของผู้ผลิตรถยนต์ทั้งจากฝั่งเอเชีย ยุโรป และอเมริกา แต่การพัฒนาเครื่องยนต์ในรูปแบบที่ประหยัดพลังงานและใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาถูกลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle, EV) นั้น ก็ยังคงเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

จากบทความของ KKP Research ในปี 2022 [1] แสดงข้อมูลที่ทำให้เห็นถึงการเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องของตลาดรถยนต์ EV โดยจากการประเมินคาดว่าตลาดรถยนต์ EV ในไทยจะเติบโตเพิ่มขึ้นจาก 0.4% ของยอดขายรถใหม่ในปี 2021 เป็น 4.5% ในปี 2025 ในขณะที่ยอดขายรถยนต์ EV ในตลาดโลกจะขยับจาก 6.3% ของยอดขายรถใหม่ในปี 2021 เป็น 16.9% ในปี 2025 เช่นกัน ซึ่งในการผลิตรถยนต์ EV นั้นจะมีชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการผลิตรถยนต์ ICE แบบเดิม ดังนั้นผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในไทยจึงจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนรูปแบบการผลิตของผู้ผลิตรถยนต์ได้

นอกจากเทคนิคในการผลิตแล้ว การวางแผนการผลิต (Production planning) ก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญก่อนเริ่มกระบวนการผลิตจริง โดยผู้จัดการฝ่ายผลิตนั้นจะทำการกำหนดแผนการผลิต รวมถึงจัดสรรปัจจัยการผลิต

ไม่ว่าจะเป็นการจัดสรรแรงงาน (Man) การเตรียมเครื่องจักร (Machine) การจัดหาวัตถุดิบ (Material) ตลอดจนการกำหนดวิธีการทำงาน (Method) ให้เหมาะสม [2] เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า [3-6] หากการวางแผนการผลิตไม่มีประสิทธิภาพ อาจส่งผลให้เกิดต้นทุน ความสูญเปล่า หรือแม้กระทั่งกระทบต่อความไว้วางใจของลูกค้าได้

อย่างไรก็ตามผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์รายใหญ่มักจะนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการวางแผนและจัดสรรทรัพยากรการผลิตที่สอดคล้องกับแนวคิดอุตสาหกรรม 4.0 (Industry 4.0) แต่สำหรับผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ขนาดกลางไปจนถึงผู้ผลิตรายย่อยนั้น ยังคงใช้วิธีการทำงานแบบดั้งเดิมซึ่งมีความยืดหยุ่นน้อยและอาจเกิดปัญหาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงยอดขายคำสั่งซื้ออย่างกะทันหัน

บริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตชุดสายไฟรถยนต์ (Automotive Electrical Cable, AEC) ซึ่งเป็นผู้ส่งมอบลำดับที่ 1 (1st tier supplier) ของบริษัทผู้ประกอบรถยนต์หลายแห่งในประเทศไทย โดยหลังจากได้รับการยืนยันคำสั่งซื้อจากลูกค้า หัวหน้างานฝ่ายผลิตจะกำหนดแผนการผลิตตามปริมาณคำสั่งซื้อของลูกค้าหรือกลยุทธ์ Chase demand [5] โดยพิจารณาจากกำหนดส่งมอบผลิตภัณฑ์ (Due date) และทำการจัดสรรแรงงานของแต่ละสายการผลิต อย่างไรก็ตามปัญหาหลักที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกับบริษัทกรณีศึกษา คือ การผลิตผลิตภัณฑ์ไม่ทันตามกำหนดส่งมอบ ซึ่งบริษัทจะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการเพิ่มการผลิตแบบล่วงเวลา (Over time) เพื่อให้ทัน

กำหนดการส่งมอบชุดสายไฟให้กับลูกค้าซึ่งเป็นบริษัทผู้ประกอบรถยนต์ที่มีกำหนดการผลิตที่เคร่งครัด แม้ว่าการเพิ่มการผลิตแบบล่วงหน้านั้นจะช่วยให้บริษัทสามารถส่งสินค้าให้กับลูกค้าได้ทันตามกำหนดส่งมอบ แต่ปัญหาที่ตามมาคือ การมีต้นทุนในการผลิตที่เพิ่มขึ้นและการจัดสรรทรัพยากรการผลิตที่ย่างยากมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดสรรแรงงานซึ่งเป็นทรัพยากรหลักของสายการผลิตกรณีศึกษา โดยสาเหตุของปัญหาดังกล่าวนั้นเกิดจากการที่บริษัทยังไม่มีการใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณ แต่จะอาศัยประสบการณ์ของหัวหน้างานในการวางแผนการผลิต และยังไม่มีการพิจารณาทักษะของพนักงานที่สอดคล้องกับกระบวนการผลิตในแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์ เพื่อจัดสรรแรงงานให้เหมาะสมกับงาน

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการใช้เทคโนโลยีอย่างง่ายและไม่ยุ่งยากด้วยเครื่องมือ Excel Solver ในโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์พื้นฐานมาช่วยในการหาคำตอบของการวางแผนการผลิตและการจัดสรรพนักงานฝ่ายผลิตตามทักษะ เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และง่ายต่อการใช้งานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของคำสั่งซื้ออย่างกะทันหัน

2. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยหลายฉบับนำเสนอการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตไว้หลากหลายวิธี โดยวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP) [7–18] ซึ่งเป็นการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีการพิจารณาวัตถุประสงค์ไว้หลายรูปแบบ เช่น การลดต้นทุนรวมให้ต่ำที่สุด การเพิ่มกำไรให้สูงที่สุด เป็นต้น งานวิจัยของ T. Subrata และคณะ (2015) [14] รวมถึง T.G. Dariush และคณะ (2016) [15] ได้นำเสนอตัวแบบ LP สำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธี Fuzzy Linear Programming (FLP) [19–21] เป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการวางแผนการผลิต

ที่มีการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective problem) โดยวิธีนี้เหมาะกับการพิจารณาข้อมูลที่มีความคลุมเครือ ซึ่งมีความยืดหยุ่นมากกว่าโปรแกรมเชิงเส้นแบบดั้งเดิม นอกจากนี้วิธี Mix-Integer Linear Programming (MILP) [22–24] และวิธี Genetic Algorithm (GA) [18–19] ก็มักจะถูกนำมาใช้แก้ปัญหาวางแผนการผลิตเช่นกัน

ในส่วนของการแก้ปัญหาการจัดสรรแรงงานนั้น H. Liping และ S. Rong (2022) [25] และ K. Yiyo และ L. Chia-Chun (2017) [26] ได้นำเสนอเทคนิคการแก้ปัญหาที่เป็นที่นิยมคือ MILP หรือตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม สำหรับการหาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective problem) ซึ่งมีการพิจารณาปัญหาเป็น 2 รูปแบบคือ การหาค่าสูงสุด/ต่ำสุดเหมือนกับ LP และมีการกำหนดวัตถุประสงค์ไว้หลายรูปแบบ เช่น การลดเวลาเสร็จสิ้น (Makespan) การลดจำนวนพนักงาน การหาค่ารวมของทักษะที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสรรแรงงานอีกหลากหลายกรณี เช่น การแก้ปัญหาการวางแผนกำลังคนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยให้สอดคล้องกับงบประมาณ [27] การจัดสรรแรงงานเพื่อใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพิ่มต้นทุนและผลกำไร [28] การแก้ปัญหาการจัดสรรเจ้าหน้าที่ในห้องสมุดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีควีนส์แลนด์โดยพิจารณาทักษะที่ต้องการในงานแต่ละงาน [29] รวมถึงการจัดสรรแรงงานเพื่อพัฒนาทักษะและความชำนาญ [30] เป็นต้น

จากการศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดสรรแรงงานจากงานวิจัยหลายฉบับ พบว่าโปรแกรมเชิงเส้นเป็นวิธีการที่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตและปัญหาการจัดสรรแรงงาน นอกจากนั้นการพิจารณาทักษะของพนักงานก็เป็นสิ่งที่สำคัญเช่นกัน โดยสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อ	ปัญหา	วิธีการ	วัตถุประสงค์													ตัวชี้วัด						คำสำคัญ			
	A B	C D E F G	H I J K L M N O	P Q R S T U V																					
M. Talal Alkhamis และ Y. Jav (1995) [11]	×	×												×											Refinery maintenance scheduling, Optimization in refining
J. Tehem, M. Pirlot, และ C. Antoniadis	×	×					×								×										Simulated annealing, Combinatorial optimization, Heuristic
R. Ross Farrell และ C. Thomas Maness	×	×					×								×										Flexibility, Production planning, Secondary wood product
S. Judy และ H. Gillian (2009) [29]		×				×								×					×	×					OUT Library workforce planning model
P. David และคณะ (2010) [19]	×		×										×			×									Supply chain management and planning, Uncertainty modeling
L. Nophadon (2013) [30]		×				×							×							×					Rationalism, Division of labor, Division of work,
R.K. Chakraborty และ Md. A. Akhtar Hasin	×					×		×							×										Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Aggregate
T. Subrata และคณะ (2015) [14]	×		×					×							×										Aggregate Planning, Linear programming, TORA
T.G. Dariush และคณะ (2016) [15]	×		×					×							×										Aggregate production planning, Overtime account, Flexible
M. Claudio และ P.M. Josep (2016) [32]		×				×								×					×						Working hours, Participation, Job heterogeneity, Wage
B. Serdar และคณะ (2017) [22]		×				×								×						×					Product development, Value stream mapping, Design structure
K. Yiyo และ L. Chia-Chun (2017) [26]		×				×								×								×			Cellular manufacturing, Manpower transfer, Operator
M. Garaix, และคณะ (2018) [33]	×					×								×					×						Workforce Scheduling, Routing, Integrated problem
L.J. Zeballos และคณะ (2019) [34]	×					×				×						×									Remanufacturing, Product design, Life-cycle, Linear
J. Julliy และ B.O Mavassa (2020) [23]	×					×								×											Project scheduling, Time cost quality trade-off problem
A. Ashkan และ คณะ (2020) [35]		×				×								×				×		×					Balancing and sequencing, Rotation scheduling, Variable
Z. Ningru และคณะ (2020) [36]		×				×				×				×				×							Aggregate hours worked, Aggregate labor supply and demand
K. Toshiya, และคณะ (2021) [37]	×					×		×	×		×			×											Production planning, Human aspect, Optimization
F.P. Andres, และคณะ (2022) [17]	×		×					×							×										Staffing problem, Labor flexibility, Annualized hours,
A. El-Awady และคณะ (2022) [38]	×					×		×							×										Aggregate production planning, Learning curves,
T. Alejandra, และคณะ (2022) [24]	×					×		×							×										Distribution network expansion planning, Multistage
H. Liping and S. Rong (2022) [25]		×				×								×								×			Flexible job-shop scheduling, Task planning, Makespan
งานวิจัยที่น่าสนใจ	×	×	×					×						×		×				×					Production planning, Labor assignment, Automotive electrical

กำหนดให้ A = ปัญหาการวางแผนการผลิต B = ปัญหาการจัดสรรแรงงาน, C = Linear Programming (LP), D = Fuzzy Linear Programming (FLP), E = Mixed-Integer Linear Programming (MILP), F = Genetic Algorithm (GA), G = วิธีการอื่นๆ (Non-Linear Programming (NLP), Log-Linear model, General principles of management, Lean product development tools, Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE), QUT Library workforce planning model), H = ลดต้นทุน, I = เพิ่มรายรับ/เพิ่มกำไร, J = หลายวัตถุประสงค์, K = ลดช่วงกว้างของเวลาการผลิต (Makespan), L = การใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมที่สุด, M = การจัดสรรเครื่องจักรให้เหมาะสมที่สุด, N = การจัดสรรแรงงานที่มีทักษะเหมาะสมกับงานที่สุด, O = วัตถุประสงค์อื่น ๆ, P = ต้นทุนรวม, Q = รายรับ/กำไร, R = เวลา, S = อรรถประโยชน์ (Utilization), T = ค่าทักษะการทำงาน, U = จำนวนพนักงาน (Number of operators), V = ตัวชี้วัดอื่นๆ

3. กรณีศึกษาผู้ผลิตชุดสายไฟรถยนต์

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนการผลิตและการจัดสรรแรงงานของทางบริษัทกรณีศึกษาเป็นเวลา 1 ไตรมาส ระหว่างเดือนตุลาคมถึงธันวาคม พ.ศ 2564 โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.กลุ่มผลิตภัณฑ์และปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์

จากการรวบรวมและศึกษาผลิตภัณฑ์ชุดสายไฟ 3 กลุ่มซึ่งประกอบด้วย กลุ่ม A มี 14 โมเดล กลุ่ม B มี 10 โมเดล และกลุ่ม C มี 9 โมเดล โดยปริมาณการผลิตจะเป็นไปตามยอดคำสั่งซื้อของลูกค้า (Make to order) จากการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณคำสั่งซื้อชุดสายไฟเป็นเวลา 1 ไตรมาส (m คือ เดือน) แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณคำสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ (หน่วย)

โมเดล	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	รวม	โมเดล	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	รวม	โมเดล	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	รวม
A01	-	-	-	0	B01	800	1,672	840	3,312	C01	572	300	180	1,052
A02	96	216	-	312	B02	100	100	28	228	C02	-	-	-	0
A03	96	96	-	192	B03	164	204	260	628	C03	7,032	6,096	6,980	20,108
A04	1,248	3,000	-	4,248	B04	1,092	1,392	1,508	3,992	C04	1,756	1,956	1,400	5,112
A05	232	392	428	1,052	B05	892	900	936	2,728	C05	14,208	26,484	24,052	64,744
A06	248	412	432	1,092	B06	880	900	944	2,724	C06	-	-	-	0
A07	232	396	428	1,056	B07	1,064	1,380	1,492	3,936	C07	804	644	612	2,060
A08	224	396	424	1,044	B08	872	920	924	2,716	C08	1,968	2,332	2,344	6,644
A09	1,964	3,148	3,536	8,648	B09	1,056	1,388	1,480	3,924	C09	-	-	-	0
A10	1,016	1,072	1,200	3,288	B10	47,812	57,724	63,892	169,428					
A11	1,012	1,072	1,192	3,276										
A12	1,000	1,080	1,204	3,284										
A13	7,012	7,412	8,408	22,832										
A14	272	384	460	1,116										
รวม	14,640	19,060	17,692	51,440	รวม	54,720	66,568	72,288	193,616	รวม	26,340	37,812	35,568	99,720

ตารางที่ 3 อัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์กลุ่ม 1 (หน่วย/ชม.)

โมเดล	อัตราการผลิต	โมเดล	อัตราการผลิต	โมเดล	อัตราการผลิต
A01	2	A06	2	A11	3.5
A02	1	A07	2	A12	3.5
A03	1	A08	2	A13	21
A04	14	A09	13	A14	1
A05	2	A10	3.5		

3.2.อัตราการผลิต

เนื่องจากผลิตภัณฑ์แต่ละ โมเดลมีขั้นตอนการประกอบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนชิ้นส่วนที่ใช้ในการประกอบ การผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนชิ้นส่วนมากนั้นจะมีขั้นตอนในการประกอบที่มากตามไปด้วย จึงต้องใช้เวลาในการผลิตมากขึ้น จึงส่งผลให้มีอัตราการผลิต (หน่วยต่อชั่วโมง) ต่ำ ดังนั้นอัตราการผลิตเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนชิ้นส่วนที่ใช้ประกอบ จากการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถคำนวณอัตราการผลิตโดยเฉลี่ยของแต่ละ โมเดลได้ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 4 อัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์กลุ่ม 2 (หน่วย/ชม.)

โมเดล	อัตราการผลิต	โมเดล	อัตราการผลิต	โมเดล	อัตราการผลิต
B01	2	B05	5	B09	8
B02	1	B06	6	B10	2
B03	1	B07	8		
B04	8	B08	5		

ตารางที่ 5 อัตราการผลิตของผลิตภัณฑ์กลุ่ม 3 (หน่วย/ชม.)

โมเดล อัตราการ		โมเดลอัตราการผลิต		โมเดล อัตราการ	
ผลิต				ผลิต	
C01	2	C04	6	C07	2
C02	22	C05	16	C08	2
C03	2	C06	2	C09	2

3.3. ช่วงเวลาในการผลิตและค่าแรงของพนักงาน

ช่วงการทำงานปกติ (Regular Production: R) นั้นแบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ 08.00–12.00 น. และ 13.00–17.00 น. ทั้งวันธรรมดาและวันหยุด ส่วนช่วงเวลาในการทำงานล่วงเวลา (Over Time: OT) จะเริ่มตั้งแต่ 18.00–20.00 น. ทั้งวันธรรมดาและวันหยุดเช่นเดียวกัน ซึ่งหากบริษัทผลิตสินค้าไม่ทันตามยอดคำสั่งซื้อของลูกค้า จะจัดสรรให้มีการทำงานในวันหยุด นอกจากนั้นการทำงานล่วงเวลาจะทำได้เฉพาะวันที่มีการทำงานในช่วงเวลาปกติเต็มเวลาแล้วเท่านั้น ซึ่งจำนวนชั่วโมงล่วงเวลาของแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์นั้นจะมีจำนวนชั่วโมงไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับนโยบายของบริษัทที่ได้ทำการกำหนดไว้ โดยจำนวนชั่วโมงในการทำงานและค่าแรงของพนักงานในแต่ละช่วงเวลา รวมถึงจำนวนชั่วโมงล่วงเวลาตามนโยบาย (Over Time Policy: OTP) ของทางบริษัทที่กำหนดไว้ แสดงได้ดังตารางที่ 6–7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 เวลาทำงานและค่าแรงในการผลิตของพนักงาน

ช่วงเวลาในการผลิต	เวลา (ชม./วัน)	ค่าแรง (บาท/ชม.)
R_d : ปกติ-วันธรรมดา	8	40
OT_d : ล่วงเวลา-วันธรรมดา	2	60
R_h : ปกติ-วันหยุด	8	80
OT_h : ล่วงเวลา-วันหยุด	2	100

ตารางที่ 7 ชั่วโมงล่วงเวลาตามนโยบาย (ชม.-แรงงาน/วัน)

เดือน (m)	กลุ่ม	OTP_d	OTP_h
$m = 1$	A, B, C	0	$0 \leq OTP_h \leq 48$
$m = 2$	A	$6 \leq OTP_d \leq 64$	$0 \leq OTP_h \leq 48$
	B	$108 \leq OTP_d \leq 144$	
$m = 2$	C	$20 \leq OTP_d \leq 36$	

ตารางที่ 7 ชั่วโมงล่วงเวลาตามนโยบาย (ชม.-แรงงาน/วัน) (ต่อ)

เดือน (m)	กลุ่ม	OTP_d	OTP_h
$m = 3$	A	$0 \leq OTP_d \leq 48$	
	B	$180 \leq OTP_d \leq 240$	$0 \leq OTP_h \leq 48$
	C	$20 \leq OTP_d \leq 72$	

3.4. ทักษะของพนักงาน

พนักงานแต่ละคนในบริษัทกรณีศึกษานั้นถูกจัดสรรให้ผลิตเปลี่ยนกันทำงานในแต่ละสายการผลิต โดยในแต่ละสายการผลิตจะมีวิธีการประกอบสินค้ากำกับไว้ ซึ่งจำนวนพนักงานของแต่ละสายการผลิตจะขึ้นอยู่กับการจัดสรรจากประสบการณ์ของหัวหน้างานและปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละโมเดล โดยจำนวนพนักงานของกลุ่มผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาทั้ง 3 กลุ่มมีทั้งสิ้น 220 คนต่อเดือน

ในการจัดสรรพนักงานจะดำเนินการ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 จะจัดสรรพนักงานให้กลุ่มผลิตภัณฑ์แต่ละกลุ่มตามจำนวน โดยเมื่อพิจารณาที่ปริมาณการผลิต อัตราการผลิต และปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งจำนวนพนักงานได้ดังนี้ กลุ่มที่ 1 และ 3 มีพนักงานกลุ่มละ 20 คน และกลุ่มที่ 2 มีพนักงาน 180 คน และขั้นตอนที่ 2 จะจัดสรรพนักงานแต่ละคนให้กับผลิตภัณฑ์แต่ละผลิตภัณฑ์ (รายละเอียดจะแสดงในหัวข้อถัดไป) ด้วยการประเมินทักษะของพนักงานแต่ละคนโดยหัวหน้างานและเทียบเป็นระดับคะแนน 0 ถึง 1 ตามรายละเอียดในตารางที่ 8 โดยทำการประเมินทักษะการทำงานในแต่ละผลิตภัณฑ์ ความถนัดในการทำงานและเวลาที่ใช้ในการทำงานเปรียบเทียบกับเวลามาตรฐาน (Standard time) ซึ่งพนักงานส่วนใหญ่มีทักษะการทำงานที่หลากหลาย (Multi-Skill) แต่พนักงานบางคนก็มีความถนัดและมีทักษะในการทำงานเฉพาะบางงานเท่านั้น โดยตัวอย่างการประเมินทักษะของพนักงานในการผลิตกลุ่ม A ทั้ง 20 คน สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ 14 โมเดล สามารถแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ระดับทักษะสำหรับการประเมินระดับคะแนน

ระดับทักษะที่ประเมิน	ระดับคะแนน
ไม่มีทักษะ	0.0
มีทักษะ 1 ใน 3 ของมาตรฐาน	0.1

ตารางที่ 8 ระดับทักษะสำหรับการประเมินระดับคะแนน (ต่อ)

ระดับทักษะที่ประเมิน	ระดับคะแนน
มีทักษะ 1 ใน 2 ของมาตรฐาน	0.2
มีทักษะ 2 ใน 3 ของมาตรฐาน	0.3
ต้องฝึกเพิ่มเติมในบางทักษะ	0.4
มีทักษะตามมาตรฐาน	0.5
มีทักษะค่อนข้างดีกว่ามาตรฐาน	0.6
มีทักษะดีกว่ามาตรฐาน	0.7
มีทักษะดีมาก	0.8
มีทักษะดีเยี่ยม	0.9
มีทักษะเยี่ยมมาก	1.0

ตารางที่ 9 ทักษะของพนักงานผลิตกลุ่ม A

กลุ่ม AA01A02A03A04A05A...A10A11A12A13A14

OP01	0.8	0.8	0.7	0.6	0.4	...	0.8	0.7	0.9	0.8	0.5
OP02	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	...	0.9	0.5	0.5	0.7	0.8
OP03	0.9	0.9	0.6	0.6	0.7	...	0.8	0.9	0.8	0.8	0.5
OP04	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	...	0.8	0.9	0.8	0.9	0.5
OP05	0.7	0.6	0.5	0.7	0.7	...	0.8	0.7	0.9	0.7	0.8
OP06	0.8	0.9	0.7	0.5	0.8	...	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7
OP...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
OP14	0.8	0.8	0.6	0.6	0.4	...	0.5	1.0	0.5	0.8	0.5
OP15	0.7	0.5	0.8	0.7	0.8	...	0.8	0.9	0.8	0.9	1.0
OP16	0.6	0.6	0.8	0.9	0.5	...	0.5	0.7	0.9	0.7	0.8
OP17	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9	...	0.5	0.8	0.8	0.5	0.9
OP18	0.8	0.8	0.8	0.5	0.7	...	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8
OP19	0.7	0.5	0.4	0.5	0.8	...	0.5	0.5	0.8	1.0	1.0
OP20	0.8	0.7	0.8	0.9	0.4	...	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0

4. การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาข้อมูลพบว่าทางบริษัทกรณีศึกษานั้นไม่มีการใช้เครื่องมือช่วยคำนวณหรือตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์หาคำตอบ แต่เป็นการใช้ประสบการณ์ของพนักงานในการวางแผนการผลิต จึงเกิดปัญหาการส่งมอบสินค้าไม่ทันกำหนด ซึ่งทางบริษัทกรณีศึกษาเลือกแก้ปัญหาด้วยวิธีการเพิ่มชั่วโมงการทำงานล่วงเวลา โดยที่ไม่มีการ

แก้ไขปัญหาด้านการจัดการทรัพยากรการผลิต ส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูง รวมถึงในการจัดสรรแรงงานนั้นยังไม่มีการพิจารณาทักษะของพนักงานให้เหมาะสมกับงาน ทำให้ไม่เกิดประสิทธิภาพในการผลิตสูงสุด งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนการผลิต 2 กรณี คือการไม่กำหนดและกำหนดการทำงานล่วงเวลาเพื่อลดต้นทุนในการผลิต รวมถึงตัวแบบสำหรับการจัดสรรพนักงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ดังนี้

4.1.ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนการผลิต (M1)

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming, ILP) สำหรับการวางแผนการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีต้นทุนค่าแรงรวมทุกช่วงเวลาการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ดังนี้

กำหนดให้ d = วันทำงานปกติ 1,2, ..., D

h = วันทำงานในวันหยุด 1,2, ..., H

w = สัปดาห์ที่ 1,2, ..., W

m = เดือนที่ 1,2, ..., M

g = สินค้ากลุ่มที่ 1,2, ..., G

k = สินค้าชนิดที่ 1,2, ..., K

4.1.1. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

C_R = ค่าแรงช่วงเวลาคปกติ-วันธรรมดา (บาท/ชั่วโมง)

C_{otR} = ค่าแรงช่วงล่วงเวลา-วันธรรมดา (บาท/ชั่วโมง)

C_H = ค่าแรงช่วงเวลาคปกติ-วันหยุด (บาท/ชั่วโมง)

C_{otH} = ค่าแรงช่วงล่วงเวลา-วันหยุด (บาท/ชั่วโมง)

I_{kgwm} = ปริมาณการเก็บสินค้าคงคลังของสินค้าโมเดล

k กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (หน่วย)

P_k = อัตราการผลิตสินค้าโมเดล k (หน่วย/ชั่วโมง)

Q_{kgwm} = ปริมาณความต้องการสินค้าชนิด k กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (หน่วย)

L_{kgdwmR} = จำนวนพนักงานสินค้าชนิด k กลุ่ม g เวลาปกติ-วันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

$L_{kgdwmOT}$ = จำนวนพนักงานสินค้าชนิด k กลุ่ม g ล่วงเวลา-วันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

L_{kgdwmR} = จำนวนพนักงานของสินค้าชนิด k กลุ่ม g เวลาปกติ-วันหยุด h สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

$L_{kgdwmOT}$ = จำนวนพนักงานของสินค้าชนิด k กลุ่ม g ล่วงเวลา-วันหยุด h สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

OT_{dgwm} = จำนวนชั่วโมงแรงงานล่วงเวลา-วันธรรมดา d กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

OT_{hgwm} = จำนวนชั่วโมงแรงงานล่วงเวลา-วันหยุด h กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

$OT_{dgwmMax}$ = จำนวนชั่วโมงแรงงานสูงสุดล่วงเวลา-วันธรรมดา d กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

$OT_{hgwmMax}$ = จำนวนชั่วโมงแรงงานสูงสุดล่วงเวลา-วันหยุด h กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

OTP_{dgwm} = จำนวนชั่วโมงแรงงานล่วงเวลาตามนโยบายโรงงานวันธรรมดา d กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

OTP_{hgwm} = จำนวนชั่วโมงแรงงานล่วงเวลาตามนโยบายโรงงานวันหยุด h กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

R_{dgwm} = จำนวนชั่วโมงแรงงานปกติ-วันธรรมดา d กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

R_{hgwm} = จำนวนชั่วโมงแรงงานปกติ-วันหยุด h กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

$R_{dgwmMax}$ = จำนวนชั่วโมงแรงงานสูงสุดปกติ-วันธรรมดา d กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

$R_{hgwmMax}$ = จำนวนชั่วโมงแรงงานสูงสุดปกติ-วันหยุด h กลุ่ม g สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (ชั่วโมง)

4.1.2. ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

X_{kgdwm} = ปริมาณการผลิตสินค้าโมเดล k กลุ่ม g วันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m ในช่วงเวลาการทำงานปกติ-วันธรรมดา (หน่วย)

X_{kghwm} = ปริมาณการผลิตสินค้าโมเดล k กลุ่ม g ของวันหยุด h สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m ในช่วงเวลาการทำงานปกติ-วันหยุด (หน่วย)

Y_{kgdwm} = ปริมาณการผลิตสินค้าโมเดล k กลุ่ม g ของวันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m ในช่วงเวลาการทำงานล่วงเวลา-วันธรรมดา (หน่วย)

Y_{kghwm} = ปริมาณการผลิตสินค้าโมเดล k กลุ่ม g ของวันหยุด h สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m ในช่วงเวลาการทำงานล่วงเวลา-วันหยุด (หน่วย)

4.1.3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และเงื่อนไขบังคับ (Constraints)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับที่เกี่ยวข้องของตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับการวางแผนการผลิต (MI) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{d=1}^D \left(\frac{X_{kgdwm} C_{Rk} + Y_{kgdwm} C_{OTk}}{P_k} \right) + \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H \left(\frac{X_{kghwm} C_{Hk} + Y_{kghwm} C_{OTk}}{P_k} \right) \quad (1)$$

ภายใต้เงื่อนไขสมการที่ (2)–(10)

$$\left(\sum_{d=1}^D X_{kgdwm} + \sum_{h=1}^H X_{kghwm} + \sum_{d=1}^D Y_{kgdwm} + \sum_{h=1}^H Y_{kghwm} \right) \geq Q_{kgwm} ; \forall k, g, w, m \quad (2)$$

$$\sum_k \frac{X_{kgdwm}}{P_k} \leq \sum_k L_{kgdwmR} \times 8hrs ; \forall g, d, w, m \quad (3)$$

$$\sum_k \frac{Y_{kgdwm}}{P_k} \leq \sum_k L_{kgdwmOT} \times 2hrs ; \forall g, d, w, m \quad (4)$$

$$\sum_k \frac{Y_{kgdwm}}{P_k} \geq OTP_{dgwm} ; \forall g, d, w, m \quad (5)$$

$$\sum_k \frac{X_{kghwm}}{P_k} \leq \sum_k L_{kghwmR} \times 8hrs ; \forall g, h, w, m \quad (6)$$

$$\sum_k \frac{Y_{kghwm}}{P_k} \leq \sum_k L_{kghwmOT} \times 2hrs ; \forall g, h, w, m \quad (7)$$

$$\sum_k \frac{Y_{kghwm}}{P_k} \geq OTP_{hgwm} ; \forall g, h, w, m \quad (8)$$

$$I_{kgwm} = I_{kg(w-1)m} + \left(\sum_{d=1}^D X_{kgdwm} + \sum_{h=1}^H X_{kghwm} + \sum_{d=1}^D Y_{kgdwm} + \sum_{h=1}^H Y_{kghwm} \right) - Q_{kgwm} ; \forall k, g, w, m \quad (9)$$

$$X_{kgdwm}, X_{kghwm}, Y_{kgdwm}, Y_{kghwm} \geq 0 \text{ and Integer} ; \forall k, g, d, h, w, m \quad (10)$$

สมการที่ (1) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนค่าแรงรวมที่ต่ำที่สุด โดยคำนวณจากปริมาณการผลิตในวันธรรมดาและวันหยุด ทั้งในช่วงเวลาปกติและช่วงล่วงเวลา สมการที่ (2) เป็นเงื่อนไขในการกำหนดปริมาณการผลิตตามปริมาณคำสั่งซื้อ สมการที่ (3)–(8) เป็นเงื่อนไขในการกำหนดจำนวนชั่วโมงแรงงานไม่ให้เกินจำนวนชั่วโมงแรงงานสูงสุดและไม่ให้น้อยกว่าชั่วโมงล่วงเวลาตามนโยบายของโรงงาน สมการที่ (9) เป็นเงื่อนไขเกี่ยวกับปริมาณสินค้าคงคลัง และสมการที่ (10) เป็นเงื่อนไขจำนวนการผลิตต้องไม่ติดลบและต้องเป็นจำนวนเต็ม

4.2. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรแรงงานให้เหมาะสมกับงาน (M2)

ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 3.4 เมื่อทำการวางแผนการผลิตและกำหนดจำนวนพนักงานแล้ว งานวิจัยนี้จึงพัฒนาตัวแบบ ILP สำหรับการจัดสรรแรงงานตามทักษะของพนักงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้มีค่าทักษะในการผลิตสูงสุด ซึ่งสามารถกำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ได้ดังนี้

กำหนดให้ j = พนักงานคนที่ 1,2,3...(J)

4.2.1. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

L_{kgdwmR} = จำนวนพนักงานสินค้าชนิด k กลุ่ม g เวลาปกติ-วันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

$L_{kgdwmOT}$ = จำนวนพนักงานสินค้าชนิด k กลุ่ม g ล่วงเวลา-วันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

$L_{kgghwmR}$ = จำนวนพนักงานของสินค้าชนิด k กลุ่ม g เวลาปกติ-วันหยุด h สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

$L_{kgghwmOT}$ = จำนวนพนักงานของสินค้าชนิด k กลุ่ม g ล่วงเวลา-วันหยุด h สัปดาห์ที่ w ของเดือนที่ m (คน)

T_{jkg} = ทักษะในการผลิตสินค้าของพนักงานคนที่ j สินค้าชนิด k กลุ่ม g

4.2.2. ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

U_{jkgdwm} = พนักงานคนที่ j ผลิตสินค้าชนิด k กลุ่ม g ช่วงเวลาปกติ-วันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w เดือน m (คน)

U_{jkghwm} = พนักงานคนที่ j ผลิตสินค้าชนิด k กลุ่ม g ช่วงเวลาปกติ-วันหยุด h สัปดาห์ที่ w เดือนที่ m (คน)

V_{jkgdwm} = พนักงานคนที่ j ผลิตสินค้าชนิด k กลุ่ม g ช่วงเวลา-วันธรรมดา d สัปดาห์ที่ w เดือนที่ m (คน)

V_{jkghwm} = พนักงานคนที่ j ผลิตสินค้าชนิด k กลุ่ม g ช่วงเวลา-วันหยุด h สัปดาห์ที่ w เดือนที่ m (คน)

4.2.3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และเงื่อนไขบังคับ (Constraints)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรแรงงานให้เหมาะสมกับทักษะการทำงานของพนักงาน (M2) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (11)

$$\text{Max } Z = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \left(\frac{(U_{jkgdwm} + U_{jkghwm}) \times T_{jkg}}{L_{kgdwmR} + L_{kgghwmR}} \right) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \left(\frac{(V_{jkgdwm} + V_{jkghwm}) \times T_{jkg}}{L_{kgdwmOT} + L_{kgghwmOT}} \right) \quad (11)$$

ภายใต้เงื่อนไขดังสมการที่ (12)–(20)

$$\sum_{k=1}^K U_{jkgdwm} \leq 1 \quad ; \forall j, g, d, w, m \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K U_{jkghwm} \leq 1 \quad ; \forall j, g, h, w, m \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K V_{jkgdwm} \leq 1 \quad ; \forall j, g, d, w, m \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K V_{jkghwm} \leq 1 \quad ; \forall j, g, h, w, m \quad (15)$$

$$U_{jkgdwm} = L_{kgdwmR} \quad ; \forall j, k, g, d, w, m \quad (16)$$

$$U_{jkghwm} = L_{kgghwmR} \quad ; \forall j, k, g, h, w, m \quad (17)$$

$$V_{jkgdwm} = L_{kgdwmOT} \quad ; \forall j, k, g, d, w, m \quad (18)$$

$$V_{jkghwm} = L_{kgghwmOT} \quad ; \forall j, k, g, h, w, m \quad (19)$$

$$U_{jkgdwm}, U_{jkghwm}, V_{jkgdwm}, V_{jkghwm} = \text{binary} \quad ; \forall j, k, g, d, h, w, m \quad (20)$$

สมการที่ (11) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อจัดสรรแรงงานโดยคำนวณจากจำนวนพนักงานที่ต้องการตามแผนการผลิตและทักษะของพนักงาน สมการที่ (12)–(15) เป็นเงื่อนไขในการกำหนดให้พนักงานแต่ละคนทำงานได้ไม่เกิน 1 งานต่อวัน สมการที่ (16)–(19) เป็นเงื่อนไขในการกำหนดให้จำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรรในแต่ละงานนั้นต้องเท่ากับจำนวนแรงงานที่ต้องการตามแผนการผลิต สมการที่ (20) เป็นเงื่อนไขการจัดสรรพนักงานซึ่งต้องมีค่าตอบเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

5. ผลการวิจัย

5.1.การหาคำตอบของตัวแบบที่นำเสนอ

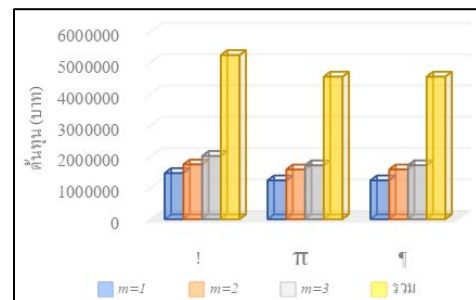
สำหรับการหาคำตอบของตัวแบบ $M1$ และ $M2$ ที่นำเสนอ งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ Solver ในโปรแกรม MS Excel บนระบบปฏิบัติการ Windows (COMPUTE CORES 2C+3G 3.00 GHz, Installed: 4.00 GB, x64-based processor) ซึ่งสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของการวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบที่นำเสนอ ทั้งในกรณีที่ไม่มีกำหนดการทำงานล่วงเวลาตามนโยบายของบริษัทและกรณีที่กำหนดชั่วโมงการทำงานล่วงเวลาตามนโยบายของบริษัท (ตามข้อมูลในตารางที่ 7) รวมถึงการจัดสรรแรงงานให้เหมาะสมกับงาน

5.2.การวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบ $M1$ ที่นำเสนอ

ข้อมูลปริมาณความต้องการสินค้าและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตในช่วง 12 สัปดาห์ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 กลุ่ม (ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2) ได้ถูกนำมาใช้ในการวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบ $M1$ ที่นำเสนอในสมการที่ (1)–(10) และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการวางแผนการผลิตแบบกำหนดและไม่กำหนดชั่วโมงล่วงเวลากับการวางแผนการผลิตแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา โดยผลของการวางแผนการผลิตในแต่ละช่วงเวลาและต้นทุนค่าแรงรวมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9

เมื่อวิเคราะห์ในส่วนของการวางแผนการผลิตกรณีที่มีการกำหนดชั่วโมงการทำงานล่วงเวลาตามนโยบายของบริษัท จะเห็นได้ว่าตัวแบบ $M1$ ที่นำเสนอได้ทำการกำหนดแผนการผลิตล่วงเวลาในช่วงวันธรรมดา (OT_d) ก่อนการผลิตล่วงเวลาในช่วงวันหยุด (OT_h) และพิจารณาการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการผลิตสูงให้ผลิตในช่วงล่วงเวลาแทนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการผลิตต่ำ เพื่อลดจำนวนชั่วโมงการผลิตในช่วงล่วงเวลาซึ่งมีค่าแรงสูงกว่าการผลิตในช่วงเวลาปกติ จึงส่งผลให้สามารถกำหนดแผนการผลิตที่มีต้นทุนค่าแรงรวมต่ำที่สุดได้ นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าแผนการผลิตที่ได้จากตัวแบบที่นำเสนอไม่มีการผลิตในวันหยุด ทั้งช่วงเวลาปกติและช่วงล่วงเวลาเลย และมีการผลิตในช่วงล่วงเวลาตามที่นโยบายของบริษัทกำหนดไว้ในวันธรรมดารวม 25,636 หน่วย หรือคิดเป็น

ร้อยละ 6.82 ของปริมาณการผลิตทั้งหมด ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้มากถึง 688,844 บาทหรือคิดเป็นร้อยละ 13.14 ของต้นทุนการผลิตแบบเดิมของทางบริษัท และในกรณีที่ไม่มีกำหนดชั่วโมงล่วงเวลา สามารถลดต้นทุนได้มากถึง 690,609 บาทหรือคิดเป็นร้อยละ 13.17 ของต้นทุนการผลิตแบบเดิมของทางบริษัท จะเห็นได้ว่าการวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบที่นำเสนอมีต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธีการเดิมของบริษัท ดังตารางที่ 9 และ รูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบต้นทุนค่าแรงจากการวางแผนการผลิตทั้ง 3 กรณี

5.3.การจัดสรรแรงงานให้เหมาะสมกับงานด้วยตัวแบบ $M2$ ที่นำเสนอ

ในการจัดสรรแรงงานด้วยตัวแบบ $M2$ ที่นำเสนอ ข้อมูลทักษะของพนักงาน (ในหัวข้อที่ 3.4) และจำนวนพนักงานที่ต้องการหลังจากการวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบ $M1$ ถูกนำมาใช้สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ในสมการที่ (11)–(20) โดยการจัดสรรแรงงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอทั้งในกรณีที่มีการกำหนดการทำงานล่วงเวลาและไม่กำหนดการทำงานล่วงเวลานั้นสามารถจัดสรรแรงงานได้อย่างเหมาะสมและมีค่าทักษะเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 69.00 ตามการจัดสรรแรงงานแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษาเป็น 83.51 และ 83.74 ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 14.51 และ 14.74 ตามลำดับ ดังตารางที่ 10 และรูปที่ 2

จากการวิเคราะห์ผลการจัดสรรแรงงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอ พบว่าเมื่อมีการกำหนดการทำงานล่วงเวลาตามนโยบายของบริษัท ตัวแบบ $M2$ จะจัดสรรพนักงานที่มีทักษะการทำงานสูงให้ทำงานในช่วงล่วงเวลาเพื่อให้สอดคล้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการผลิตสูง

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบของการวางแผนการผลิตแบบเดิมของบริษัทและตัวแบบที่นำเสนอ

เดือน (m), สัปดาห์ (w)	กลุ่ม ผลิตภัณฑ์	จำนวนชั่วโมงในแต่ละช่วงเวลาในการผลิต (ชั่วโมง-แรงงาน)												ปริมาณการผลิตต่อเวลารวม			ค่าแรงในการผลิตรวม (บาท)		
		R_t			OT_t			R_t			OT_t			$(unit)$					
		!	II	III	!	II	III	!	II	III	!	II	III	!	II	III	!	II	III
$m = 1, w = 1$	A	935	593	593	40	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	39,800	23,713	23,720
	B	7,000	6,368	6,368	150	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	289,000	254,720	254,720
	C	825	793	793	110	0	0	0	0	0	0	0	0	350	0	0	39,600	31,720	31,723
$m = 1, w = 2$	A	935	593	593	40	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	39,800	23,713	23,720
	B	7,000	6,368	6,368	150	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	289,000	254,720	254,720
	C	825	793	793	110	0	0	0	0	0	0	0	0	350	0	0	39,600	31,720	31,723
$m = 1, w = 3$	A	935	593	593	40	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	39,800	23,713	23,720
	B	7,000	6,368	6,368	150	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	289,000	254,720	254,720
	C	825	793	793	110	0	0	0	0	0	0	0	0	350	0	0	39,600	31,720	31,723
$m = 1, w = 4$	A	935	593	593	40	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	39,800	23,713	23,720
	B	7,000	6,368	6,368	150	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	289,000	254,720	254,720
	C	825	793	793	110	0	0	0	0	0	0	0	0	350	0	0	39,600	31,720	31,723
รวมช่วงเวลา $m = 1$		35,040	31,015	31,016	1,200	0	0	0	0	0	0	0	0	1,840	0	0	1,473,600	1,240,611	1,240,652
$m = 2, w = 1$	A	760	760	760	200	46	47	0	0	0	0	0	0	50	48	50	42,400	33,160	33,220
	B	7,200	7,200	7,200	800	559	562	0	0	0	0	0	0	1,125	1,042	2,115	336,000	321,540	321,720
	C	800	800	800	450	174	174	0	0	0	0	0	0	1,450	1,400	353	59,000	42,448	42,446
$m = 2, w = 2$	A	760	760	760	200	46	47	0	0	0	0	0	0	50	48	50	42,400	33,160	33,220
	B	7,200	7,200	7,200	800	559	562	0	0	0	0	0	0	1,125	1,042	2,115	336,000	321,540	321,720
	C	800	800	800	450	174	174	0	0	0	0	0	0	1,450	1,400	353	59,000	42,448	42,446
$m = 2, w = 3$	A	760	760	760	200	46	47	0	0	0	0	0	0	50	48	50	42,400	33,160	33,220
	B	7,200	7,200	7,200	800	559	562	0	0	0	0	0	0	1,125	1,042	2,115	336,000	321,540	321,720
	C	800	800	800	450	174	174	0	0	0	0	0	0	1,450	1,400	353	59,000	42,448	42,446
$m = 2, w = 4$	A	760	760	760	200	46	47	0	0	0	0	0	0	50	48	50	42,400	33,160	33,220
	B	7,200	7,200	7,200	800	559	562	0	0	0	0	0	0	1,125	1,042	2,115	336,000	321,540	321,720
	C	800	800	800	450	174	174	0	0	0	0	0	0	1,450	1,400	353	59,000	42,448	42,446
รวมช่วงเวลา $m = 2$		35,040	35,040	35,040	5,800	3,117	3,133	0	0	0	0	0	0	10,500	9,960	10,064	1,749,600	1,588,590	1,589,547

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบของการวางแผนการผลิตแบบดั้งเดิมของบริษัทและตัวแบบที่นำเสนอ (ต่อ)

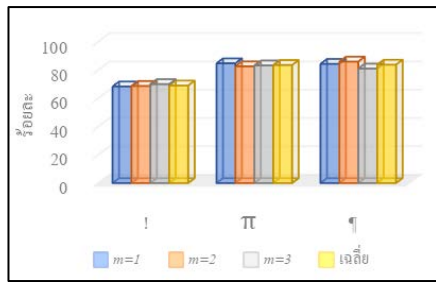
เดือน (m), สัปดาห์ (w)	กลุ่ม ผลิตภัณฑ์	จำนวนชั่วโมงในแต่ละช่วงเวลาในการผลิต (ชั่วโมง-แรงงาน)												ปริมาณการผลิตต่อเวลารวม			ค่าแรงในการผลิตรวม (บาท)		
		R_L			OT_L			R_L			OT_L			$(m \times w)$					
		!	π	η	!	π	η	!	π	η	!	π	η	!	π	η	!	π	η
$m = 3, w = 1$	A	760	754	755	340	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	50,800	30,160	30,200
	B	7,200	7,200	7,200	1,800	1,236	1,238	100	0	0	0	0	0	2,925	2,400	3,676	404,000	362,150	362,280
	C	800	800	800	300	106	106	0	0	0	0	0	0	700	225	218	50,000	38,338	38,360
$m = 3, w = 2$	A	760	754	755	340	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	50,800	30,160	30,200
	B	7,200	7,200	7,200	1,800	1,236	1,238	100	0	0	0	0	0	2,925	2,400	3,676	404,000	362,150	362,280
	C	800	800	800	300	106	106	0	0	0	0	0	0	700	225	218	50,000	38,338	38,360
$m = 3, w = 3$	A	760	754	755	340	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	50,800	30,160	30,200
	B	7,200	7,200	7,200	1,800	1,236	1,238	100	0	0	0	0	0	2,925	2,400	3,676	404,000	362,150	362,280
	C	800	800	800	300	106	106	0	0	0	0	0	0	700	225	218	50,000	38,338	38,360
$m = 3, w = 4$	A	760	754	755	340	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	50,800	30,160	30,200
	B	7,200	7,200	7,200	1,800	1,236	1,238	100	0	0	0	0	0	2,925	2,400	3,676	404,000	362,150	362,280
	C	800	800	800	300	106	106	0	0	0	0	0	0	700	225	218	50,000	38,338	38,360
รวมช่วงเวลา $m = 3$		35,040	35,015	35,020	9,760	5,367	5,376	400	0	0	0	0	0	14,540	10,500	15,576	2,019,200	1,722,590	1,723,360
รวม		105,120	101,070	101,076	16,760	8,483	8,509	400	0	0	0	0	0	26,880	20,460	25,628	5,242,400	4,551,791	4,553,559

กำหนดให้ ! = การวางแผนการผลิตของโรงงาน, π = การวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบที่นำเสนอโดยไม่กำหนดการทำงานล่วงเวลา, η = การวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบที่นำเสนอโดยกำหนดการทำงานล่วงเวลาตามนโยบาย

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบค่าทักษะของพนักงาน (%) สำหรับการจัดสรรแรงงาน

เดือน (m)	กลุ่ม A			กลุ่ม B			กลุ่ม C			เฉลี่ยแต่ละเดือน			เฉลี่ยสามเดือน		
	!	π	η	!	π	η	!	π	η	!	π	η	!	π	η
$m = 1$	70.00	87.65	87.09	65.00	76.40	76.40	70.00	90.11	89.50	68.33	84.72	84.30			
$m = 2$	68.00	83.59	85.42	68.00	77.02	82.20	70.00	87.16	90.16	68.67	82.59	85.93	69.00	83.51	83.74
$m = 3$	70.00	84.14	84.03	70.00	77.03	69.70	70.00	88.49	89.17	70.00	83.22	80.97			

กำหนดให้ ! = การวางแผนการผลิตของโรงงาน, π = การวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบที่นำเสนอโดยไม่กำหนดการทำงานล่วงเวลา, η = การวางแผนการผลิตด้วยตัวแบบที่นำเสนอโดยกำหนดการทำงานล่วงเวลาตามนโยบาย



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าร้อยละของทักษะการทำงานของพนักงานจากการจัดสรรแรงงานทั้ง 3 กรณี

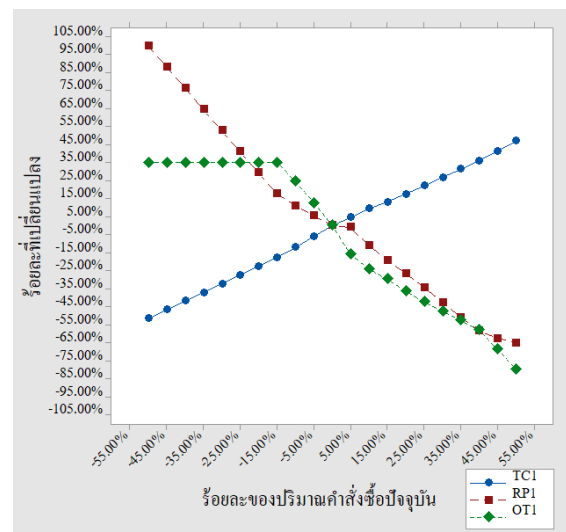
5.4.การวิเคราะห์ข้อจำกัดและต้นทุน ในการวางแผนการผลิตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคำสั่งซื้อ

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความต้องการสินค้าต่อต้นทุนและเวลาในการผลิตคงเหลืองานวิจัยนี้จึงทำการกำหนดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคำสั่งซื้อทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง จากร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 50 ของปริมาณคำสั่งซื้อปัจจุบัน ทั้งการผลิตที่กำหนดและไม่กำหนดชั่วโมงการผลิตแบบล่วงเวลาตามนโยบาย

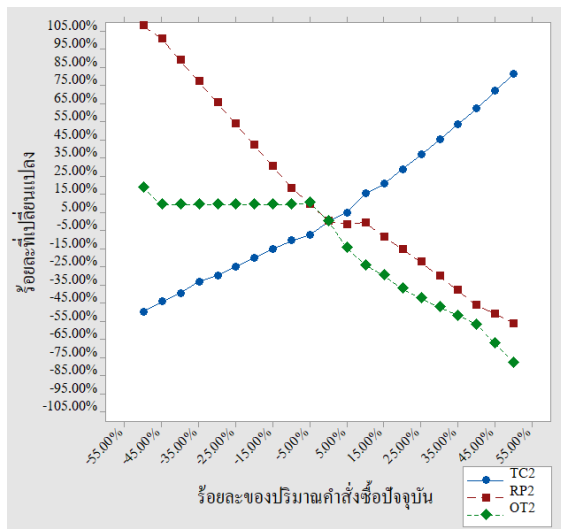
ผลจากตัวแบบที่นำเสนอพบว่าเมื่อมีคำสั่งซื้อเพิ่มขึ้นจะมีต้นทุนในการผลิตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากจำเป็นต้องใช้เวลาในการผลิตเพิ่มขึ้น ในขณะที่จำนวนชั่วโมงการผลิตแบบล่วงเวลาของวันธรรมดาและวันหยุดจะขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการสินค้าของแต่ละกลุ่มของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นการที่ตัวแบบที่นำเสนอมีการพิจารณาต้นทุนของค่าแรงในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ตัวแบบจึงกำหนดแผนการผลิตล่วงเวลาในช่วงวันธรรมดา (OT_d) ก่อนการผลิตล่วงเวลาในช่วงวันหยุด (OT_h) และพิจารณาการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการผลิตสูงให้ผลิตในช่วงล่วงเวลา โดยเมื่อปริมาณความต้องการสินค้าเพิ่มขึ้น ตัวแบบที่นำเสนอจะยังคงหาคำตอบที่ทำให้ผลิตผลิตภัณฑ์ทุกโมเดลได้ทันกำหนด โดยมีข้อจำกัดด้านเวลาในการผลิตที่สามารถรองรับปริมาณคำสั่งซื้อที่เพิ่มขึ้นได้ไม่เกินร้อยละ 40 ของปริมาณคำสั่งซื้อปัจจุบัน และจะไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์บางโมเดลในกลุ่มที่ B ได้ทันเวลาเมื่อมีความต้องการสินค้าเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 40 ของปริมาณคำสั่งซื้อปัจจุบัน จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4

จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะมีชั่วโมงการผลิตในช่วงเวลาปกติและช่วงล่วงเวลาเฉลี่ย 3 เดือนคงเหลืออยู่เมื่อความต้องการสินค้าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 45 และร้อยละ 50 ของปริมาณคำสั่งซื้อปัจจุบัน แต่เวลาคงเหลือดังกล่าวนี้เป็นเวลาคงเหลือของการผลิตผลิตภัณฑ์ในกลุ่ม A และกลุ่ม C จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์กลุ่ม B ได้

ในทางกลับกันเมื่อมีคำสั่งซื้อลดลงจะมีต้นทุนในการผลิตที่ลดลงเช่นกัน รวมถึงมีชั่วโมงการผลิตในช่วงเวลาปกติคงเหลืออยู่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามชั่วโมงการผลิตในช่วงล่วงเวลาคงเหลือนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีคำสั่งซื้อลดลงไม่เกินร้อยละ 15 ของปริมาณคำสั่งซื้อปัจจุบัน และจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีกแม้ว่าจะมีคำสั่งซื้อลดลง เนื่องจากยังคงจำเป็นที่จะต้องมีการผลิตในช่วงล่วงเวลาสำหรับผลิตภัณฑ์บางโมเดล เพื่อให้ทันกับกำหนดการส่งมอบสินค้า ยกเว้นกรณีที่ปริมาณคำสั่งซื้อของสินค้าบางโมเดลลดลงจนสามารถผลิตได้ทันในช่วงเวลาปกติ จึงมีชั่วโมงการผลิตในช่วงล่วงเวลาคงเหลือเพิ่มขึ้นได้อีก ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ร้อยละของต้นทุน (TC1) ชั่วโมงการผลิตในช่วงเวลาปกติคงเหลือ (RP1) ชั่วโมงการผลิตในช่วงล่วงเวลาคงเหลือ (OT1) เปรียบเทียบกับปริมาณคำสั่งซื้อปัจจุบันโดยไม่กำหนดชั่วโมงการผลิตในช่วงล่วงเวลา



รูปที่ 4 ร้อยละของต้นทุน (TC2) ชั่วโมงการผลิตในช่วงเวลาปกติคงเหลือ (RP2) ชั่วโมงการผลิตในช่วงเวลาคงเหลือ (OT2) เปรียบเทียบกับปริมาณคำสั่งซื้อปัจจุบันโดยกำหนดชั่วโมงการผลิตในช่วงเวลา

6. สรุปผลการวิจัย

จากการใช้ตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เพื่อหาคำตอบของการวางแผนการผลิต (ตัวแบบ *M1*) และการจัดสรรแรงงาน (ตัวแบบ *M2*) สำหรับการผลิตชุดสายไฟรถยนต์ของบริษัทกรณีศึกษาเป็นเวลา 1 ไตรมาส สามารถลดต้นทุนค่าแรงได้มากถึงร้อยละ 13.17 เมื่อเปรียบเทียบกับตารางแผนการผลิตแบบเดิมของบริษัทในกรณีที่ไม่มีกำหนดขอบเขตของชั่วโมงการทำงานล่วงเวลา และสามารถลดต้นทุนค่าแรงได้ร้อยละ 13.14 สำหรับกรณีที่มีการกำหนดชั่วโมงการทำงานล่วงเวลาตามนโยบายของบริษัท ซึ่งตัวแบบที่นำเสนอสามารถหาคำตอบของปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพและสัมพันธ์กับค่าแรงของพนักงานในการผลิตแต่ละช่วงเวลา โดยตัวแบบการวางแผนการผลิต (ตัวแบบ *M1*) ที่นำเสนอเหมาะสำหรับการหาคำตอบทั้งในสถานการณ์ที่ไม่มีกำหนดชั่วโมงล่วงเวลาขั้นต่ำและมีการกำหนดชั่วโมงล่วงเวลาขั้นต่ำ ซึ่งในกรณีที่ไม่มีกำหนดชั่วโมงล่วงเวลาขั้นต่ำนั้น การผลิตในบางช่วงไม่จำเป็นต้องมีการทำงานล่วงเวลาหรือมีการทำงานล่วงเวลาเฉพาะบางวัน ทำให้ไม่เพิ่มต้นทุนในการผลิตและพนักงานไม่จำเป็นต้องทำงานล่วงเวลา ในส่วนกรณีที่มีการกำหนด

ขอบเขตของชั่วโมงล่วงเวลา จะเหมาะกับสถานการณ์ที่มีการกำหนดชั่วโมงล่วงเวลาขั้นต่ำตามนโยบาย บริษัทสามารถจัดการแผนการผลิตตามปริมาณความต้องการสินค้ากับชั่วโมงการทำงานได้สะดวกเมื่อมีปริมาณความต้องการที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง

ในส่วนของการจัดสรรแรงงานให้เหมาะสมกับงานด้วยตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่น่าเสนอนั้น ตัวแบบที่นำเสนอสามารถจัดสรรแรงงานสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 กลุ่ม โดยมีทักษะในการผลิตของพนักงานรวมเพิ่มขึ้นจากการจัดสรรแรงงานแบบเดิมของบริษัทซึ่งอยู่ที่ร้อยละ 69.00 เป็นร้อยละ 83.51 และ 83.74 (สำหรับกรณีที่ไม่มีกำหนดขอบเขตของชั่วโมงการทำงานล่วงเวลาและกรณีที่มีการกำหนดชั่วโมงการทำงานล่วงเวลาตามนโยบายของบริษัทตามลำดับ) นอกจากนี้ต้นทุนที่ลดลงและทักษะการผลิตที่เพิ่มขึ้นแล้วนั้น ผู้ใช้งาน (User) สามารถปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อหาคำตอบในสถานการณ์ที่เปลี่ยนไปได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีความพร้อมที่จะรับมือกับการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของคำสั่งซื้อได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Latakit and K. Araya, "KKP Research", 2022. Distributed by Kiatnakin Phatra Bank Plc. https://media.kkpfg.com/document/2022/Apr/KKP%20Research_Thai_Automotive_Industry_Analysis_Edit.pdf
- [2] F. Claudio, G. Michele and M. Macro, "A 4M approach for a comprehensive analysis and improvement of manual assembly lines", presented at 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Modena, Italy, Jun. 27-30, 2017, pp. 1510–1518.

- [3] S. Kumar and N. Suresh, "Production Planning and Control," in *Production and Operations Management, Daryaganj*, New Delhi, India: New Age International (P) Ltd., 2009, ch. 5, sec. 2, pp. 108.
- [4] H. Jay and R. Barry, "Linear Programming Models" in *Operations Management*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 2011, part 4, sec. B, pp. 722.
- [5] R. S. Russell, and B. W. Taylor, "Sales and Operations Planning," in *Operations and supply chain management*, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2014, ch. 14, sec. 1, pp. 610.
- [6] H. A. Taha, "Modeling with Linear Programming," in *Operations research an introduction*, Harlow, England: Pearson Education Limited, 2017, ch. 2, sec. 2.4.2, pp. 62.
- [7] T. Srisawat, C. Ngiampaisal and W. Nunkaew, "A Lexicographic Optimization Model for Multi- Source Raw Material Purchasing of Steel Manufacturing with Several Objective Functions," in The 9th International Congress on Natural Sciences and Engineering, Nagoya, Japan, 2020.
- [8] P. Varvarigos and M. Y. Horne, "Application of Linear Programming too individual fish farm Production Planning," Ph.D. dissertation, Dept. Aquaculture, University of Stirling, Scotland, 1968
- [9] T. C. E. CHENG, "Capacity requirements planning by stochastic Linear Programming," *Mathematical Modelling*, vol. 7, no. 2–3, pp. 443–448, 1986, doi: 10.1016/0270-0255(86)90063-1.
- [10] D. L. Nash and G. W. Rogers, "Herd Sire Portfolio Selection: A Comparison of Rounded Linear and Integer Programming," *Journal of Dairy Science*, vol. 78, no. 11, pp. 2486–2495, 1995, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(95)76877-1.
- [11] M. A Talal and Y. Jay, "Refinery units maintenance scheduling using integer programming," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 19, no. 9, pp. 543–549, 1995, doi: 10.1016/0307-904X(95)00032-F.
- [12] J. Tehem, M. Pirlot and C. Antoniadis, "Embedding of linear programming in a simulated annealing algorithm for solving a mixed integer production planning problem," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 64, no. 1–2, pp. 91–102, 1995, doi: 10.1016/0377-0427(95)00009-7.
- [13] R. R. Farrell and T. C. Maness, "A relational database approach to a linear programming-based decision support system for production planning in secondary wood product manufacturing," vol. 40, no. 2, pp. 183–196, 2005, doi: 10.1016/j.dss.2004.02.001.
- [14] T. Subrata, S. Moumita and Md. Abnul Islamc, "Aggregate planning problem solving using linear programming method," *American Academic & Scholarly Research Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 20–28, 2015
- [15] T. G. Dariush, M. Stefan and S. Lena, "Mixed integer linear programming formulation for flexibility instruments in capacity planning problems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 97, pp. 101–110, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.04.013.
- [16] J. Huan, W. Barrett, Thomas and H. Mike, "Integer programming techniques for makespan minimizing workforce assignment models that recognize human learning," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 97, pp. 202–211, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.03.027.
- [17] F. P. Andres, A. H. Cesar, L. Amaia, P. M. Oliver and P. S Roberto, "Solving a staffing problem with annualized hours, multiskilling with 2-chaining, and overtime: A retail industry case," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 167, 2022, Art. no. 107999, doi: 10.1016/j.cie.2022.107999.
- [18] B. Sandro, R. Libo and K. Nestor, "A linear programming-based framework for handling missing data in multi-granular data warehouses," *Data &*

- Knowledge Engineering*, vol. 128, 2020, Art. no. 101832, doi: 10.1016/j.datak.2020.101832.
- [19] P. David, M. Josefa, J. Mariano and Ma del Mar Botella, "A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment," *European Journal of Operational Research*, vol. 205, no. 1, pp. 65–80, 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.11.031
- [20] W. Earl-Juei, S. Tai-Sheng and C. Ming-Hsien, "Comparative study of the applicability of fuzzy multi-objective linear programming models through cost-effective analysis for mold manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 206–219, 2013, doi: 10.1016/j.jmsy.2012.10.003.
- [21] E. Fathy and A. E. Hassanien, "Fuzzy harmonic mean technique for solving fully fuzzy multilevel multiobjective linear programming problems," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 10, pp. 8189–8205, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.01.021
- [22] B. Serdar, M. Bulent Durmusoglu and C. Didem, "Team based labour assignment methodology for new product development projects," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 106, pp. 83–104, 2017, doi: 10.1016/j.cie.2016.11.032.
- [23] J. Jully and B. O Mayassa, "Optimizing temporary work and overtime in the Time Cost Quality Trade-off Problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 284, no. 2, pp. 743–761, 2020, doi: 10.1016/j.ejor.2020.01.013.
- [24] T. Alejandra, M. D Gregorio, F. F John, M. A Jose and C. Javier, "Multistage reliability-based expansion planning of ac distribution networks using a mixed-integer linear programming model," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 138, 2022, Art. no. 107916, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107916.
- [25] H. Liping and S. Rong, "An Auto-MILP Model for Flexible Job Shop Scheduling Problem," *IFAC PapersOnLine*, vol. 55, no. 3, pp. 137–142, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.05.024.
- [26] K. Yiyo and L. Chia-Chun, "Operator assignment in a labor-intensive manufacturing cell considering inter-cell manpower transfer," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 110, pp. 83–91, 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.05.036.
- [27] W. S. Jacobson, "Preparing for Tomorrow: A Case Study of Workforce Planning in North Carolina Municipal Governments," *Public Personnel Management*, vol. 39, no. 4, pp. 353–377, 2010, doi: 10.1177/009102601003900404.
- [28] P. Yogita and T. Shruti, "Work Force Planning, Literature Analysis: Digitization compels for a Conceptual Model for Data Driven Decisions," *IOSR Journal of Business and Management*, vol. 19, no. 11, pp. 1–11, 2017, doi: 10.9790/487X-1911060111.
- [29] S. Judy and H. Gillian, "The right person, in the right job, with the right skills, at the right time: a workforce planning model that goes beyond metrics," *Library Management*, vol. 30, no. 8/9, pp. 561–571, 2009, doi: 10.1108/01435120911006520.
- [30] L. Nophadon, "Put the right man to the right job and division of labor concept in different context: Is it still valid in Modernity and Post-modernity era," *RMUTSB Academic Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 83–91, 2013.
- [31] R. K. Chakraborty and Md. A. Akhtar Hasin, "Solving an aggregate production planning problem by using multi-objective genetic algorithm (MOGA) approach," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 4, no. 1, p. 1–12, 2013, doi: 10.5267/j.ijiec.2012.09.003.

- [32] M. Claudio and P. M. Josep, "Labor supply with job assignment under balanced growth," *Journal of Economic Theory*, vol. 163, pp. 110–140, 2016, doi: 10.1016/j.jet.2016.01.004.
- [33] M. Garaix, M. Gondran, P. Lacomme, E. Mura and N. Tchernev, "Workforce Scheduling Linear Programming Formulation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 264–269, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.289.
- [34] L. J. Zeballosa, C. A. Mendeza and A. P. Barbosa Pova, "Mixed-integer linear programming approach for product design for life-cycle profit," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, 2019, Art. no. 106097, doi: 10.1016/j.cie.2019.106079
- [35] A. Ashkan, Z. Mostaf and F. Farbod, "Balancing, sequencing, and job rotation scheduling of a U-shaped lean cell with dynamic operator performance," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 143, 2020, Art. no. 106363, doi: 10.1016/j.cie.2020.106363.
- [36] Z. Ningru, S. Yukun, S. Yang and M. Jiaming, "Aggregate labor market fluctuations under news shocks," *Economic Modelling*, vol. 90, pp. 397–405, 2020, doi: 10.1016/j.econmod.2019.12.018.
- [37] K. Toshiya, K. Daisuke, F. Nobutada and I. Daichi, "Auction-based production planning considering operators' skill criterion," *CIRP Annals*, vol. 70, no. 1, pp. 399–402, 2021, doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.044.
- [38] A. El-Awady, M. Ashraf, A. Ali, E. Ahmed and D. Philippe, "Aggregate production planning considering organizational learning with case based analysis," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 2, 2022, Art. no. 101575, doi: 10.1016/j.asej.2021.09.002

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน

Removal Performance of Phosphate and Natural Organic Matter Using Nanofiltration Membrane

อภิญญา อ่อนสาร, สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ*, วิภาดา เดชะปัญญา, กรรณิกา รัตนพงศ์เสนา, เทียมมะณีรัตน์ รัตนวิระพันธ์ และ
สมภพ สนองราษฎร์¹

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190
Apinya Onsarn, Supatpong Mattaraj*, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka, Tiammanee Rattanaweerapan
and Sompop Sanongraj

Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai, Warin
Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

*Corresponding Author E-mail: supatpong.m@ubu.ac.th

Received: May 03, 2022; Revised: Sep 23, 2022; Accepted: Nov 11, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการหาประสิทธิภาพการกำจัดของฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งแผ่นเยื่อกรองเชิงการค้าที่ใช้ได้จาก GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040HM การทดลองเป็นการกรองภายใต้ชุดทดสอบการไหลปิดตายตามแนวตั้ง โดยฟอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัยคือ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต น้ำตัวอย่างถูกเตรียมด้วยความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 mg/L ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และค่าสารละลายพีเอชเท่ากับ 7.04 ขณะที่ความดันของเยื่อกรองในการดำเนินระบบเท่ากับ 60 psig จากการศึกษาพบว่าฟอสเฟตต่างชนิดกันที่มีความเข้มข้น 10 mg/L ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนผลรวมระหว่างฟอสเฟตในสารละลายและสารอินทรีย์ธรรมชาติส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์สูงกว่าสารละลายฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองแบบนาโนก่อนการใช้งาน มีค่าเท่ากับ 0.378 LMH.psig⁻¹ ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองหลังจากการใช้งานพร้อมกับทำความสะอาดด้วยกรดซิตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.312 LMH.psig⁻¹ และ 0.357 LMH.psig⁻¹ สอดคล้องกับอัตราส่วนของค่าการซึมผ่านเยื่อกรองร้อยละ 82.5 และ 94.4 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เยื่อกรองแบบนาโน, ฟอสเฟต, สารอินทรีย์ธรรมชาติ, การลดลงของฟลักซ์

Abstract

The objective of this research was to determine the removal performance of phosphate and natural organic matter (NOM) using nanofiltration membrane. The commercial membrane sheets used were obtained from GE Water & Process Technologies (model HL4040HM). The filtration experiments were tested under a dead-end filtration test cell. Phosphates applied in this research were disodium hydrogen phosphate and monopotassium phosphate. Water samples were prepared with NOM concentration of 10 mg/L, ionic strength of 0.01 M, and pH solution of 7.04, while the membrane pressure was operated at 60 psig. Experimental results found that the different phosphates in 10-mg/L solution provided similar flux declines. Combined phosphate and NOM solutions showed greater flux decline than those of phosphate solutions alone. The permeability (L_{p0}) of nanofiltration membrane prior to use

was 0.378 LMH.psig⁻¹. The membrane permeabilities (L_p) after used with acetic acid and NaOH cleaning were 0.312 LMH.psig⁻¹ and 0.357 LMH.psig⁻¹. This corresponded the ratio of membrane permeability (L_p/L_{p0}) about 82.5% and 94.4%, respectively.

Keywords: Nanofiltration Membrane, Phosphate, Natural Organic Matter, Flux decline

1. บทนำ

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) จัดเป็นธาตุอาหารชนิดหนึ่งที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมลพิษในแหล่งน้ำ เพราะเป็นส่วนสำคัญของจุดเริ่มต้นของสายใยอาหาร (Food webs) และเป็นแหล่งอาหารของพืชน้ำหลายชนิดตามธรรมชาติ โดยเฉพาะสาหร่าย (Algae) และแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) แต่การเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่มากเกินไปจนเป็นในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ทำให้สูญเสียภาวะสมดุลของสิ่งมีชีวิตในน้ำที่เป็นสาเหตุของปัญหาน้ำเน่าเสียหรือมลพิษทางน้ำ ซึ่งตัวอย่างการปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำที่มีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสในรูปเกลือฟอสเฟต (Phosphate; PO_4^{3-}) ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมหุบกเคลือบ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังเกิดจากกิจกรรมในครัวเรือน เช่น จากการซักล้าง การใช้ปุ๋ยเคมีจากกลุ่มของเกษตรกร รวมถึงการทำฟาร์มปศุสัตว์ เป็นต้น [1] ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิตและจากกิจกรรมที่ใช้ในครัวเรือนนี้ สารเคมีดังกล่าวจะถูกชะล้างและปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้น้ำเกิดความกระด้าง รวมทั้งคุณสมบัติของน้ำเป็นด่าง ส่งผลต่อการนำไปใช้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อสภาพสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น ทางทะเลทรายไม่เหมาะสมสำหรับพืชหลายชนิด รวมไปถึงการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น [2] เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดผลกระทบดังกล่าว ทางสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency; U.S.EPA) ได้กำหนดให้มีฟอสฟอรัสได้สูงสุดไม่เกิน 0.05 mg/L (0.15 mg- PO_4^{3-} /L) [3]

การกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสีย โดยปกติแล้วจะมีอยู่ 2 วิธีการหลัก ได้แก่ การตกตะกอนทางกายภาพหรือเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งวิธีการทั้งสอง ยังคงมีข้อเสียหรือข้อจำกัดบางประการ เช่น ในการตกตะกอน

ของสารเคมี มีปริมาณสารเคมีที่สูงขึ้น มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การบำรุงรักษา และปัญหาที่เกี่ยวกับการกำจัด เช่น กากตะกอนที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการกำจัด ส่วนกระบวนการทางชีวภาพ ใช้ระยะเวลานาน มีการบำรุงรักษาที่สูง รวมถึงต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่ และจากที่กล่าวมาวิธีการทั้งสองนั้น สามารถผลิตน้ำทิ้งได้ในปริมาณที่น้อยกว่า 0.5 mg/L P. [4] กระบวนการเยื่อกรอง (Membrane Process) เป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ใช้พื้นที่น้อย มีกระบวนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการควบคุม และมีกากตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยหรือไม่มีเลย ดังนั้น กระบวนการเยื่อกรอง (Membrane Process) เป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและสามารถปรับปรุงน้ำธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดแล้วให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ [5] โดยที่เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane) เป็นวิธีการกรองเพื่อใช้สำหรับผลิตน้ำสะอาด รวมถึงใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งสามารถกักกันสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก แบคทีเรีย จุลินทรีย์ รวมถึงเกลืออนินทรีย์บางชนิดได้ [6] น้ำที่ได้จึงเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมและการเกษตร รวมถึงการใช้เยื่อกรองแบบนาโนยังลดการใช้พลังงานและลดการใช้สารเคมีอินทรีย์ได้อีกด้วย [7] ซึ่งจากรายงานการศึกษา [8] พบว่าทางเลือกที่ดีอีกหนึ่งวิธีสำหรับกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำคือการใช้กระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองแบบนาโน เนื่องจากพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงและได้ผลผลิตของน้ำสูง อีกทั้งยังมีข้อได้เปรียบในแง่ของการนำเยื่อกรองกลับมาใช้ซ้ำ รวมถึงสามารถดำเนินระบบได้ต่อเนื่อง มีอายุการใช้งานของเยื่อกรองที่ยาวนานและไม่ต้องควบคุมการปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบ หรือควบคุมเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้เยื่อกรองแบบนาโนในการกำจัดโมเลกุลขนาดใหญ่ รวมถึงไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ

2 และวาเลนซ์ตั้งแต่ 2 ขึ้นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาการใช้เยื่อกรองแบบนาโนกำจัดไอออนวาเลนซ์เท่ากับ 2 พบว่า มีค่าการกำจัดมากกว่า 95% สำหรับการกำจัดสารจำพวก SO_4^{2-} , Ba^{2+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} [9] อย่างไรก็ตามในธรรมชาติโดยทั่วไปนอกจากพบการเจือปนของฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ ยังสามารถพบสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter; NOM) ที่เกิดจากซากผลิตภัณฑ์ของพืชในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ประกอบด้วย คาร์บอนออกซิเจน และไฮโดรเจนเป็นหลัก ซึ่งมีส่วนประกอบของสารลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบในการย่อยสลายเกิดเป็นสารแทนนิน (Tannin) สารประกอบฮิวมิก (Humic) และฟลูวิก (Fulvic) ส่วนใหญ่พบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าไม่เกิน 10 mg/l และมีขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (MWCO) ในช่วง 300 ถึง 30,000 ดาลตัน [10] โดยผลกระทบหลักที่เกิดจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีการเติมคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อ (Disinfection) ซึ่งคลอรีนจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติและเกิดสารพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection By-Products; DBPs) เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes; THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids; HAAs) จากข้อมูลนี้จึงทำให้ทาง U.S.PEA สรุปไว้ว่าสารดังกล่าวเป็นปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ [11] จากงานวิจัยของ [12] เยื่อกรองแบบนาโนสามารถกำจัดอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon; TOC) ได้สูงถึง 90 ถึง 95% กำจัดไอออนประจุเดี่ยวได้ประมาณ 70% กำจัดสารไตรฮาโลมีเทน 91 ถึง 98% กำจัดความกระด้างของน้ำที่มีแคลเซียมกับแมกนีเซียม 85 ถึง 95% [13–15] สำหรับปัญหาหลัก ๆ ที่พบจากการใช้เยื่อกรองแบบนาโนกับสารอินทรีย์ธรรมชาติคือการอุดตันบนพื้นผิวของเยื่อกรอง (Membrane Fouling) โดยการอุดตันของเยื่อกรองสามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเกิดปรากฏการณ์คอนเซนตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation) การเกิดชั้นเจล (Gel Layer) เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองจากงานวิจัยของ [16] ศึกษาไอออนประจุบวก (+1 และ +2)

ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าเกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนส่งผลต่อการลดลงของอัตราการไหลของเยื่อกรอง จากผลการศึกษาข้างต้นจึงคาดว่าหากมีการรวมตัวกันระหว่างไอออนประจุบวก และสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบ อาจทำให้เกิดการรวมตัวกันของสารดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการอุดตันบนพื้นผิวเยื่อกรองแบบนาโนโดยสามารถเกิดการอุดตันได้ในหลากหลายลักษณะ เช่น การเกิดตะกอน ของสารอนินทรีย์บนผิวเยื่อกรอง หรือการทำหน้าที่เป็นสะพาน (Bridging effects) ระหว่างผิวเยื่อกรองและสารอินทรีย์ทำให้เกิดชั้นเค้กเกิดขึ้นที่ผิวเยื่อกรอง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจึงต้องทำการควบคุมความเข้มข้นของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ของน้ำตัวอย่าง นอกจากนี้การล้างแผ่นเยื่อกรองหลังจากการใช้งานด้วยตัวกรดและด่าง ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านเยื่อกรองกลับมาใกล้เคียงกับค่าการใช้งานเริ่มต้น ทำให้ยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรองให้ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามยังมียังงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟอสเฟตโดยนาโนฟิลเตรชัน โดยส่วนใหญ่ศึกษาผลที่เกิดจากค่าพีเอช ความดัน ความเข้มข้นสารละลายรูปแบบการอุดตันที่เกิดขึ้น ตลอดจนเปรียบเทียบเยื่อกรองนาโนเกรดการค้าและการดัดแปลง ที่มีต่อการกำจัด แต่ยังคงขาดการวิจัยหรือมีส่วนน้อยที่วิจัยเกี่ยวข้องกับการรวมกันของฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดและการลดลงของฟลักซ์จากการรวมตัวกันของสารดังกล่าว

งานวิจัยนี้จะเน้นการกำจัดสารฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่พบค่อนข้างเยอะในปัจจุบัน ซึ่งปริมาณการปนเปื้อนที่เกิดจากอุตสาหกรรมคิดเป็นร้อยละ 30–50 ส่วนจากบ้านเรือน/กิจกรรมของเสียของมนุษย์ คิดเป็นร้อยละ 50–70 [17] และสารอินทรีย์ธรรมชาติที่สามารถพบได้ตามสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป ซึ่งมีความเข้มข้นในช่วง 10 mg/L

ดังนั้นการศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต และสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเยื่อกรองแบบนาโน ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผลของความเข้มข้นของฟอสเฟต ค่าความแรงประจุของฟอสเฟต

(ในรูปของ Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4) ผลของสารผสมร่วมระหว่างฟอสเฟต (ในรูปของ Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4) กับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ประสิทธิภาพของเยื่อกรองแบบนาโนวัดได้จากการกำจัดของฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ รวมทั้งการลดลงของฟลักซ์ระหว่างการทดสอบ ผลการทดลองจะนำไปวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ รวมถึงการประยุกต์ใช้เยื่อกรองแบบนาโนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น จากการอ้างอิงสถานะจริงที่อาจเป็นไปได้จากการเจือปนของสารต่างๆ ในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไป พร้อมทั้งการประยุกต์หรือใช้เป็นแนวทางในการกำจัดในงานอื่นทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้เช่น สารที่เป็นตัวแทนกลุ่มฟอสเฟตมี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) และ โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 36% (Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd.) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Analytical univar reagent, Ajax Finechem Pty Ltd.) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (Analytical univar reagent, APS Finechem.) กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{H}_2\text{O}$) (Analytical reagent; BDH.)

2.2. การเตรียมสารประกอบฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การเตรียมฟอสเฟตจาก Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 โดยทำการชั่ง Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 เท่ากับ 0.458 g และ 0.439 g ตามลำดับ จากนั้นละลายในน้ำปราศจากประจุและเจือจางให้เป็น 1000 mL ซึ่งสารละลายนี้มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 100 mg/L P.

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ได้จากแหล่งน้ำผิวดินธรรมชาติบริเวณภายในมหาวิทยาลัยโดยมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.45 mg/L ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 254 nm ที่ 0.185 1/cm ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 31.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.04 โดยนำน้ำดังกล่าวมาปริมาตร 1,500 L ทำการแยกสารอินทรีย์คาร์บอนด้วยกระบวนการกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

(Reverse Osmosis Membrane) จนได้สารอินทรีย์คาร์บอนเข้มข้นหรือส่วนที่ไม่ผ่านเยื่อกรองซึ่งเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นปริมาตรเท่ากับ 30 L จากนั้นนำสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวมาใส่ในภาชนะที่ปิดสนิทและแช่ภายใต้อุณหภูมิ 4°C เพื่อเก็บรักษาสภาพสารอินทรีย์คาร์บอนเข้มข้นให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานสำหรับเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างในการทดสอบด้วยเยื่อกรองแบบนาโนในขั้นต่อไป

2.3. การเตรียมเยื่อกรองแบบนาโน

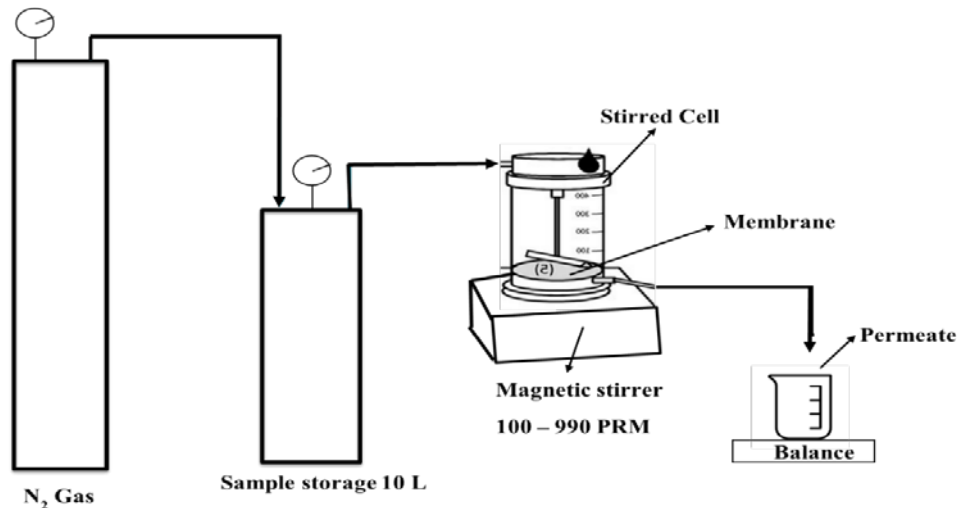
เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane) จากบริษัท GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM ซึ่งเป็นเยื่อกรองเชิงการค้า มีคุณสมบัติคือ เป็นเยื่อกรองแบบ Thin Film Membrane ผลิตจาก Polyamide มีขนาดรูพรุนในช่วง 150–300 Da การกำจัดเกลือ MgSO_4 อยู่ที่ระดับ 98% ที่ 100 psig ช่วงพีเอชดำเนินการในช่วง 3–9 และช่วงพีเอชของการทำความสะอาดอยู่ที่ 2–10.5 มีความทนทานต่อคลอรีน <0.1 ppm ความดันของการดำเนินการอยู่ที่ 70–300 psig และความดันสูงสุดที่ทนได้คือ 600 psig สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วจะถูกเก็บรักษาโดยการนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ความเข้มข้น 1% ที่ความเย็นอุณหภูมิ 4°C เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่จะทำลายพื้นผิวของแผ่นเยื่อกรอง

2.4. ชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน

รูปที่ 1 แสดงการทำงานชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโนโดยการทดสอบเป็นแบบการไหลปิดตายตามแนวตั้ง (Dead-End Operation) เป็นชุดทดสอบที่มีการใช้งานมาก่อนโดย Wu et al. [16] โดยมี Stirred Cell ขนาด 400 mL ที่สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 75 psig ซึ่งภายในบรรจุใบกวนติดตั้งอยู่บนแท่น โดยอาศัยการกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อน (Magnetic stirrer) ที่มีความเร็วรอบ 100–990 rpm แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร ถูกติดตั้งอยู่ใน Stirred Cell ตั้งใต้น้ำตัวอย่างทำจากเหล็กสแตนเลสที่มีขนาด 10 L และมีเกววัดความดันได้ตั้งแต่ 5–100 psig ต่อกลับถังไนโตรเจนที่สามารถสร้างแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 100 psig เพื่อเพิ่มแรงดันให้กับชุดทดสอบการกรอง ขณะที่

ดำเนินระบบแรงดันจะดันน้ำตัวอย่างผ่านชุดการไหลปิดตาย ที่มีแผ่นเยื่อกรองภายใน และเกิดการไหลของน้ำซึมผ่านแผ่นเยื่อกรองจากชุดทดสอบไปยังภาชนะเก็บตัวอย่าง โดยใช้ปั๊ม

เกอร์ขนาด 500 mL ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องชั่ง Metler Teledo รุ่น PB3002-S ในการวัดค่าน้ำหนัก โดยเครื่องชั่งมีความละเอียดสองตำแหน่งหรืออ่านค่าความละเอียดได้ 0.01 g



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน

2.5 ขั้นตอนการทดสอบ

แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนถูกล้างด้วยน้ำกลั่นและทำการติดตั้งกับชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน จากนั้นทำการล้างเยื่อกรองผ่านระบบชุดทดสอบเยื่อกรอง โดยใช้สารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นล้างต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชใกล้เคียงกับน้ำกลั่น หลังจากทำการล้างทำความสะอาดเยื่อกรองตามกระบวนการข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทดสอบการอัดตัวของแผ่นกรองในระบบซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมก่อนการทดลองน้ำตัวอย่างจริง โดยในระหว่างนี้จะวัดค่าอัตราการไหลเทียบกับความดัน เพื่อคำนวณค่าฟลักซ์ตามความดันระดับต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลข้างต้นไปใช้สำหรับวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ก่อนและหลังล้างเยื่อกรองที่ผ่านการกรองจากน้ำตัวอย่างมาแล้ว

น้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกฟีดสู่ระบบและเริ่มต้นการทดลอง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนที่ผ่านเยื่อกรอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดของฟอสเฟตและค่า

การนำไฟฟ้าในทุกๆ 10 นาที จนครบ 60 นาที และทุกๆ 30 นาที จนครบ 240 นาที การวิเคราะห์ค่าการกำจัดฟอสเฟตโดยวัดค่าดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 420 nm และค่าการนำไฟฟ้า สำหรับการคำนวณค่าฟลักซ์สารละลายจากการเก็บปริมาตรตัวอย่างต่อนาทีในส่วนของน้ำที่ไหลผ่านเยื่อกรองหารด้วยพื้นที่การกรอง โดยจะวัดอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างตั้งแต่วันที่ 0 ถึง 240 นาที โดยแบ่งเป็นการเก็บน้ำตัวอย่างทุก 5 นาที จนครบ 60 นาที จากนั้นจะเก็บทุก 10 นาที จนครบ 180 นาที หลังจาก 180 นาทีเป็นต้นไปจะเก็บทุก 20 นาที จนถึง 240 นาที

2.6 สมการที่ใช้ในการศึกษา

ค่าฟลักซ์สารละลาย หรือ Solution Flux; J_v สามารถได้จากอัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง (Q_p) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง (A_m) แสดงในหน่วย LMH ($L/(m^2 \cdot h)$) ซึ่งถูกแสดงดังสมการที่ (1) และค่าการกักกัน (Rejection; R) แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดของฟอสเฟตและค่าการนำไฟฟ้า โดยสมการแสดงได้ดังสมการที่ (2) [18]

ฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux; J_v) แสดงได้ดังนี้

$$J_v = (L_p) \cdot (\Delta P - \sigma \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (1)$$

เมื่อ L_p คือ ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง (ความชันกราฟระหว่างฟลักซ์และความดัน) [$LHM.kPa^{-1}$, $LMH.psig^{-1}$]

ΔP คือ ความดันในการดำเนินระบบ kPa หรือ psig

σ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันออสโมติก (-)

$\Delta \pi$ คือ แรงดันออสโมติก (kPa หรือ psig)

Q_p คือ อัตราการไหลในส่วนของเพอมีเอท (น้ำที่ผ่านเยื่อกรอง) (L/h)

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง (m^2)

ค่าการกักกัน (Rejection; R) แสดงดังสมการที่ (2)

$$\% R = \left(1 - \frac{C_p}{C_r}\right) \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ C_p คือ ความเข้มข้นของน้ำในส่วนเพอมีเอท (mg/L)

C_r คือ ความเข้มข้นในส่วนของน้ำรีเทนเทท (mg/L)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่เก็บตัวอย่างจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี เป็นแหล่งน้ำดิบที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ นำมาผ่านกระบวนการแยกสารอินทรีย์ด้วยเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis System) เพื่อแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติจากแหล่งน้ำดิบทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ตารางที่ 1 แสดงคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำตัวอย่างที่ใช้แยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำตัวอย่างที่ใช้แยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
พีเอช	7.04
สารคาร์บอนทั้งหมด (Total Organic carbon)	4.54 mg.L ⁻¹
ค่าดูดกลืนแสง UV _{254 nm} (UV Absorbance)	0.185 cm ⁻¹
ค่าดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific UVA (UV ₂₅₄ /TOC))	4.07 L.mg ⁻¹ .m ⁻¹
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25 °C	31.9 $\mu S.cm^{-1}$
ความขุ่น (Turbidity)	6.58 NTU
ความกระด้าง (Hardness)	15 mg as CaCO ₃ /L
ความเป็นด่าง (Alkalinity) i.e. HCO ₃ ⁻	8 mg as CaCO ₃ /L

จากตารางที่ 1 พบว่าความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) มีค่าเท่ากับ 4.54 mg.L⁻¹ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถพบได้ตามแหล่งน้ำในธรรมชาติโดยทั่วไป โดยค่าความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดตามแหล่งน้ำนั้นๆ อยู่ในช่วงกว้างประมาณ 1–27 mg.L⁻¹ [19] ค่าดูดกลืนแสงยูวีที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 nm ซึ่งบอกถึงพันธะคู่ของคาร์บอนที่มีอยู่ภายในโครงสร้างของสารอินทรีย์ธรรมชาติ สำหรับค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.185 cm⁻¹ โดยที่ค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับค่าดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific Ultraviolet Absorbance; SUVA) ได้แก่อัตราส่วนระหว่าง

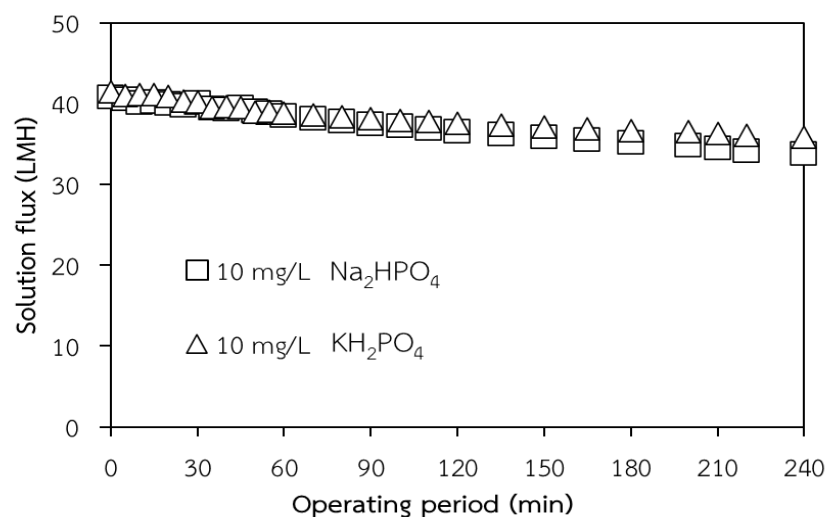
ค่าดูดกลืนแสงต่อปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (UV_{254 nm}/TOC) และค่า SUVA บ่งบอกถึงคุณสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ของน้ำตัวอย่างนั้นๆ โดยที่ค่า SUVA ที่สูงแสดงถึงสภาพแหล่งน้ำธรรมชาตินั้นมีสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) มาก [20] ค่าที่วัดได้จากแหล่งน้ำธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองมีค่า SUVA เท่ากับ 4.07 L.mg⁻¹.m⁻¹ แสดงให้เห็นว่าน้ำตัวอย่างมีปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ค่อนข้างสูง ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างวัดได้เท่ากับ 31.9 $\mu S.cm^{-1}$ แสดงถึงองค์ประกอบของไอออนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำธรรมชาติที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าต่ำ สอดคล้องกับค่า

ความกระด้างที่วัดได้มีค่าน้อย คือ 15 mg as CaCO_3/L และมีค่าความเป็นด่างอยู่ที่ 8 mg as CaCO_3/L และค่าความขุ่นของน้ำที่สามารถวัดได้มีค่า 6.58 NTU ซึ่งน้ำที่ใสจะมีค่าความขุ่นไม่เกิน 25 NTU ส่วนค่าพีเอชของแหล่งน้ำที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 7.04 ซึ่งโดยปกติแล้วในแหล่งน้ำตามธรรมชาติทั่วไป จะพบค่าพีเอชที่เป็นกลางและส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 6.5–8.5

3.2.ผลของไอออนบวก

ไอออนประจุบวกที่พบได้โดยทั่วไปในแหล่งน้ำคือ โซเดียม (Na^+) และ โพแทสเซียม (K^+) ซึ่งจะมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์สำหรับการกรองน้ำด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโน ในรูปที่ 2 แสดงถึงผลของประจุบวกต่างชนิดกันที่รวมตัวกับฟอสเฟตส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ ได้แก่ Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ที่ความเข้มข้น 10 mg/L มีความแรงของประจุอยู่ในช่วง 0.01 M พีเอชเป็น 7.04 เติมน้ำในระบบที่ความดัน 60 psig พบว่าค่าฟลักซ์สารละลายมีแนวโน้มลดลงระหว่างการกรอง อย่างไรก็ตามตลอดการทดลองสารละลายฟอสเฟตจาก Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 มีค่าการลดลงของฟลักซ์ที่แตกต่างกันเล็กน้อย และสาเหตุที่

ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองที่เพิ่มขึ้น โดยอาจเกิดจากการทดลองที่เป็นแบบ Dead-end ซึ่งโดยปกติแล้ว เมื่อดำเนินระบบจนถึงช่วงเวลานึง ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ จึงส่งผลให้ค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งโซเดียมและโพแทสเซียมที่ถูกกักกันโดยเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ความเข้มข้นโซเดียมและโพแทสเซียมถูกสะสมบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ Concentration polarization; CP ซึ่งการสะสมความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เพิ่มความต้านทานของระบบส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ [21] และนอกจากนี้สารที่อยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองส่งผลให้ความต้านทานการไหลเพิ่มและทำให้ค่าแรงดันออสโมติก ($\Delta\pi$) เพิ่มขึ้น แต่ในระบบมีการควบคุมความดันดำเนินระบบ (ΔP) ให้คงที่ตลอดการทดลอง จึงทำให้ค่าของแรงดันที่สามารถเอาชนะแรงดันออสโมติก ($\Delta P - \sigma\Delta\pi$) ที่เกิดจากการสะสมตัวของสารละลายฟอสเฟตมีค่าที่ต่ำลง จึงทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายที่ได้มีค่าลดลงไปด้วย



รูปที่ 2 ผลจากไอออนบวกของสารต่างชนิดกันต่อการลดลงของฟลักซ์ที่ความเข้มข้นฟอสเฟต 10 mg/L ค่าความแรงประจุในช่วง 0.01 M ที่พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

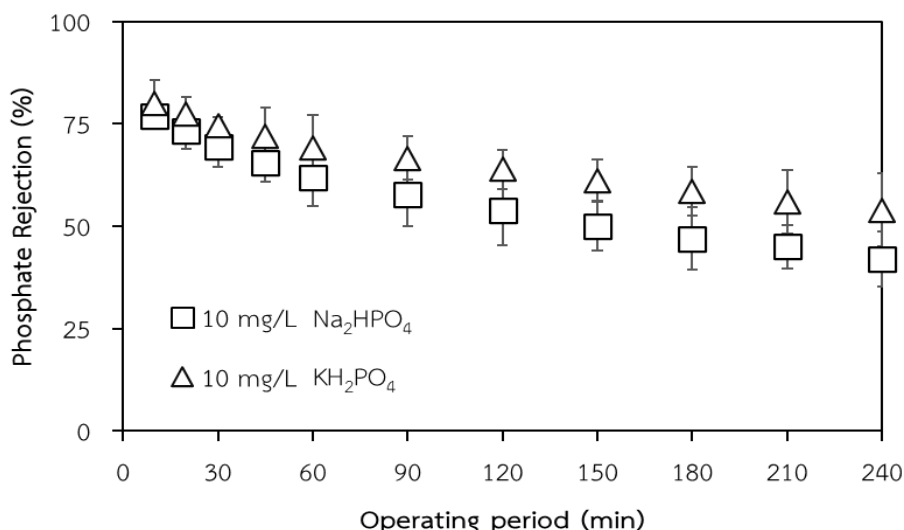
จากรูปที่ 3 แสดงถึงความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของไอออนบวกระหว่างสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 และแสดงค่าการกำจัดฟอสเฟตด้วยค่าดูดกลืนแสง

อัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 420 nm พบว่าค่าการกำจัดของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการกรองที่เพิ่มขึ้น และพบว่าการกำจัดฟอสเฟต

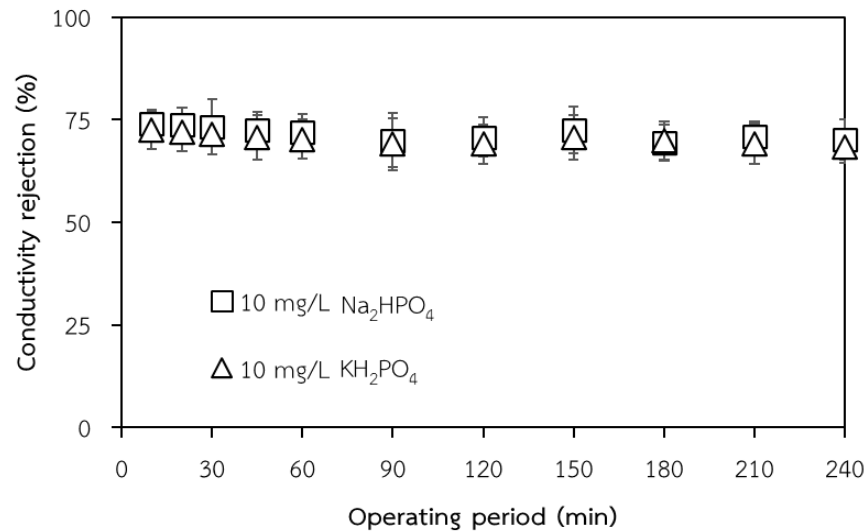
ระหว่างสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ให้ค่าการจัดสูงสุดที่เวลา 10 นาทีแรกของการทดสอบ ซึ่งมีค่าการจัดฟอสเฟตร้อยละ 77.35 ± 3.41 และ 80.77 ± 2.28 ตามลำดับ และที่เวลา 240 นาที พบค่าการจัดฟอสเฟตคงเหลืออยู่ที่ร้อยละ 45.01 ± 3.95 และ 53.77 ± 2.27 ตามลำดับ เนื่องจากผลของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นบนผิวเยื่อกรองทำให้สามารถซึมผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้นและส่งผลให้ค่าการจัดลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการจัดฟอสเฟตของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 พบว่าสารละลาย KH_2PO_4 ให้ค่าการจัดที่สูงกว่า Na_2HPO_4 เพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 10) แนวโน้มที่ทำให้ค่าการจัดต่างกันไม่มากนัก อาจเป็นเพราะโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนเป็นประจุบวกที่มีประจุไอออนเท่ากับบวกหนึ่ง (Monovalent Cation) เหมือนกัน โดยมีการควบคุมค่าความแรงประจุเท่ากัน จากงานวิจัยของ [22] ศึกษาสภาวะที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการจัดฟอสเฟตโดยใช้สารละลาย H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} เยื่อกรองที่ใช้เป็นชนิดนาโนรุ่น NF200 มีรัศมีรูพรุนประมาณ 0.5 นาโนเมตร จากการศึกษาพบว่า เยื่อกรองนาโนมีประสิทธิภาพการจัดฟอสเฟตเท่ากับ 85% และ 96% ของ H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ [23] ได้ศึกษาการใช้เยื่อกรองชนิดนาโนเชิงการค้า ชนิด NF90

และแบบดัดแปลงโดยใช้ Polyelectrolyte เคลือบบนพื้นผิว ในการกักสาร H_2PO_4^- พบว่าเยื่อกรองแบบนาโนที่มีการดัดแปลงมีประสิทธิภาพการจัดสูงถึง 98% ฟลักซ์ของสารละลายเท่ากับ $2.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ที่ความดัน 4.8 bar ในขณะที่เยื่อกรองเชิงการค้า ให้ประสิทธิภาพการจัด 97% ฟลักซ์ของสารละลายเท่ากับ $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ที่ความดัน 4.8 bar

รูปที่ 4 แสดงถึงความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตที่ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และแสดงค่าการจัดสารละลายฟอสเฟตด้วยค่าการนำไฟฟ้าพบว่าที่เวลา 240 นาที มีค่าการจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 70.19 ± 0.78 และ 68.41 ± 1.62 ของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ตามลำดับ ซึ่งการจัดเกิดขึ้นเนื่องจากกลไกการจัดค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดจากแรงผลักทางไฟฟ้าของประจุที่ผิวหน้าเยื่อกรอง (Electrostatic repulsion) ไอออนประจุลบจากฟอสเฟตสามารถกำจัดได้โดยแรงผลักประจุลบจากเยื่อกรองแบบนาโน ส่วนไอออนประจุบวกสามารถถูกกำจัดจากแผ่นกรองโดยการรักษาสสมดุลประจุระหว่างประจุบวกกับประจุบนผิวของเยื่อกรองจึงทำให้สามารถกำจัดไอออนประจุบวกได้ ค่าการจัดการนำไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ไม่ลดลงมากระหว่างการกรองเมื่อเทียบกับค่าการจัดฟอสเฟต



รูปที่ 3 ผลจากไอออนบวกของสารต่างชนิดกันต่อการกำจัดฟอสเฟต โดยพิจารณาจากค่าดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 420 nm โดยมีความเข้มข้นฟอสเฟต 10 mg/L มีความแรงประจุในช่วง 0.01 M พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig



รูปที่ 4 ผลจากไอออนบวกของสารต่างชนิดกันต่อการกำจัดฟอสเฟต โดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นฟอสเฟต 10 mg/L ความแรงประจุในช่วง 0.01 M พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

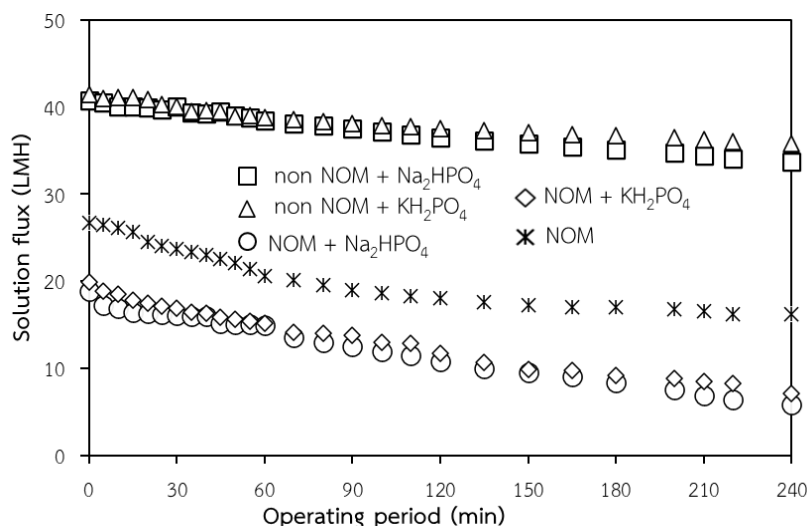
3.3.ผลร่วมของฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

รูปที่ 5 แสดงผลของฟอสเฟตต่างชนิดกันร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ โดยใช้ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 10 mg/L พีเอช อยู่ที่ 7.04 การใช้สารละลายฟอสเฟต Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ปรับให้ได้ค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M การดำเนินระบบภายใต้ความดัน 60 psig จากผลการทดสอบพบว่าค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองที่เพิ่มขึ้น กรณีที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการใช้สารละลายฟอสเฟตต่างชนิดกันพบว่าให้ค่าฟลักซ์สารละลายที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่เวลา 0 ถึง 240 นาที พบว่าสารละลายฟอสเฟตจาก Na_2HPO_4 ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 41.50 LMH และที่เวลา 240 นาที ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเท่ากับ 35.3 LMH ส่วนสารละลายฟอสเฟตจาก KH_2PO_4 ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 40.80 LMH และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 35.54 LMH ส่วนในกรณีที่มิใช่เฉพาะสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 26.75 LMH และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 16.21 LMH และในกรณีที่ผสมรวมของฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติในระบบ พบว่าผลร่วมของสารละลาย Na_2HPO_4 กับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 18.85 LMH

และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 5.85 LMH ในขณะที่ผลร่วมของ KH_2PO_4 กับสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 19.82 LMH และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 7.1 LMH จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงมากกว่าในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ เพราะนอกจากชนิดของสารละลายฟอสเฟตจะมีส่วนทำให้ค่าความดันออสโมติกของระบบสูงขึ้นระหว่างการกรอง และอาจจะมีการอุดตันรูพรุนของเยื่อกรองจากสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำร่วมอยู่ด้วย ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงอย่างมาก โดยสารอินทรีย์ธรรมชาติมีส่วนทำให้เกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์บนผิวหน้าเยื่อกรอง และผลการทดสอบนี้สามารถอธิบายการยึดจับกันระหว่างประจุลบของสารฟอสเฟตกับประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติกับไอออนประจุบวก ซึ่งไอออนบวกนี้สามารถที่จะเกิดเป็นตัวเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติกับเยื่อกรองแบบนาโนที่มีประจุเป็นลบที่เรียกว่ากลไกสะพานเชื่อม (Bridging Effect) โดยเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวหน้าเยื่อกรองน้ำ ทำให้การไหลผ่านเยื่อกรองได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงด้วยเช่นกัน จากงานวิจัยของ [24] ได้ศึกษาการรูปแบบการอุดตันด้วยเยื่อกรองชนิดนาโน ซึ่งศึกษาสาร

หลายชนิด เช่น CaCl_2 , CaCO_3 , CaSO_4 และ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L จากผลการศึกษาการลดลงของฟลักซ์ เมื่อเทียบกับฟลักซ์ตั้งต้น ($1 - J/J_0$) มีค่าประมาณ 33.6%, 40%, 43% และ 51.1%

ของ Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} ตามลำดับ การวิเคราะห์รูปแบบการอุดตันพบว่า CO_3^{2-} , SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} มีการอุดตันเป็นแบบ Pore blocking ส่วน Cl^- มีการอุดตันเป็นแบบ Cake formation



รูปที่ 5 ผลของสารฟอสเฟตต่างชนิดกันร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการลดลงของฟลักซ์ ปรับค่าความแรงประจุด้วยฟอสเฟต เท่ากับ 0.01 M ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 10 mg/L พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psi

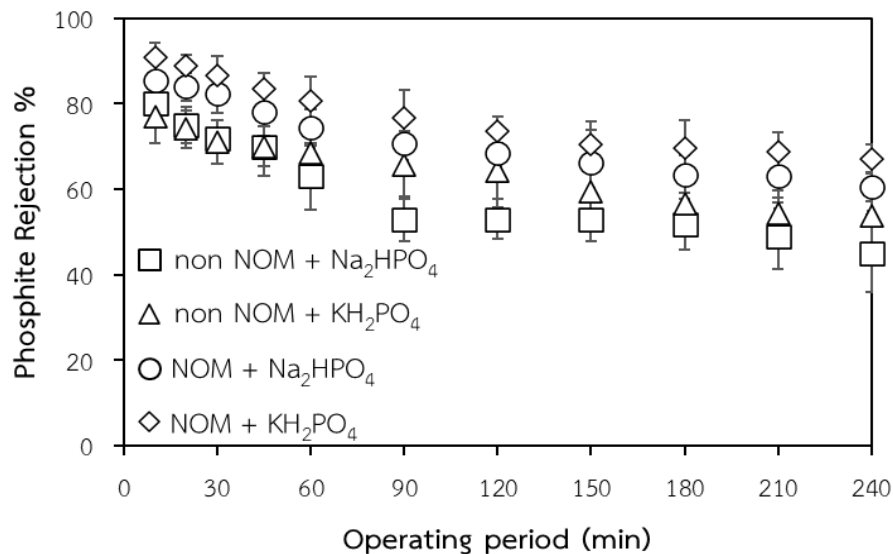
จากรูปที่ 6 แสดงถึงค่าการกำจัดฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยความเข้มข้นของฟอสเฟตถูกปรับด้วย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ผลการทดสอบพบว่าในกรณีที่ไม่มีเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าการกำจัดฟอสเฟตต่ำกว่าในกรณีที่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติในระบบ และเมื่อพิจารณาในกรณีที่ใช้เฉพาะสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ที่เวลา 240 นาที พบค่าการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 45.01 ± 3.97 และ 53.77 ± 3.21 ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่มีการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติพบว่าที่เวลา 240 นาที มีค่าการกำจัดฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60.92 ± 1.08 และ 67.07 ± 1.26 ของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ที่ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ตามลำดับ จากข้อมูลเบื้องต้นนอกจากจะทำให้ทราบเกี่ยวกับชนิดของสารละลายฟอสเฟตมีผลต่างกันเล็กน้อยต่อการกำจัดด้วยเยื่อกรองแบบนาโนแล้ว อาจเกิดการจับกันหรือรวมตัวกันระหว่างสารละลายฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ เนื่องจาก Na^+ และ K^+ มีไอออนประจุเป็นบวก ซึ่งสามารถจับกับ

สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบได้ ด้วยมูลเหตุข้างต้นจึงทำให้มีขนาดของอนุภาคสารใหญ่ขึ้น จนทำให้เยื่อกรองแบบนาโนสามารถกักสารดังกล่าวไว้ได้มากกว่าในกรณีที่ไม่มีเฉพาะสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 นั้นเอง ซึ่งโดยปกติแล้วการกำจัดของเยื่อกรองแบบนาโนเกิดจากกลไกการผลักกันของประจุและหลักการคัดขนาด (Size Exclusion) การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ด้วยเยื่อกรองแบบนาโนจะอาศัยหลักการคัดขนาดมากกว่ากลไกการผลักกันของประจุ (Chang Repulsion) [25] โดยที่ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 6.5–22.6 kDa ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติถูกกักกันโดยเยื่อกรองแบบนาโนได้ [26]

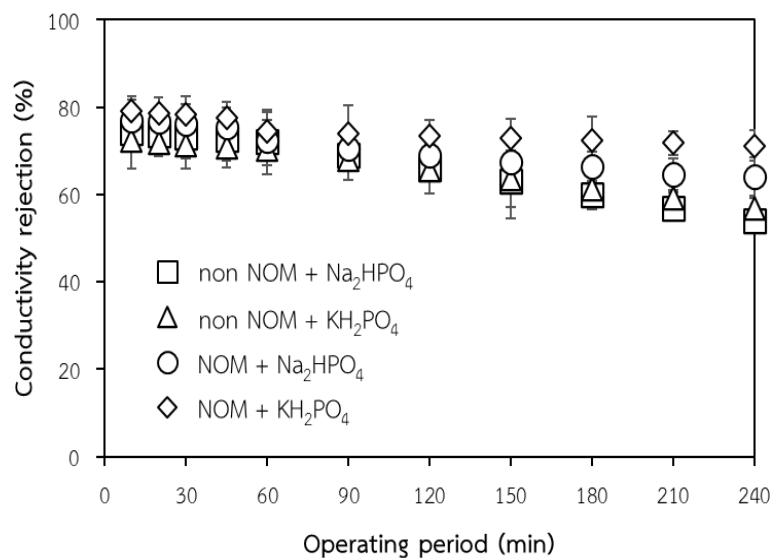
จากรูปที่ 7 แสดงถึงความสามารถในการกำจัด โดยพิจารณาค่าการกำจัดด้วยค่าการนำไฟฟ้า ความแรงประจุด้วยฟอสเฟตเท่ากับ 0.01 M ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L พีเอช อยู่ที่ 7.04 ความดันในระบบ 60

psig ผลการทดสอบพบว่าค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ และในกรณีที่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติพบว่าการใช้สารละลาย Na_2HPO_4 ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าสารละลาย KH_2PO_4 ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยที่เวลา 240 นาที พบค่าการกำจัดร้อยละ 64.08 ± 2.46

และ 73.18 ± 2.17 ตามลำดับ และพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับการกำจัดฟอสเฟต อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของโซเดียมจากสารละลาย Na_2HPO_4 ที่แตกตัวให้ความเข้มข้นของโมลของโซเดียม (Na^+) สามารถจับตัวกับประจุลบกับฟอสเฟตจากการรักษาประจุสมดุลประจุ ส่งผลให้เกิดความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองทำให้สามารถซึมผ่านเยื่อกรองได้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าการกำจัดลดลง



รูปที่ 6 ผลของสารฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการกำจัดฟอสเฟตต่างชนิดกัน โดยพิจารณาจากค่าดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 420 nm ความแรงประจุฟอสเฟตที่ 0.01 M ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L ค่าพีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

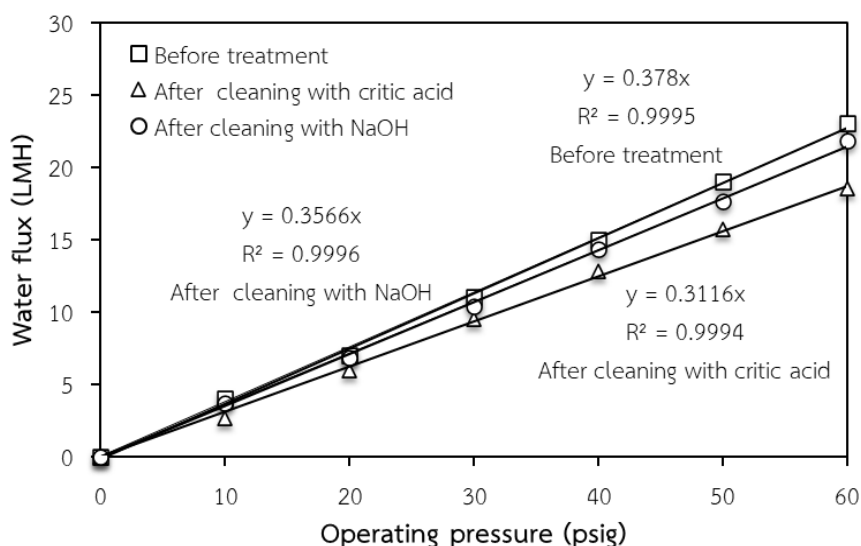


รูปที่ 7 ผลของสารฟอสเฟตต่างชนิดกันร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการกำจัดโดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า ที่ความแรงประจุฟอสเฟต 0.01 M ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10mg/L ค่าพีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

3.4.ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันก่อนและหลังทำความสะอาด

จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบทั้งก่อนและหลังทำความสะอาด โดยที่เยื่อกรองแบบนาโนถูกทดสอบเพื่อหาฟลักซ์ของน้ำ Deionized water (DI) ซึ่งความดันที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 psig สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่นำมาทดสอบเป็นแผ่นที่ใช้ทดสอบในสถานะที่ศึกษาผลการกำจัดฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยใช้สารละลาย Na_2HPO_4 เป็นตัวแทนของสารละลายฟอสเฟต จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มความดันในระบบสูงขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าสูงขึ้นตามความดัน ผลการวิเคราะห์หาค่าการซึมผ่านเยื่อกรองแบบนาโนก่อนการใช้งาน พบว่าค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองเท่ากับ $0.378 \text{ LMH.psigr}^{-1}$ และหลังจากการใช้งานแผ่นเยื่อกรองที่ถูกล้างด้วยกรดซิตริก โดยค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองที่ได้หลังทำความสะอาดด้วยกรดซิตริกมีค่าเท่ากับ $0.312 \text{ LMH.psigr}^{-1}$ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของการซึมผ่านของเยื่อกรองเมื่อเทียบกับค่าการซึมผ่านของแผ่นกรอง

ก่อนใช้งานได้เท่ากับร้อยละ 82.5 หลังจากทำความสะอาดด้วย NaOH มีค่าสัดส่วนการซึมผ่านของเยื่อกรองเพิ่มขึ้นเท่ากับ $0.357 \text{ LMH.psigr}^{-1}$ คิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าการซึมผ่านของแผ่นกรองก่อนใช้งานได้เท่ากับร้อยละ 94.4 จากข้อมูลเบื้องต้นทำให้ทราบถึงการล้างเยื่อกรองด้วยกรดซิตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกู้คืนประสิทธิภาพของเยื่อกรอง เนื่องจากฟลักซ์ที่ได้กลับมาใกล้เคียงกับฟลักซ์ก่อนใช้งาน และแสดงถึงความสามารถในการขจัดสารหรืออนุภาคที่เกาะติดบริเวณพื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโนได้ โดยสามารถนำแผ่นเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาล้างด้วยกรดซิตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วนำกลับมาใช้ในระบบได้เรื่อย ๆ จนกว่าประสิทธิภาพการกรองหรือการซึมผ่านจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากสัดส่วนของการสะสมของสารหรืออนุภาคบางส่วนที่ดูดซับติดผิวและ/หรือในรูของเยื่อกรองทำให้ไม่สามารถล้างออกได้ทั้งหมด การใช้เยื่อกรองแบบนาโนจึงยังสามารถใช้ได้จนกระทั่งไม่สามารถล้างสารหรืออนุภาคที่ติดบนพื้นผิวเยื่อกรองออกได้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบของเยื่อกรองก่อนและหลังทำความสะอาด

4. สรุป

สารละลายฟอสเฟตต่างชนิดกันที่ใช้ทดสอบโดยเยื่อกรองแบบนาโนให้ค่าฟลักซ์สารละลายต่างกันเพียงเล็กน้อย และพบว่าในกรณีที่เป็

ฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์มากกว่าในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ซึ่งการลดลงของฟลักซ์อาจเกิดจากการรวมกันของไอออนประจุบวกกับไอออนประจุลบจากฟอสเฟตและจากสารอินทรีย์

ธรรมชาติทำให้เกิดการสะสมสารอินทรีย์ธรรมชาติบนพื้นผิวของเยื่อกรอง น้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลงส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายที่ได้มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่าการกำจัดฟอสเฟตในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าการกำจัดฟอสเฟตมากกว่าในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยที่สารละลาย Na_2HPO_4 ร่วมกับ NOM และสารละลาย KH_2PO_4 ร่วมกับ NOM ให้ค่าการกำจัดที่เวลา 240 นาที มีค่าการกำจัดร้อยละ 60.92 ± 1.08 และ 67.07 ± 1.26 ตามลำดับ ส่วนการพิจารณาค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้า พบว่าการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติเช่นเดียวกัน โดยพบค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าที่เวลา 240 นาที มีค่าการกำจัดร้อยละ 64.08 ± 2.46 และ 73.18 ± 2.17 ของสารละลาย Na_2HPO_4 ร่วมกับ NOM และสารละลาย KH_2PO_4 ร่วมกับ NOM ตามลำดับ สำหรับการซึมผ่านของเยื่อกรองแบบนาโนก่อนการใช้งาน มีค่าการซึมผ่านเท่ากับ $0.378 \text{ LMH.ps}^{-1}$ และหลังจากการใช้งานแผ่นเยื่อกรองที่ถูกล้างด้วยกรดซิตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ฟลักซ์ที่ได้หลังทำความสะอาดมีค่าการซึมผ่านเท่ากับ $0.312 \text{ LMH.ps}^{-1}$ และ $0.357 \text{ LMH.ps}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองเมื่อเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองก่อนการใช้งานเท่ากับร้อยละ 82.5 และ 94.4 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าสามารถกู้คืนค่าฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกับฟลักซ์ก่อนการใช้งาน สำหรับการนำผลการศึกษาข้างต้นไปใช้งานจริงในด้านการบำบัดหรือกำจัดสารฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองนาโน ผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถนำข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากข้างต้นไปเป็นแนวทางหรือนำไปปรับใช้ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของแหล่งน้ำเสียปนเปื้อนสารต่างๆ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ศึกษาเพื่อพัฒนาเยื่อกรองแบบนาโนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคตต่อไปได้

การทดสอบการกำจัดฟอสเฟตควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ผลความเข้มข้นของเกลือฟอสเฟต ผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ตลอดจนผลการกำจัด

ของสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโนร่วมกับสารละลายฟอสเฟต รวมถึงการศึกษาค่าความต้านทานของเยื่อกรอง ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของเยื่อกรองก่อน-หลัง และวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันบนผิวหน้าเยื่อกรอง เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับอธิบายกลไกการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนในรูปแบบที่แตกต่างกัน และนำไปสู่องค์ความรู้ที่สามารถนำไปขยายผล เพื่อศึกษาและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1.] G. V. Haute, E. Caberlon, E. Squizani, F. C. Mesquita, L. Pedrazza, B. A. Martha and J. R. Oliveira, "Gallic acid reduces the effect of LPS on apoptosis and inhibits the formation of neutrophil extracellular traps," *Toxicology In Vitro*, vol. 30, no. 1, pp. 309–317, 2015, doi: 10.1016/j.tiv.2015.10.005.
- [2.] N. M. Al-Bastaki, "Performance of advanced methods for treatment of wastewater: UV/TiO₂, RO and UF," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 43, no. 7, pp. 935–940, 2004, doi: 10.1016/j.cep.2003.08.003.
- [3.] K. Y. Koh, S. Zhang, and J. P. Chen, "Improvement of ultrafiltration for treatment of phosphorus-containing water by a lanthanum-modified aminated polyacrylonitrile membrane," *ACS omega*, vol. 5, no. 13, pp. 7170–7181, 2020, doi: 10.1021/acsomega.9b03573.
- [4.] K. Parameshwaran and C. Visvanathan, "Recent developments in membrane technology for wastewater reuse," in *2nd International Conference on Advanced Wastewater Treatment recycling and Reuse*, Milan, Italy, Sep. 14–16, 1998, pp. 312–322.

- [5.] H. Huang, J. Liu, P. Zhang, D. Zhang and F. Gao, "Investigation on the simultaneous removal of fluoride, ammonia nitrogen and phosphate from semiconductor wastewater using chemical precipitation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 307, pp. 696–706, 2017, doi: 10.1016/j.cej.2016.08.134.
- [6.] V. Uyak, I. Koyuncu, I. Oktem, M. Cakmakci and I. Toroz, "Removal of trihalomethanes from drinking water by nanofiltration membranes." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, no. 2, pp.789–794, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.082.
- [7.] T. Moritz, S. Benfer, P. Arki and G. Tomandl, "Influence of the surface charge on the permeate flux in the dead-end filtration with ceramic membranes," *Separation and Purification Technology*, vol. 25, no. 1–3, pp. 501–508, 2001, doi: 10.1016/S1383-5866(01)00080-6.
- [8.] B. Van der Bruggen, and C. Vandecasteele, "Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry," *Environmental pollution*, vol. 122, no. 3, pp. 435–445, 2003, doi: 10.1016/S0269-7491(02)00308-1.
- [9.] C. A., Erickson and R. Perris, "The role of cell-cell and cell-matrix interactions in the morphogenesis of the neural crest," *Developmental Biology*, vol. 159, no. 1, pp. 60–74, 1993, doi: 10.1006/dbio.1993.1221.
- [10.] C. Pelekani, G. Newcombe, V. L. Snoeyink, C. Hepplewhite, S. Assemi and R. Beckett, "Characterization of natural organic matter using high performance size exclusion chromatography," *Environmental Science & Technology*, vol. 33, no. 16, pp. 2807–2813, 1999, doi: 10.1021/es9901314.
- [11.] M. S. Islam, R. Sadiq, M. J. Rodriguez, H. Najjaran, A. Francisque and M. Hoorfar, "Evaluating water quality failure potential in water distribution systems: a fuzzy-TOPSIS-OWA-based methodology," *Water Resources Management*, vol. 27, pp. 2195–2216, 2013, doi: 10.1007/s11269-013-0283-6.
- [12.] S. Crittenden, R. Reifemberger, J. Hillebrecht, R. Birge, D. Inerowicz and F. Regnier, "Soft lithography based micron-scale electrophoretic patterning of purple membrane," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1494–1497, 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/8/016.
- [13.] J. S. Vrouwenvelder, J. W. Kappelhof, S. G. Heijman, J. C. Schippers and D. Van der Kooij, "Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water," *Desalination*, vol. 157, no. 1–3, pp. 361–365, 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)00417-X.
- [14.] B. M. Watson and C. D. Hornburg, "Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies," *Desalination*, vol. 72, no. 1–2, pp. 11–22, 1989, doi: 10.1016/0011-9164(89)80024-4.
- [15.] I. C. Escobar and A. A. Randall, "Influence of NF on distribution system biostability," *Journal-American Water Works Association*, vol. 91, no. 6, pp. 76–89, 1999, doi: 10.1002/j.1551-8833.1999.tb08650.x.
- [16.] S. J. Duranceau, J. S. Taylor and L. A. Mulford, "SOC removal in a membrane softening process," *Journal-American Water Works Association*, vol. 84, no. 1, pp. 68–78, 1992, doi: 10.1002/j.1551-8833.1992.tb07287.x.
- [17.] R. Pritish Kumar, "Nanofiltration as a tertiary treatment for phosphate removal from wastewater," M.Eng. Thesis, Dept. Energy, Environment, and Climate Change, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1995.
- [18.] P. Wu and M. Imai, "Novel biopolymer composite membrane involved with selective mass transfer and excellent water permeability," in *Advancing Desalination*, London, UK: IntechOpen Limited, 2012, ch. 3, pp. 57–81.

- [19.]J. E. Kilduff, S. Mattaraj and G.Belfort, "Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: effects of osmotic pressure membrane permeability and cake formation," *Journal of membrane science*, vol. 239, no. 1, pp.39–53, 2004, doi: 10.1016/j.memsci.2003.12.030.
- [20.]T. Tseng and M. Edwards, "Predicting full-scale TOC removal," *Journal-American Water Works Association*, vol. 91, no. 4, pp. 159–170, 1999, doi: 10.1002/j.1551-8833.1999.tb08622.x.
- [21.]J. E. Kilduff, S. Mattaraj, J. Sensibaugh, J. P. Pieracci, Y. Yuan and G. Belfort, "Modeling flux decline during nanofiltration of NOM with poly (arylsulfone) membranes modified using UV-assisted graft polymerization," *Environmental engineering science*, vol. 19, no. 6, pp. 477–495, 2002, doi: 10.1089/109287502320963454.
- [22.]G. T. Ballet, A. Hafiane, and M. Dhahbi, "Influence of operating conditions on the retention of phosphate in water by nanofiltration," *Journal of membrane science*, vol. 290, no.1–2, pp. 164–172, 2007, doi: 10.1016/j.memsci.2006.12.046.
- [23.]S. U. Hong, L. Ouyang and M. L. Bruening, "Recovery of phosphate using multilayer polyelectrolyte nanofiltration membranes," *Journal of Membrane Science*, vol.327, no. 1–2, pp. 2–5, 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2008.11.035.
- [24.]C. Jarusutthirak, S. Mattaraj and R. Jiratananon. "Influence of inorganic scalants and natural organic matter on nanofiltration membrane fouling," *Journal of Membrane Science*, vol. 287, no. 1, pp. 138–145, 2007, doi: 10.1016/j.memsci.2006.10.034.
- [25.]L. Joseph, J.R. Flora, Y.G. Park, M. Badawy, H. Saleh and Y. Yoon, "Removal of natural organic matter from potential drinking water sources by combined coagulation and adsorption using carbon nanomaterials," *Separation and purification technology*, vol.91, pp. 64–72, 2012, doi: 10.1016/j.seppur.2012.04.033.
- [26.]S. Mattaraj, and J. E. Kilduff, "Using reverse osmosis to remove natural organic matter from power plant makeup water," *Power plant Chemistry*, vol. 5, no. 1, pp. 31–35, 2003.

การเลือกตัวทำละลายสำหรับการสกัดไมทราไจนีน โดยใช้พารามิเตอร์การละลาย ของแฮนเซน

Solvent Selection for Mitragynine Extraction by Hansen Solubility Parameter

สิริวิชญ์ ดิษฐาพรเศรษฐ์, ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์ และ สุรัตน์ อารีรัตน์*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Sirawich Ditthapornset, Nuttapol Lerkkasemsan and Surat Areerat*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Lat Krabang, Lat Krabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: surat.ar@kmitl.ac.th

Received: Aug 10, 2022; Revised: Oct 28, 2022; Accepted: Nov 14, 2022

บทคัดย่อ

พืชกระท่อม (Kratom) หรือ *Mitragyna Speciosa* (Korth.) Havil. มีสรรพคุณทางยามากมาย ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงตัวทำละลายที่สามารถใช้ในการสกัดสารไมทราไจนีนจากใบกระท่อมได้ดี โดยใช้ค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน เพื่อทำนายความสามารถในการละลาย โดยใช้โปรแกรม ProCAPE ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์การละลาย แต่เนื่องจากไมทราไจนีนนั้นไม่สามารถหาค่าการละลายได้โดยตรง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการหาค่าการละลายจากสารอนุพันธ์ของไมทราไจนีนแทน โดยแสดงค่าการละลายของสารอนุพันธ์และตัวทำละลายบนกราฟการละลายสามองค์ประกอบ ตัวทำละลายที่เลือกมาถูกคำนึงถึงความปลอดภัยจาก GSK's Solvent Selection Guide จากผลการพล็อตกราฟสรุปได้ว่า ยังมีตัวทำละลายอีกหลายชนิดที่สามารถละลายไมทราไจนีนได้ดีกว่าตัวทำละลายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และเมื่อใช้โปรแกรม ProCAPE ทำนายค่าการละลายของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัด พบว่ากราฟที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยที่ได้ทำการรวบรวมมา

คำสำคัญ: กระท่อม, ไมทราไจนีน, ค่าพารามิเตอร์การละลาย, ProCAPE, GSK's Solvent Selection Guide

Abstract

Mitragyna speciosa (Korth.) Havil., commonly known as "Kratom" has a wide range of therapeutic benefits. In this research study the solvents that can be used to extract Mitragynine from kratom leaves. To predict solubility parameters, Hansen solubility parameters were employed. Then analyzing the solubility parameters using the ProCAPE application However, Mitragynine cannot directly determine the solubility. Instead, a method for evaluating the solubility from derivatives of Mitragynine was used in this study. A ternary graph shows the solubility of the derivatives and solvents. The solvents selected were considered for safety from the GSK's Solvent Selection Guide. From the results, it was found that several types of solvents which that were dissolved derivatives of Mitragynine better than conventional solvents. Additionally, while using ProCAPE, the solubility parameters were predicted from extraction-related research was applied, and the results were shown as ternary graphs. The graphs were confirmed to be in accordance with the experimental data from the research that was collected.

Keywords: Kratom, Mitragynine, Solubility Parameter, ProCAPE, GSK's Solvent Selection Guide

1. บทนำ

ในอดีตพืชกระท่อม (Kratom) ในประเทศไทยถือเป็นสิ่งผิดกฎหมายตามพระราชบัญญัติยาเสพติด แต่ในปัจจุบันกระท่อมได้รับการยกเลิกจากการเป็นยาเสพติดให้โทษในประเภท 5 ซึ่งมีผลใช้บังคับตั้งแต่วันที่ 24 สิงหาคม 2564 การใช้กระท่อมทำให้ผู้เสพไม่เหน็ดเหนื่อย ทนแดด ทนร้อน สามารถใช้แรงงานได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อเสพเป็นระยะเวลานานอาจส่งผลให้เกิดอาการเบื่ออาหาร น้ำหนักลด ท้องผูก ผิดคำเกรียม เป็นต้น นอกจากกระท่อมออกฤทธิ์เป็นยาเสพติดแล้ว จากหลักฐานพบว่ากระท่อมถูกใช้เป็นสมุนไพรตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 19[1] ทางเภสัชวิทยาใช้กระท่อมในการรักษาโรคต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นยาแก้โรคบิด ปวดท้อง ท้องร่วง ถ่ายเป็นเลือด และปวดมวนท้อง ตลอดจนใช้กระท่อมเพื่อทดแทนฝิ่น เป็นต้น สารประกอบสำคัญที่อยู่ในใบกระท่อม คือไมทราไจนีน (Mitragynine) และ 7-Hydroxy (7-OH) Mitragynine ซึ่งเป็นสารกลุ่มอัลคาลอยด์ (Alkaloid) ออกฤทธิ์กดประสาทส่วนกลาง (CNS Depressant) เช่นเดียวกับโคเคนจากงานวิจัยเมื่ออาสาสมัครกลุ่มตัวอย่างได้รับ Mitragynine Acetate มากเกินกว่า 50 mg พบว่าทำให้เกิดผลเสีย เช่น อาเจียนและคลื่นไส้ เป็นต้น[2] ในปัจจุบันมีการสกัดสารประเภทอัลคาลอยด์จากใบกระท่อมหลากหลายวิธี โดยทั่วไปนิยมใช้น้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัด[3] และยังมีการพัฒนาต่อยอดการสกัดด้วยตัวทำละลายร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ยิ่งยวด ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการสกัดที่สูงมากขึ้น[4] แต่ถึงแม้การสกัดด้วยวิธีดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพที่ดี แต่ด้วยราคาอุปกรณ์ที่ยังสูงอยู่ และเทคนิคนี้มีความยุ่งยาก รวมไปถึงต้องการผู้ที่ชำนาญการในการดำเนินงาน จึงยังไม่เหมาะสำหรับที่จะนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการพัฒนาการสกัดด้วยตัวทำละลาย เพื่อตอบโจทย์สำหรับระดับอุตสาหกรรมมากที่สุด

การสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นเทคนิคที่นิยมใช้สกัดได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งถูกใช้ในอุตสาหกรรม

ขนาดใหญ่ เช่น การบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมเคมีเพื่อสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมยา เป็นต้น[5] เนื่องจากการสกัดด้วยตัวทำละลายส่วนใหญ่ทำที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก จึงทำให้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายนี้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ รวมทั้งยังรักษาคุณสมบัติของตัวทำละลายที่ถูกสกัด เนื่องจากไม่ได้ใช้อุณหภูมิสูง[6] โดยทั่วไปหลักการเลือกตัวทำละลายนั้น นิยมเลือกจากความเหมือนกันของสภาพขั้วระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายหรือที่เรียกว่า Like Dissolve Like [7] กล่าวคือ หากสภาพขั้วของตัวทำละลายและตัวถูกละลายเหมือนกันจะสามารถละลายกันได้ดี สามารถนำไปออกแบบการทดลองและหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว หรือ Distribution Coefficient (K_d) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความเข้มข้นตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในวัฏภาคอินทรีย์และความเข้มข้นที่ละลายอยู่ในน้ำ[8] แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ทรัพยากร ตัวทำละลาย และเวลาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากต้องออกแบบการทดลองเพื่อเลือกตัวทำละลายที่มีขั้วหรือไม่ขั้วเป็นจำนวนมากแล้วจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวทำละลายตัวใดที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการสกัดได้ดีที่สุด

หนึ่งในคุณสมบัติของสารอินทรีย์ที่ใช้แสดงความสามารถในการละลาย คือพารามิเตอร์การละลาย (Solubility Parameter) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารเพื่อช่วยในการเลือกตัวทำละลายได้อย่างเหมาะสมโดยสารอินทรีย์ที่มีค่าพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกันจะสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ดี[9] ปัจจุบันค่าพารามิเตอร์การละลายมีใช้กันอยู่หลายชนิด โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน (Hansen Solubility Parameter) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์การละลายที่ถูกวิจัยต่อยอดมาจากค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิล-เดอบรัน (Hildebrand Solubility Parameter) เพื่อช่วยในการทำนายค่าการละลายที่เหมาะสม และช่วยในการลดจำนวนชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองลดค่าใช้จ่าย และลด

เวลาในการทดลอง นับเป็นการพัฒนาการหาตัวทำละลายใหม่ ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือการศึกษาเทคนิคการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ค่าพารามิเตอร์การละลาย โดยศึกษาการใช้งานซอฟต์แวร์ ProCAPE และ โมเดล ในการทำนายค่าพารามิเตอร์การละลาย ซึ่งมีขอบเขตการวิจัย คือการหาช่วงการละลายของไมทราไจนิน โดยใช้ค่าพารามิเตอร์การละลายของแชนเซนที่อุณหภูมิคงที่ โดยเลือกใช้ตัวทำละลายที่แนะนำใน GSK's Solvent Selection Guide

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระท่อม

พืชกระท่อม (Kratom) อยู่วงศ์ *Rubiaceae* ซึ่งอยู่วงศ์เดียวกับกาแฟ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Mitragyna Speciosa* (Korth.) Havil. มีชื่อเรียกได้หลากหลาย เช่น ในภาคกลางเรียกอีต้าง ภาคใต้เรียกท่อม เป็นต้น โดยทั่วไปลำต้นมีความสูง 4–9 m กว้างประมาณ 5 m เมื่อรวมความสูงของกิ่งก้านอาจสูงได้ถึง 15–30 m ใบคล้ายกระดังงา ชนิดก้านใบมีทั้งสีเขียวและสีแดง ใบมีความยาวได้ถึง 17 cm กว้าง 10 cm[10] พบมากในบริเวณป่าดิบชื้น เช่น ทางตอนเหนือของมาเลเซียและทางตอนใต้ของประเทศไทย[11] องค์ประกอบทางเคมีของพืชกระท่อม ประกอบไปด้วยสารประกอบหลายประเภท เช่น Alkaloids, Flavonoids, Phenolic Compounds, Lignans, Triterpenes เป็นต้น ในพืชกระท่อมไทยพบสารประกอบที่สำคัญ คือไมทราไจนิน มากถึง 66% ในขณะที่พืชกระท่อมมาเลเซียพบไมทราไจนินเพียง 12%[12]

กระท่อมมีความสามารถระงับอาการปวดได้ดีกว่ามอร์ฟีน[13] แต่มีความเสพติดน้อยกว่าและถอนยาได้ง่ายกว่ามอร์ฟีน[14] จากการศึกษาความเป็นพิษของสารสกัดในพืชกระท่อม พบว่าค่า LD₅₀ (50% Lethal Dose หมายถึง ปริมาณของสารเคมีที่ให้กับสัตว์ทดลองเพียงครั้งเดียวแต่ทำให้สัตว์ทดลองจำนวนครึ่งหนึ่งตายลง) ของอัลคาลอยด์เมื่อทดลองกับสัตว์มีค่าเท่ากับ 173.20–591 mg/kg ส่วนไมทราไจนินมีค่า LD₅₀ อยู่ที่ 477 mg/kg[15],[16]

2.2 ไมทราไจนิน

ไมทราไจนิน เป็นสารออกฤทธิ์หลักที่พบมากที่สุด คือ 66% ของอัลคาลอยด์ทั้งหมด ในกระท่อมประกอบไปด้วยอัลคาลอยด์ในปริมาณ 0.5–1.5% ของน้ำหนัก[17] มีชื่อทางเคมีว่า 9-Methoxy-Corynantheidine มีสูตรทางเคมีว่า C₂₃H₃₀N₂O₄ โดยมีมวลโมเลกุล 398.5 g/mol จุดเดือด 235°C ที่ 5 mmHg จุดหลอมเหลว 104°C [18] มี SMILES (Simplified Molecular Input Line Entry System) คือ CCC1CN2CCC3=C(C2CC1C(=COC)C(=O)OC)NC4=C3C(=CC=C4)OC[19] มีการเรียงตัวแบบอสัณฐาน มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 250 nm[1],[12]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพืชกระท่อม สารไมทราไจนิน และการสกัด

ในปี ค.ศ. 1907 Hooper และคณะ ได้แยกสารไมทรา-ไจนินให้บริสุทธิ์เป็นครั้งแรก[20] ในปี ค.ศ. 1921 Field และคณะ ได้ทำการสกัดและรายงานสารใหม่ 2 ชนิด คือไมทราไจนิน ได้จาก *M. Speciosa* และ *Mitraversine* ได้จาก *M. Parvifolia* ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารประเภทอัลคาลอยด์ได้จากพืชกระท่อม[21] ในปี ค.ศ. 1963 Joshi และคณะ ได้ทำการศึกษาสูตรโครงสร้างของไมทราไจนิน ว่ามีลักษณะเป็นวงเปิด และคาร์บอนตำแหน่งที่ 19 มี Methoxy จับอยู่ ทำให้สรุปได้ว่าไมทราไจนินอยู่ในกลุ่ม Indole Alkaloid [22] ในปี ค.ศ. 1964 Zacharias และคณะ สามารถหาโครงสร้างของไมทราไจนินที่สมบูรณ์ได้สำเร็จ[23] ในปี ค.ศ. 1989 Shellard ได้วิเคราะห์หาสารประกอบอัลคาลอยด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในพืชกระท่อม[24] ในปี ค.ศ. 1991 Houghton และคณะ ได้ทำการสกัดใบกระท่อมด้วยวิธีการหมักกับ MeOH เป็นเวลา 3 วัน ในขั้นตอนการกรองเดิม 10% Acetic Acid ทำให้สารละลายแยกชั้น ในชั้นของน้ำทำให้เป็นด่างโดยเติม Sodium Carbonate และสกัดด้วย Chloroform มีผลได้การสกัดอยู่ที่ 30 mg/g[25] ในปี ค.ศ. 2004 Takayama ได้ระบุว่ากระท่อมในประเทศไทยมีไมทราไจนินคิดเป็น 66% ของอัลคาลอยด์ทั้งหมดและกระท่อมในมาเลเซียมีเพียง 12% [26] ในปี ค.ศ. 2010 Harizal และคณะ ได้ทำการสกัดใบกระท่อมด้วยวิธีซอกซ์เลต (Soxhlet Extraction) กับ MeOH เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60°C มีผลได้การสกัดอยู่ที่ 16 mg/g [27] ในปี ค.ศ. 2010 Sabetghadam และคณะ

ได้ทำการสกัดใบกระเทียมด้วยวิธีการหมักกับ MeOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการการสกัดแบบซอกซ์เลต เข้าม่าช่วย มีผลได้การสกัดอยู่ที่ 8–10 %w/w [28] ในปี ค.ศ. 2012 Shamima และคณะ ได้ทำการสกัดใบกระเทียมด้วยวิธีการหมักโดยใช้ MeOH เป็นเวลา 5 วัน และเติม 5% Sulfuric Acid จากนั้นผสม Sodium Carbonate และปั่นจนจนกระทั่งได้สีเทาเขียวที่มีค่า pH 11 จากนั้นเติม CHCl_3 เป็นชั้นที่ 3 โดยชั้นของ CHCl_3 ถูกกำจัดโดยสารผสม และเติม Anhydrous Sodium Sulphate เมื่อแห้งแล้ว มีผลได้การสกัดอยู่ที่ 0.087 mg/g[29] ในปี ค.ศ. 2012 Laura และคณะ ได้ทำการสกัดไมทราไจนิจากใบกระเทียมของอินโดนีเซีย โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ และ Solid-Phase Extraction พบว่าได้แอลคาลอยด์สูงกว่าวิธีดั้งเดิม[30] ในปี ค.ศ. 2012 Jaime Lara และคณะ ได้ใช้ค่าการละลายของ แสเซนในการคำนวณค่าการละลายของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เพื่อทำนายและทดสอบการบวมในถุงมือยาง[31] ในปี ค.ศ. 2013 Parthasarathy และคณะ ได้ทำการสกัดใบกระเทียมด้วยวิธีการหมัก โดยใช้ น้ำ และ Solid-Solvent ผสมกันในอัตราส่วน 5:8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีผลได้ อยู่ที่ 0.80 mg/g และยังได้ทดลองผสม MeOH และ Solid-Solvent ในอัตราส่วน 1:5 และหมักเป็นเวลา 10 วัน โดยมีผลได้ อยู่ที่ 4.77 mg/g และได้ทำการสกัดด้วย MeOH จากนั้นทำให้บริสุทธิ์ด้วย 90% Acetic Acid ในน้ำ โดยมีอัตราส่วน 1:35 แล้วแยกส่วนด้วยน้ำ และ Petroleum Ether ในส่วนของชั้นน้ำแยกด้วย Na_2CO_3 ที่ pH 9 และสกัดด้วย CHCl_3 สารที่สกัดได้ ถูกแบ่งด้วยน้ำ เพื่อกำจัดส่วนเกิน และเติม Anhydrous Na_2SO_4 ก่อนที่จะระเหยตัวทำละลาย [32] ในปี ค.ศ. 2014 Amita ได้รวบรวมวิธีในการสกัดสารจากสมุนไพรเพื่อทำนาย ได้ระบุว่า Ether มีความเหมาะสมในการสกัดสารประเภทแอลคาลอยด์ได้ดีที่สุด[33] ในปี ค.ศ. 2018 Boffa และคณะ ได้ทำการสกัด *M. Speciosa* ในแต่ละประเภทได้แก่ Red Malay *M. Speciosa*, Red Bali *M. Speciosa*, Red Thai *M. Speciosa*, White Borneo *M. Speciosa*, Green Malay *M. Speciosa* โดยใช้ MeOH และ น้ำ ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีผลได้ อยู่ที่ 5.81, 9.84, 8.76, 12.2 และ 9.86 mg/g ตามลำดับ[34] ในปี ค.ศ. 2019 Sharma และคณะ ได้

ทำการสกัดใบกระเทียมด้วยวิธีการหมักกับ 95% EtOH เป็นเวลา 3 วัน โดยทำซ้ำ 3 รอบ มีผลได้การสกัดอยู่ที่ 6.24 %w/w[35] ในปี ค.ศ. 2020 Mustafa และคณะ ได้ทำการสกัดใบกระเทียมด้วยวิธีการหมักกับ n-Hexane, Chloroform และ MeOH มีผลได้ อยู่ที่ 75 mg/g[36] ในปี ค.ศ. 2020 Flores-Bocanegra และคณะ ได้ทำการสกัดใบกระเทียมด้วยวิธีการหมักเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง กับ CHCl_3 และ MeOH ในปริมาตร 1000 ml โดยเติม 10% KOH ที่ละลายในน้ำในปริมาณ 500 ml จากนั้นเติม 1 M HCl และ Hexane ในอัตราส่วน 1:1 ลงใน Dry Extract ทำให้ Hexane ถูกกำจัด และเติม NH_4OH จนกระทั่งได้ pH 9 จากนั้นสกัดด้วย CHCl_3 มีผลได้ อยู่ที่ 37.5 mg/g[37]

2.4 ค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเดอบราน

ค่าพารามิเตอร์การละลายถือเป็นแนวคิดที่สำคัญสามารถใช้ได้จริงเพื่อเป็นการเลือกตัวทำละลายได้อย่างเหมาะสม และมีการใช้อย่างแพร่หลาย ในปี ค.ศ. 1963 Hildebrand ได้เสนอค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเดอบราน (δ) [38] ซึ่งมีความสามารถในการทำนายค่าการละลายพื้นฐานของสารกลุ่มพอลิเมอร์ในสารละลายได้ โดยค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเดอบรานมีค่าเท่ากับ ค่าของรากที่สองของพลังงานยึดเหนี่ยวหนาแน่น หรือ Cohesive Energy Density (E_{coh}) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Interactions) ในของแข็งหรือของเหลวบริสุทธิ์[39] ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นกุญแจสำคัญ เพื่อใช้ในการเลือกตัวทำละลายที่ใช้ในการแยกสาร[40] ดังสมการที่ (1)–(2)

$$\delta = \sqrt{c} = \sqrt{\frac{E_{\text{coh}}}{V_m}} \quad (1)$$

โดย

$$E_{\text{coh}} = \Delta H_{v,298} - RT \quad (2)$$

เมื่อ $\Delta H_{v,298}$ คือค่าเอนทาลปีของการระเหย (ที่อุณหภูมิ 298 K) V_m คือปริมาตรต่อโมล หรือ Molar Volume ที่อุณหภูมิใด ๆ (cm^3/mol) R คือค่าคงที่ของแก๊ส T คือค่า

อุณหภูมิสมบูรณ์ (K) ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเดอบรอนที่อุณหภูมิใด ๆ มีค่าคงสมการที่ (3)

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta H_v - RT}{V_m}} \quad (3)$$

ความหนาแน่นของพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Cohesive Energy Density, E_{coh}) คือปริมาณของพลังงานที่ต้องการแยกโมเลกุลในหนึ่งหน่วยปริมาตรกับโมเลกุลใกล้เคียงที่จับตัวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความร้อนของการกลายเป็นไอของสารประกอบหารด้วยปริมาตรต่อ โมล (Molar Volume) ในสถานะควบแน่น (Condensed Phase) เพื่อให้เกิดการละลาย

ค่าการละลายของฮิลเดอบรอนเป็นที่แพร่หลายและง่ายต่อการทำนายสมมูลของเฟส เนื่องจากสารส่วนใหญ่มีพื้นฐานการทำนายแบบตัวแปรเดียวแสดงดังตารางที่ 1 [41] ซึ่งเหมาะกับสารที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วเล็กน้อยและไม่มีพันธะไฮโดรเจน เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้ของค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเดอบรอนนั้น ไม่คำนึงถึงแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นหากต้องการความซับซ้อนในการคำนวณมากกว่านี้ เช่น เป็นสารประกอบที่มีขั้วหรือมีพันธะไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ค่าพารามิเตอร์การละลายแฮนเซนนั้นมีความเหมาะสมในการทำนายมากกว่า ซึ่งจะกล่าวในลำดับถัดไป

หน่วยโดยทั่วไปของค่าการละลายนั้น คือ (Calories per cm^3)^{1/2} หรือ $\text{cal}^{1/2} \text{cm}^{-3/2}$ หากเป็น SI Units คือ $\text{J}^{1/2} \text{m}^{-3/2}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\text{Pa}^{0.5}$ เมื่อ 1 Calorie มีค่าเท่ากับ 4.184 J. จะได้ว่า $1 \text{ cal}^{1/2} \text{cm}^{-3/2} = (4.184 \text{ J})^{1/2} (0.01 \text{ m})^{-3/2} = 2.045 \times 10^3 \text{ J}^{1/2} \text{m}^{-3/2} = 2.045 \text{ MPa}^{1/2}$ ดังนั้นจึงนิยมใช้หน่วยค่าการละลาย (δ) คือ $\text{MPa}^{1/2}$ เป็นหลัก

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเดอบรอน

Material	δ ($\text{MPa}^{1/2}$)
Acetone	20.3
Chloroform	19.0
Cyclohexane	16.8
Dichloromethane	19.8

2.5 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน (Hansen Solubility Parameter) [42],[43]

ในปี ค.ศ. 1967 Charles M. Hansen ได้พัฒนาค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนในงานวิจัยระดับปริญญาเอก ซึ่งเป็นการต่อยอดมาจากค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเดอบรอน ในงานวิจัยดังกล่าวมีการเสนอการหาค่าพารามิเตอร์การละลายแบบ 3 มิติ ซึ่งหมายถึงแรงระหว่างโมเลกุลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ค่าการละลายของแรงลอนดอน (δ_d) ซึ่งจะคิดจากแรงลอนดอน หรือ Dispersion Force ซึ่งเป็นแรงภายในโมเลกุลที่พบได้ทั่วไปของสารที่ไม่มีขั้ว หรือโมเลกุลที่อยู่ในรูปทรงสมมาตร มีความแข็งแรงต่ำ ค่าการละลายต่อมา คือค่าการละลายของแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (δ_p) หรือ Dipolar Intermolecular Force เป็นพลังงานที่คิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่อยู่ภายในโมเลกุลกระทำกัน ทำให้รูปทรงของโมเลกุลนั้นไม่สมมาตร และสุดท้ายคือค่าการละลายของพันธะไฮโดรเจน (δ_{hb}) หรือ The Energy From Hydrogen Bond เป็นพลังงานของสารที่มีหมู่ฟังก์ชันซึ่งสามารถให้และรับโปรตอน โดยหมู่ที่สามารถให้ไฮโดรเจนได้นั้น ส่วนมากจะเป็นหมู่ที่มีไฮโดรเจนจับอยู่กับอะตอมของฟลูออรีนออกซิเจน และไนโตรเจน เมื่อนำค่าการละลายทั้ง 3 ค่าดังกล่าวมารวมกัน ได้ออกมาเป็นค่าการละลายของฮิลเดอบรอน ดังสมการที่ (4) โดยค่าดังกล่าวมีหลักการพื้นฐานมาจากสารที่มีลักษณะขั้วเหมือนกัน หรือโมเลกุลที่มีแรงยึดเหนี่ยวเหมือนกัน จะสามารถละลายเข้ากันได้ แต่มีข้อจำกัด คือค่าพารามิเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ และอาจขาดความแม่นยำเนื่องจากค่าการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าสถิต เป็นต้น โดยค่าการละลายมีหน่วยเป็น $\text{MPa}^{1/2}$ ใน SI UNIT

$$\delta = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_{hb}^2} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) พบว่าหากสารที่ไม่มีขั้วและไม่มีพันธะไฮโดรเจน ค่าการละลายที่เกิดจากแรงลอนดอนนั้น เท่ากับค่าการละลายของฮิลเดอบรอน แสดงว่าค่าการละลายของแรงลอนดอนสามารถหาได้จากวิธีเดียวกันกับ

การหาค่าพารามิเตอร์การละลายของฮิลเคอแบรน คือการถอดรหัสนี้ของพลังงานยึดเหนี่ยวหนาแน่นนั่นเอง

2.6 การทำนายค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนด้วยวิธีการกระจายแบบกลุ่ม[44]

ในปี ค.ศ. 2008 Stefanis และ Panayiotou ได้สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นจากการทดลอง เพื่อการหาค่าการละลายของสาร โดยการแบ่งกลุ่มย่อยของสารออกเป็นสองประเภท คือ First-Order Group (UNIFAC Groups) ซึ่งจะครอบคลุมโครงสร้างของกลุ่มย่อยทั่วไป และ Second-Order Group ซึ่งจะแบ่งโดยใช้หลักตามทฤษฎีคอนจูเกต ทำให้สามารถทำนายค่าของสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนไม่ว่าจะเป็น Multi-Ring, Aromatic Structure และ Heterocyclic หรือแม้กระทั่งสารประเภทชีวเคมี ยา อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น โดย Stefanis และ Panayiotou ได้ให้สมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของแฮนเซนไว้ ดังสมการที่ (5)–(7) มีหน่วยเป็น $\text{MPa}^{1/2}$ โดยที่ค่า C และ D หาได้จากตารางที่ 2 และ 3

$$\delta_d = \sum_i N_i C_i + W \sum_j M_j D_j + 17.3231 \quad (5)$$

$$\delta_p = \sum_i N_i C_i + W \sum_j M_j D_j + 7.3548 \quad (6)$$

$$\delta_{hb} = \sum_i N_i C_i + W \sum_j M_j D_j + 7.9793 \quad (7)$$

ตารางที่ 2 ตัวอย่างค่าการละลายของกลุ่มย่อยประเภท

First-order

Group	δ_d	δ_p	δ_{hb}
$-\text{CH}<$	0.645	0.6491	- 0.2018
$>\text{C}<$	1.2686	2.0838	0.0866
$\text{CH}_2=\text{CH}-$	1.0585	- 2.0035	- 1.2985
$-\text{CH}=\text{CH}-$	0.0048	- 0.2984	- 0.0400
$-\text{CH}=\text{C}<$	0.5372	- 0.9024	- 1.8872
$>\text{C}=\text{C}<$	0.3592	1.0526	- 15.4659

ตารางที่ 3 ตัวอย่างค่าการละลายของกลุ่มย่อยประเภท

Second-order

Group	δ_d	δ_p	δ_{hb}
$(\text{CH}_3)_2-\text{CH}-$	0.046	0.0019	0.3149

ตารางที่ 3 ตัวอย่างค่าการละลายของกลุ่มย่อยประเภท Second-order (ต่อ)

Group	δ_d	δ_p	δ_{hb}
$(\text{CH}_3)_3-\text{C}-$	- 0.0738	1.1881	- 0.2966
ring of 5 carbons	- 0.6681	- 2.3430	- 0.3079
ring of 6 carbons	- 0.3874	- 3.6432	-
$-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-$	- 0.1355	- 3.5085	- 1.0795
$\text{CH}_3-\text{C}=\text{C}-$	- 0.0785	0.3316	0.3875
$-\text{CH}_2-\text{C}=\text{C}-$	- 0.3236	- 2.3179	- 0.5836

เมื่อ i คือจำนวนของกลุ่มย่อยประเภท First Order ที่มีอยู่ในสาร j คือจำนวนของกลุ่มย่อยประเภท Second Order ที่มีอยู่ในสาร N คือจำนวนของกลุ่มย่อยประเภท First Order ของแต่ละกลุ่มที่ซ้ำกันในสาร C คือค่าการละลายของกลุ่มย่อยประเภท First Order M คือจำนวนของกลุ่มย่อยประเภท Second Order ของแต่ละกลุ่มที่ซ้ำกันในสาร D คือค่าการละลายของกลุ่มย่อยประเภท Second Order W จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมี Second Order Group และมีค่า 0 เมื่อไม่มี Second Order Group หากค่าพารามิเตอร์การละลาย δ_p และ δ_{hb} มีค่าน้อยกว่า $3 \text{ MPa}^{1/2}$ จึงใช้สมการดังสมการที่ (8)–(9)

$$\delta_p = \sum_i N_i C_i + W \sum_j M_j D_j + 2.7467 \quad (8)$$

$$\delta_{hb} = \sum_i N_i C_i + W \sum_j M_j D_j + 1.3720 \quad (9)$$

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน

การคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนในงานวิจัยนี้คำนวณจากโปรแกรม ProCAPE ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณของ Constatinou กับ Gani [45] เพื่อนำมาช่วยในการคำนวณค่าการละลายของตัวทำละลายและสารอนุพันธ์ของไมทราไจนิน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและใช้การคำนวณของ Stefanis เมื่อโปรแกรมไม่สามารถคำนวณได้ โดยจะคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของไมทราไจนินและตัวทำละลาย ซึ่งเลือกใช้ตัวทำละลายที่แนะนำจาก GSK's Solvent Selection Guide [46]

3.2 การเลือกตัวทำละลายเพื่อนำไปหาช่วงการละลาย [44]

หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์การละลายของแอสเซนแล้ว นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปพล็อตเป็นกราฟการละลายสามองค์ประกอบ (Ternary Graph) โดยจะสามารถแปลงค่าพารามิเตอร์การละลายของแอสเซนเหล่านี้ให้เป็นสัดส่วน เพื่อนำไปพล็อตได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$100f_d = \frac{100\delta_d}{\delta_d + \delta_p + \delta_{hb}} \quad (10)$$

$$100f_p = \frac{100\delta_p}{\delta_d + \delta_p + \delta_{hb}} \quad (11)$$

$$100f_{hb} = \frac{100\delta_{hb}}{\delta_d + \delta_p + \delta_{hb}} \quad (12)$$

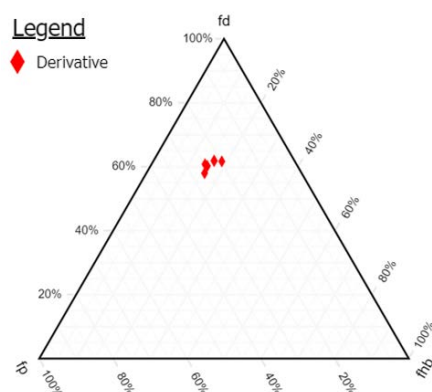
3.3 สารอนุพันธ์ของไมทราไจนีน

เนื่องจากสารไมทราไจนีนไม่สามารถหาค่าการละลายได้ครบทั้ง 3 ค่าเนื่องจากบางค่าติดลบ งานวิจัยนี้จึงเลือกอัลคาลอยด์ชนิดอื่น รวมถึงสารอนุพันธ์ของไมทราไจนีน ดังตารางที่ 4 ซึ่งมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ProCAPE มีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อเป็นกลุ่มตัวแทนของไมทราไจนีนที่นำไปพล็อตกราฟ และดูค่าการละลายต่อไป โดย MW คือมวลโมเลกุล Tm คืออุณหภูมิจุดหลอมเหลว Tb คืออุณหภูมิจุดเดือด Tc คืออุณหภูมิจุด

วิกฤต และ Vm คือปริมาตรโมลาร์ และ Zc คือ ค่าตัวประกอบการอัดตัววิกฤต

4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

เมื่อนำค่าการละลายของตัวถูกละลายที่คำนวณได้จากโปรแกรม ProCAPE[47] มาพล็อตกราฟการละลายสามองค์ประกอบ พบว่าตัวถูกละลายที่มีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ใกล้เคียงกัน มีค่าการละลายเกาะกลุ่มกัน และมีผลจากแรงลอนดอนที่มากตามขนาดมวลโมเลกุล ดังรูปที่ 1 โดยค่า f_d อยู่ในช่วง 57.96–61.85 ค่า f_p อยู่ในช่วง 19.76–26.28 และค่า f_{hb} อยู่ในช่วง 14.47–18.57



รูปที่ 1 ค่าการละลายของตัวถูกละลาย

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารอนุพันธ์ของไมทราไจนีน

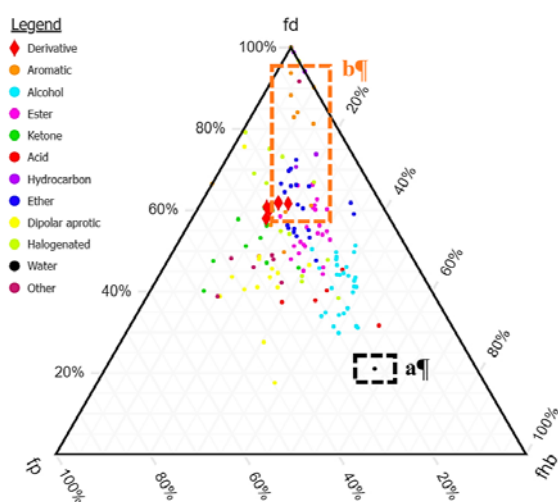
Material	MW (g/mol)	Tm (K)	Tb (K)	Tc (K)	Vm (cm ³ /mol)	Vc (cm ³ /mol)	Zc
Mitragynine	398.49	430.62	804.26	1,001.11	341.14	1,183.04	0.214
Ciliaphylline	414.49	453.32	821.31	960.26	285.05	1,206.48	0.213
Isorhynchophylline	384.47	442.70	804.57	952.17	265.83	1,157.86	0.217
MGM-9	476.54	460.12	828.68	948.83	358.77	1,329.85	0.208
Mitragynine Pseudoindoxyl	414.49	456.96	823.04	960.26	294.35	1,206.48	0.213
Mitraphylline	368.43	454.49	795.58	949.09	270.51	1,059.53	0.223
Rhynchophylline	384.47	442.70	804.57	952.17	265.83	1,157.86	0.217

จากรูปที่ 2 พบว่ากลุ่มของตัวทำละลายที่มีค่าการละลายใกล้เคียงกับค่าการละลายของตัวถูกละลาย ได้แก่ Ether, Ester, Ketone, Aromatic และ Halogenated เมื่อนำกราฟการละลายสามองค์ประกอบของน้ำมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 2 พื้นที่ a ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำมีแรงยึดเหนี่ยวกันแบบพันธะไฮโดรเจน

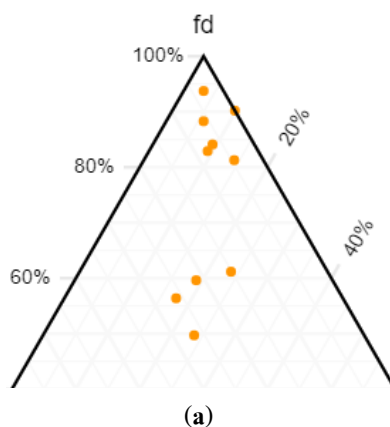
โดยมีค่าพารามิเตอร์การละลายของน้ำ คือ δ_d มีค่า 15.5 MPa^{1/2} δ_p มีค่า 16 MPa^{1/2} และ δ_{hb} มีค่า 42.3 MPa^{1/2} หรือมีค่า f_d , f_p และ f_{hb} คือ 21.00, 21.68 และ 57.32 ตามลำดับ ทั้งจากรูปที่ 2 พื้นที่ a และค่าพารามิเตอร์การละลาย พบว่าตัวแปรที่มีผลมากที่สุดของค่าการละลาย คือค่าของพันธะไฮโดรเจนซึ่ง

สอดคล้องกับกราฟที่แสดงออกมา และสอดคล้องกับความ เป็นจริง เพื่อเป็นการยืนยันแนวโน้มของกราฟที่เป็นไปอย่าง ถูกต้อง จึงยกตัวอย่างจากรูปที่ 2 พื้นที่ b ซึ่งได้นำมาแยกให้ เห็นชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 3a ซึ่งเป็นกลุ่มของตัวทำละลาย ประเภท Aromatic ที่มีค่าการละลายแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มที่อยู่ทางด้านบน ยกตัวอย่างเช่น Mesitylene, Benzene และ Cumene กลุ่มที่อยู่ทางด้านล่าง ยกตัวอย่างเช่น Pyridine, Anisole และ Ethoxy-benzene เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างใน

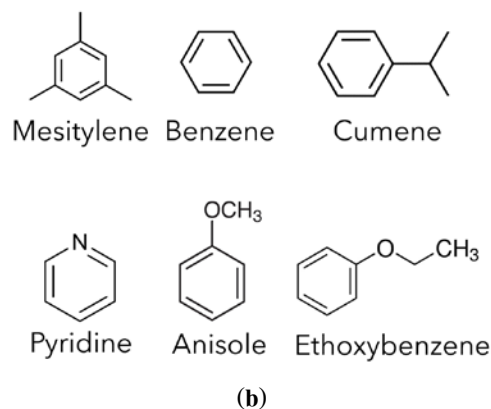
รูปที่ 3b จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า กลุ่มด้านบนมีคุณสมบัติ เป็นสารไม่มีขั้วอยู่ชัดเจนและเมื่อเทียบกับสารในกลุ่มล่างจะ เป็นสารที่มีทั้ง Oxygen และ Nitrogen เป็นต้น จะเห็นว่ามี ความเป็นขั้วซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่นำมาแสดงผล โดยเมื่อ พิจารณาค่าพารามิเตอร์เฮนเซนของกลุ่ม Aromatic ที่อยู่ ด้านบนดังตารางที่ 5 แล้ว พบว่ามีค่าการละลายในส่วนของ Dispersion Forces อยู่มาก ทำให้กราฟที่ได้ มีความสอดคล้อง กับค่าการละลาย และโครงสร้างของสารกลุ่มดังกล่าว



รูปที่ 2 ค่าการละลายของตัวถูกละลายและตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ



(a)



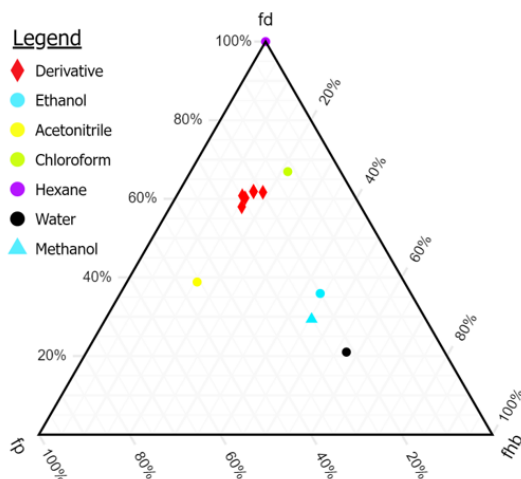
(b)

รูปที่ 3 ตัวทำละลายในกลุ่ม Aromatic

ตารางที่ 5 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์เฮนเซนของกลุ่ม Aromatic

ตัวทำละลาย	δ_d	δ_p	δ_{hb}	fd	fp	fhb
Mesitylene	18	0.6	0.6	93.74	3.13	3.13
Benzene	18.4	0	2.0	90.20	0	9.80
Cumene	18.1	1.2	1.2	88.30	5.85	5.85

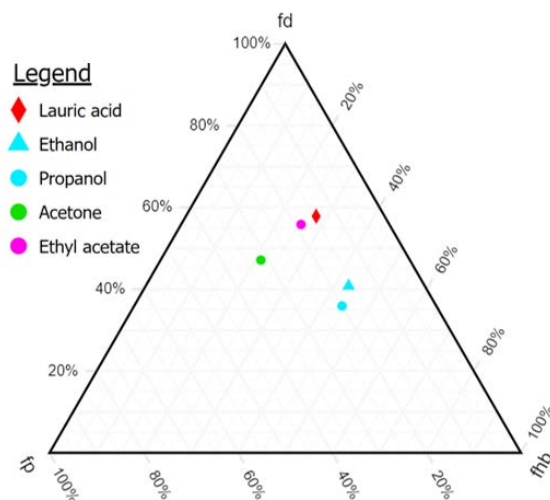
และยังมีงานวิจัยที่มีผลเป็นไปตามแนวโน้มของกราฟการละลายสามองค์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 4 ในปี ค.ศ. 2009 Ruri Kikura-Hanajiri ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณไมทราไจนิน, 7-OH Mitragynine และสารชนิดอื่น ๆ จากพืชกระท่อม จากการสกัดได้รายงานผลของ 7-OH Mitragynine ที่สกัดด้วยตัวทำละลาย EtOH และ Acetonitrile อยู่ที่ $15.50 \mu\text{g/g}$ และ $16.15 \mu\text{g/g}$ ตามลำดับ[48] ในปี ค.ศ. 2011 Goh Teik Beng และคณะ ได้พัฒนาวิธีการแยกไมทราไจนินจากใบกระท่อมให้บริสุทธิ์มากขึ้น โดยในงานวิจัยใช้การสกัดด้วยวิธีการการสกัดแบบชอกห์-เลตระบุ ผลผลิตแท้จริงคิดเป็นผลผลิตร้อยละของการสกัดโดยใช้ Chloroform และ Hexane ไว้ที่ 2.60 % และ 0.26 % ตามลำดับ[49] ในปี ค.ศ. 2021 Yong Sean Goh และคณะ ได้ใช้เทคนิค Accelerated Solvent Extraction Technique หรือ ASE ในการสกัดพืชกระท่อม ได้ค่าเฉลี่ยของมีผลได้แห้งการสกัดโดยใช้น้ำ และ MeOH อยู่ที่ $2.14 \pm 0.15 \text{ g}$ และ $2.91 \pm 0.21 \text{ g}$ ตามลำดับ[50] ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีทิศทางความสามารถในการละลายสอดคล้องกับกราฟการละลายสามองค์ประกอบที่ได้จากการทำนาย



รูปที่ 4 ตัวทำละลายที่ถูกใช้เปรียบเทียบในงานวิจัยการสกัดไมทราไจนิน

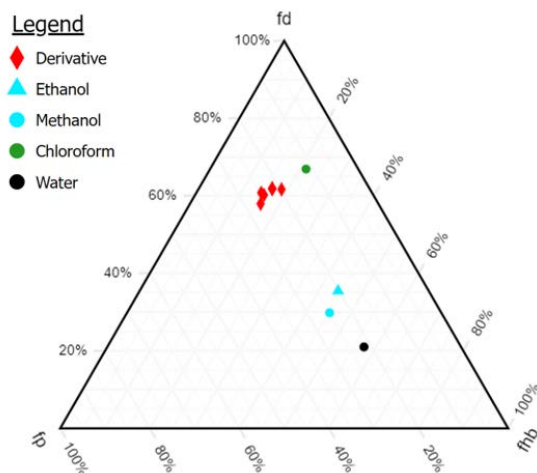
นอกจากนี้กราฟการละลายสามองค์ประกอบค่าการละลายนี้ยังสามารถทำนายแนวโน้มการละลายของสารชนิดอื่น ๆ ได้อีกด้วย ในปี ค.ศ. 2017 Dan Xie และคณะ ได้ทำการเปรียบเทียบตัวทำละลายเพื่อใช้สกัดกรดไขมันจาก Krill Meal โดยมีการใช้ตัวทำละลาย Ethanol, Propanol,

Acetone และ Ethyl Acetate มีผลได้การสกัดของ Lauric Acid มีหน่วยเป็น %w/w อยู่ที่ 0.22 ± 0.04 , 0.27 ± 0.02 , 0.28 ± 0.02 และ 0.35 ± 0.07 ตามลำดับ[51] ซึ่งมีทิศทางความสามารถในการละลายสอดคล้องกับกราฟการละลายสามองค์ประกอบที่ได้จากการทำนายแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวทำละลายที่ถูกใช้เปรียบเทียบในงานวิจัยการสกัดกรดไขมันจาก Krill Meal

เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำ เอทานอล เมทานอล และคลอโรฟอร์ม ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังรูปที่ 6 พบว่ายังมีตัวทำละลายชนิดอื่น ๆ ที่มีค่าการละลายใกล้เคียงตัวถูกละลายที่ต้องการ ทำให้เห็นว่าตัวทำละลายที่ใช้ในปัจจุบันนั้นยังไม่เหมาะสมในการสกัด



รูปที่ 6 ค่าการละลายของตัวถูกละลายเปรียบเทียบกับตัวทำละลายที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

5. สรุป

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในหาตัวทำละลายเพื่อใช้ในการสกัดไมทราจินีน โดยใช้วิธี Group Contribution และโปรแกรม ProCAPE โดยเลือกตัวทำละลายจาก GSK's Solvent Selection Guide จากการวิเคราะห์ พบว่าสารกลุ่มประเภท Ether, Ester, Ketone, Aromatic และ Halogenated มีความสามารถในการละลายที่ดีกว่าตัวทำละลายในปัจจุบัน เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นมีค่า $\log P$ ที่สูง แต่ตัวถูกละลายที่นำมาใช้เป็นตัวอย่าง มีผลกับค่า $\log P$ มากที่สุด รองลงมาเป็น $\log P$ และ $\log B$ ตามลำดับเมื่อทำนายค่าการละลายของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัด พบว่ากราฟที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้ความกรุณาจากบริษัท PSE for SPEED จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้โปรแกรม ProCAPE ทำให้งานวิจัยนี้สามารถทำได้อย่างสะดวกและแม่นยำมากขึ้น และสุดท้ายขอขอบคุณทางเว็บไซต์ www.ternaryplot.com และ www.ternaryplot.netlify.app ในการพล็อตกราฟการละลายสามองค์ประกอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Hassan, M. Muzaimi, V. Navaratnam, N. H. M. Yusoff, F. W. Suhaimi, R. Vadivelu, B. K. Vicknasingam, D. Amato, S. Hörsten, N. I. W. Ismail *et al.*, "From Kratom to mitragynine and its derivatives: Physiological and behavioural effects related to use, abuse, and addiction," *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 37, no. 2, pp. 138–151, 2013, doi: 10.1016/j.neubiorev.2012.11.012.
- [2] K. S. Grewal, "the Effect of Mitragynine on Man," *British Journal of Medical Psychology*, vol. 12, no. 1, pp. 41–58, 1932, doi: 10.1111/j.2044-8341.1932.tb01062
- [3] E. M. Mudge and P. N. Brown, "Determination of mitragynine in Mitragyna speciosa raw materials and finished products by liquid chromatography with UV detection: Single-laboratory validation," *Journal of AOAC International*, vol. 100, no. 1, pp. 18–24, 2017, doi: 10.5740/jaoacint.16-0220.
- [4] S. Pine, P. Pine, D. C. Ritter and A. G. Campbell, "Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Mitragyna speciosa," *Reader's Digest Asia*, vol. 23, no. 532, pp. 157–162, 1989.
- [5] V. S. Kislik, "Modern (Classical) Fundamental Principles of Solvent Extraction," in *Solvent Extraction*, Oxford, UK: Elsevier, 2012, ch. 1, pp. 3–67, doi: 10.1016/b978-0-444-53778-2.10001-9.
- [6] J. G. Huddleston, H. D. Willauer, R. P. Swatoski, A. E. Visser and R. D. Rogers, "Room temperature ionic liquids as novel media for 'clean' liquid-liquid extraction," *Chemical Communications*, no. 16, pp. 1765–1766, 1998, doi: 10.1039/A803999B.
- [7] F. Pena-Pereira, I. Lavilla and C. Bendicho, "Miniaturized preconcentration methods based on liquid-liquid extraction and their application in inorganic ultratrace analysis and speciation: A review," *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 64, no. 1, pp. 1–15, 2009, doi: 10.1016/j.sab.2008.10.042.
- [8] David T. Harvey, "7.7: Liquid-Liquid Extractions," ANALYTICAL CHEMISTRY 2.1, 2.1th ed. San Francisco, California, United States: LibreTexts, 2020, ch. 7, sec. 7, pp. 7.7.1. [Online]. Available: <https://batch.libretexts.org/print/Letter/Finished/chem-220642/Full.pdf>
- [9] J. Burke, "Solubility Parameters: Theory and Application," cool.culturalheritage.org. <https://cool.culturalheritage.org/coolaic/sg/bpg/annual/v03/bp03-04.html> (accessed Oct. 29, 2021).
- [10] E. J. Shellard and M. D. Lees, "The anatomy of the leaves of Mitragyna speciosa Korth.," *Planta Medica*, vol. 13, no. 3, pp. 280–290, 1965, doi: 10.1055/s-0028-1100122.

- [11] H. Takayama, M. Kurihara, M. Kitajima, I. M. Said and N. Aimi, "New indole alkaloids from the leaves of malaysian: *Mitragyna speciosa*," *Tetrahedron*, vol. 54, no. 29, pp. 8433–8440, 1998, doi: 10.1016/S0040-4020(98)00464-5.
- [12] H. Takayama, "Chemistry and pharmacology of analgesic indole alkaloids from the rubiaceous plant, *Mitragyna speciosa*," *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, vol. 52, no. 8, pp. 916–928, 2004, doi: 10.1248/cpb.52.916.
- [13] K. Matsumoto, S. Horie, H. Ishikawa, H. Takayama, N. Aimi, D. Ponglux and K. Watanabe, "Antinociceptive effect of 7-hydroxymitragynine in mice: Discovery of an orally active opioid analgesic from the Thai medicinal herb *Mitragyna speciosa*," *Life Sciences*, vol. 74, no. 17, pp. 2143–2155, 2004, doi: 10.1016/j.lfs.2003.09.054.
- [14] K. Matsumoto, H. Takayama, M. Narita, A. Nakamura, M. Suzuki, T. Suzuki, T. Murayama, S. Wongseripipatana, K. Misawa, M. Kitajima *et al.*, "MGM-9 [(E)-methyl 2-(3-ethyl-7a,12a-(epoxyethanoxy)-9-fluoro-1,2,3,4,6,7,12,12b-octahydro-8-methoxyindolo[2,3-a]quinolizin-2-yl)-3-methoxyacrylate], a derivative of the indole alkaloid mitragynine: A novel dual-acting μ - and κ -opioid agonist with potent antinociceptive and weak rewarding effects in mice," *Neuropharmacology*, vol. 55, no. 2, pp. 154–165, 2008, doi: 10.1016/j.neuropharm.2008.05.003.
- [15] A. Sabetghadam, V. Navaratnam and S. M. Mansor, "Dose–Response Relationship, Acute Toxicity, and Therapeutic Index between the Alkaloid Extract of *Mitragyna speciosa* and Its Main Active Compound Mitragynine in Mice," *Drug Development Research*, vol. 74, no. 1, pp. 23–30, 2013, doi: 10.1002/ddr.21052.
- [16] W. Reanmongkol, N. Keawpradub and K. Sawangjaroen, "Effects of the extracts from *Mitragyna speciosa* Korth. leaves on analgesic and behavioral activities in experimental animals," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 29, no. SUPPL. 1, pp. 39–48, 2007.
- [17] M. L. Warner, N. C. Kaufman and O. Grundmann, "The pharmacology and toxicology of kratom: from traditional herb to drug of abuse," *International Journal of Legal Medicine*, vol. 130, pp. 127–138, 2016, doi: 10.1007/s00414-015-1279-y.
- [18] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2007.
- [19] (-)-Mitragynine, National Center for Biotechnology Information, 2004. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Mitragynine>.
- [20] D. Hooper, "The anti-opium leaf," *Pharmaceutical Journal*, vol. 78, p. 453, 1907.
- [21] E. Field, "Mitragynine and mitraversine, two new alkaloids from species of mitragyne," *Journal of the Chemical Society Transactions*, vol. 119, pp. 887–891, 1921.
- [22] W. I. Taylor, B. S. Joshi and Raymond-Hamet, "Structure of Mitragynine (9-Methoxycorynantheidine)," *Chemistry and Industry*, vol. 54, p. 573, 1963.
- [23] D. E. Zacharias, R. D. Rosenstein, and G. A. Jeffrey, "The structure of mitragynine hydroiodide," *Acta Crystallographica*, vol. 18, no. 6, pp. 1039–1043, 1965, doi: 10.1107/S0365110X650024 99.
- [24] E. J. Shellard, "Ethnopharmacology of kratom and the *Mitragyna* alkaloids," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 25, no. 1, pp. 123–124, 1989, doi: 10.1016/0378-8741(89)90053-6.
- [25] P. J. Houghton, A. Latiff and I. M. Said, "Alkaloids from *Mitragyna speciosa*," *Phytochemistry*, vol. 30, no. 1, pp. 347–350, 1991, doi: 10.1016/0031-9422(91)84152-I.
- [26] H. Takayama, "Chemistry and Pharmacology of Analgesic Indole Alkaloids from the Rubiaceous

- Plant, *Mitragyna speciosa*,” *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, vol. 52, no. 8, pp. 916–928, 2004, doi: 10.1248/cpb.52.916.
- [27] S. N. Harizal, S. M. Mansor, J. Hasnan, J. K. J. Tharakan and J. Abdullah, “Acute toxicity study of the standardized methanolic extract of *Mitragyna speciosa* Korth in Rodent,” *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 131, no. 2, pp. 404–409, 2010, doi: 10.1016/j.jep.2010.07.013.
- [28] S. Mansor, A. Sabetghadam and S. Ramanathan, “The evaluation of antinociceptive activity of alkaloid, methanolic, and aqueous extracts of Malaysian *Mitragyna speciosa* Korth leaves in rats,” *Pharmacognosy Research*, vol. 2, no. 3, p. 181, 2010, doi: 10.4103/0974-8490.65514.
- [29] A. R. Shamima, S. Fakurazi, M. T. Hidayat, I. Hairuszah, M. A. M. Moklas and P. Arulselvan, “Antinociceptive Action of Isolated Mitragynine from *Mitragyna Speciosa* through Activation of Opioid Receptor System,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 13, no. 9, pp. 11427–11442, 2012, doi: 10.3390/ijms130911427.
- [30] L. Orio, L. Alexandru, G. Cravotto, S. Mantegna and A. Barge, “UAE, MAE, SFE-CO₂ and classical methods for the extraction of *Mitragyna speciosa* leaves,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 19, no. 3, pp. 591–595, 2012, doi: 10.1016/j.ultsonch.2011.10.001.
- [31] J. Lara, D. Drolet, C. Hansen, A. Chollot, and N. Monta, “The use of the Hansen solubility parameters in the selection of protective polymeric materials resistant to chemicals,” *International Journal of Current Research*, vol. 9, no. 3, pp. 47860–47867, 2017.
- [32] S. Parthasarathy, S. Ramanathan, V. Murugaiyah, M. R. Hamdan, M. I. M. Said, C. Lai and S. M. Mansor, “A simple HPLC–DAD method for the detection and quantification of psychotropic mitragynine in *Mitragyna speciosa* (ketum) and its products for the application in forensic investigation,” *Forensic Science International*, vol. 226, no. 1–3, pp. 183–187, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.forsciint.2013.01.014.
- [33] A. Pandey, S. Tripathi and C. A. Pandey, “Concept of standardization, extraction and pre phytochemical screening strategies for herbal drug,” *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 2, no. 5, pp. 115–119, 2014.
- [34] L. Boffa, C. Ghè, A. Barge, G. Muccioli and G. Cravotto, “Alkaloid Profiles and Activity in Different *Mitragyna speciosa* Strains,” *Natural Product Communications*, vol. 13, no. 9, pp. 1111–1116, 2018, doi: 10.1177/1934578X1801300904.
- [35] A. Sharma, S. H. Kamble, F. León, N. J. -Y. Chear, T. I. King, E. C. Berthold, S. Ramanathan, C. R. McCurdy and B. A. Avery, “Simultaneous quantification of ten key Kratom alkaloids in *Mitragyna speciosa* leaf extracts and commercial products by ultra-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry,” *Drug Testing and Analysis*, vol. 11, no. 8, pp. 1162–1171, Aug. 2019, doi: 10.1002/dta.2604.
- [36] R. R. Mustafa, R. Sukor, S. M. Mohd Nor, N. Saari, and F. A. Azri, “Enhancing extraction yield and purity of mitragynine from *mitragyna speciosa* through sequential solvent extraction and characterisation using nmr technique,” *International Journal of Scientific & Technology Research.*, vol. 9, no. 3, pp. 3846–3854, 2020.
- [37] L. Flores-Bocanegra, H. A. Raja, T. N. Graf, M. Augustinović, E. D. Wallace, S. Hematian, J. J. Kellogg, D. A. Todd, N. B. Cech and N. H. Oberlies, “The Chemistry of Kratom [*Mitragyna speciosa*]: Updated Characterization Data and Methods to Elucidate Indole and Oxindole Alkaloids,” *Journal of Natural Products*, vol. 83, no. 7, pp. 2165–2177, 2020, doi: 10.1021/acs.jnatprod.0c00257.

- [38] J. H. Hildebrand, R. L. Scott, "Book Reviews," in *Regular Solutions* Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall International Series in Chemistry, 1962, pp. 431.
- [39] J. K. Fink, "Terpene Resins," in *Reactive Polymers Fundamentals and Applications*, Oxford, UK: William Andrew, 2013, ch. 12, pp. 303–315, doi: 10.1016/b978-1-4557-3149-7.00012-7.
- [40] B. C. Roughton, J. White, K. V. Camarda and R. Gani, "Simultaneous Design of Ionic Liquids and Azeotropic Separation Processes," *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 29, pp. 1578–1582, 2011, doi: 10.1016/B978-0-444-54298-4.50094-5.
- [41] H. J. Vandenburg, A. A. Clifford, K. D. Bartle, R. E. Carlson, J. Carroll and I. D. Newton, "A simple solvent selection method for accelerated solvent extraction of additives from polymers," *Analyst*, vol. 124, no. 11, pp. 1707–1710, 1999, doi: 10.1039/a904631c.
- [42] C. M. Hansen, "Hansen Solubility Parameters of Asphalt, Bitumen, and Crude Oils," in *Hansen solubility parameters: A user's handbook*, 2nd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007, ch. 9, sec. 1, pp. 158.
- [43] C. M. Hansen, "The Three Dimensional Solubility Parameter and Solvent Diffusion Coefficient. Their Importance in Surface Coating Formulation," *Journal Paint Technology*, vol. 39, pp. 104, 1967.
- [44] E. Stefanis and C. Panayiotou, "Prediction of Hansen Solubility Parameters with a New Group-Contribution Method," *International Journal of Thermophysics*, vol. 29, pp. 568–585, 2008, doi: 10.1007/s10765-008-0415-z.
- [45] L. Constantinou and R. Gani, "New group contribution method for estimating properties of pure compounds," *AIChE Journal*, vol. 40, no. 10, pp. 1697–1710, 1994, doi: 10.1002/aic.690401011.
- [46] R. K. Henderson, C. Jiménez-González, D. J. C. Constable, S. R. Alston, G. G. A. Inglis, G. Fisher, J. Sherwood, S. P. Binks and A. D. Curzons, "Expanding GSK's solvent selection guide—embedding sustainability into solvent selection starting at medicinal chemistry," *Green Chemistry*, vol. 13, no. 4, pp. 854–862, 2011, doi: 10.1039/c0gc00918k.
- [47] R. Gani, "PROCAPE Computer-aided Tool for Property Estimation," pseforspeed.com. https://www.pseforspeed.com/cpt_product/procape (accessed Oct. 27, 2022).
- [48] R. Kikura-Hanajiri, M. Kawamura, T. Maruyama, M. Kitajima, H. Takayama and Y. Goda, "Simultaneous analysis of mitragynine, 7-hydroxymitragynine, and other alkaloids in the psychotropic plant 'kratom' (*Mitragyna speciosa*) by LC-ESI-MS," *Forensic Toxicology*, vol. 27, pp. 67–74, 2009, doi: 10.1007/s11419-009-0070-5.
- [49] G. T. Beng, M. R. Hamdan, M. J. Siddiqui, M. N. Mordi and S. M. Mansor, "A simple and cost effective isolation and purification protocol of mitragynine from mitragyna speciosa korth (ketum) leaves," *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 54–60, 2011.
- [50] Y. S. Goh, T. Karunakaran, V. Murugaiyah, R. Santhanam, M. H. Abu Bakar and S. Ramanathan, "Accelerated Solvent Extractions (ASE) of Mitragyna speciosa Korth. (Kratom) Leaves: Evaluation of Its Cytotoxicity and Antinociceptive Activity," *Molecules*, vol. 26, no. 12, 2021, Art. no. 3704, doi: 10.3390/molecules26123704.
- [51] D. Xie, J. Jin, J. Sun, L. Liang, X. Wang, W. Zhang, X. Wang and Q. Jin, "Comparison of solvents for extraction of krill oil from krill meal: Lipid yield, phospholipids content, fatty acids composition and minor components," *Food Chemistry*, vol. 233, pp. 434–441, 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.138.

การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งรายเดือนด้วยตัวแบบผสมของโฮลต์ และซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันที่เน้นการลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบ

Forecasting Monthly Export Volume of Frozen White Shrimp with Hybrid Model of Holt and Support Vector Regression Emphasizing on Systematic Error Reduction

ธรณินทร์ สัจจวิริยทรัพย์*

สาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย รัชดาภิเษก ดินแดง กรุงเทพมหานคร 10400

Thoranin Sujjaviriyasup*

Department of Logistics Engineering, School of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce,

Ratchadapisek, Din Daeng, Bangkok, 10400, Thailand

*Corresponding Author E-mail: thoranin_suj@utcc.ac.th

Received: Jun 22, 2022; Revised: Oct 26, 2022; Accepted: Nov 14, 2022

บทคัดย่อ

การส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งของประเทศไทยเป็นหนึ่งในสินค้าทางการเกษตรที่สำคัญ แต่เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงยังคงประสบปัญหาต้นทุนการผลิตที่สูง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแข่งขันด้านการส่งออก โดยต้นทุนกว่าร้อยละ 90 เป็นต้นทุนผันแปรที่แปรผันโดยตรงกับปริมาณการเพาะเลี้ยงกุ้งขาว การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกที่เหมาะสมสามารถเป็นสารสนเทศประกอบการวางแผนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ นำเสนอตัวแบบผสมระหว่างตัวแบบโฮลต์และตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันด้วยการเน้นการลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการพยากรณ์ให้มากยิ่งขึ้น โดยตัวแบบผสมที่นำเสนอได้นำมาเปรียบเทียบกับตัวแบบพยากรณ์ที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ ตัวแบบอาร์มาและตัวแบบโฮลวินเทอร์ ด้วยเกณฑ์วัดประสิทธิภาพ 5 เกณฑ์ ซึ่งผลการวิจัยบ่งชี้ว่า ตัวแบบผสมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแบบที่นำมาเปรียบเทียบและยังคงให้ประสิทธิภาพการพยากรณ์ใกล้เคียงเดิมถึงแม้จะใช้ชุดข้อมูลใหม่ทดสอบเพิ่มเติม ตัวแบบผสมที่นำเสนอสามารถใช้เป็นเครื่องมือประกอบการพิจารณาวางแผนการผลิตกุ้งขาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การส่งออก, กุ้งขาว, ตัวแบบผสม, การลดความผิดพลาด, ซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน

Abstract

Frozen white shrimp export plays a significant role in agricultural commodities in Thailand. However, agriculturists still encounter high production costs, which affect export competitiveness of Thailand. More than 90% of total production cost is variable cost, which corresponds to volume of white shrimp cultivation. The appropriate forecast of future export quantity of white shrimp can be useful information to support critical decision making on production planning. In this research, a hybrid model of Holt and support vector regression is developed emphasizing on systematic error reduction to improve accuracy of forecast. Moreover, the hybrid model is compared to conventional models (i.e., ARIMA and Holt-Winters) based on five accuracy measures. The empirical results indicated that the hybrid model outperforms other forecasting models. Furthermore, the forecasting performance of hybrid model approximates to the forecasting performance

in test data used in cross-validation, although some new hidden observations are used. Consequently, the hybrid model can be a useful tool to support decision making on production of white shrimp in Thailand.

Keywords: Export, White shrimp, Hybrid model, Error reduction, Support Vector Regression

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศผู้ผลิตและส่งออกสินค้าทางการเกษตรที่สำคัญของโลก ซึ่งสามารถผลิตและส่งออกสินค้าทางการเกษตรหลายรายการ โดยหนึ่งในสินค้าที่สำคัญและสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจได้แก่ การส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็ง [1] ซึ่งเป็นกุ้งทะเลที่นิยมเพาะเลี้ยงตามภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย โดยพื้นที่เพาะเลี้ยง 4 อันดับแรก ได้แก่ จะเชิงเทรา จันทบุรี สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช ตามลำดับ [1] และมีสัดส่วนการส่งออกเฉลี่ยประมาณร้อยละ 79 ของปริมาณการส่งออกกุ้งสดแช่แข็งในปี 2564 [2]

โดยมีประเทศผู้นำเข้าหลักได้แก่ สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น จีน เกาหลีใต้ ไต้หวัน ตามลำดับ [3] แต่จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดต่อของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ส่งผลให้อุตสาหกรรมกุ้งได้รับผลกระทบและเกษตรกรชะลอการเลี้ยง [4] ถึงแม้จะได้รับผลกระทบจากสถานการณ์การแพร่ระบาด แต่สินค้าทางการเกษตรเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิต ส่งผลให้ยังคงมีความต้องการสั่งซื้อจากประเทศผู้ค้า

อย่างไรก็ตาม เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงกุ้งขาวยังคงประสบปัญหาด้านต้นทุนการผลิตที่สูง และการขาดแคลนพันธุ์กุ้งส่งผลให้ราคาขายแพงกว่าประเทศคู่แข่งทางการค้าอื่น ๆ [4] ทำให้ความสามารถในการแข่งขันของประเทศไทยลดลง โดยต้นทุนกว่าร้อยละ 90 เป็นต้นทุนผันแปร [5] และต้นทุนผันแปรส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 60 เป็นค่าอาหารที่มีการปรับราคาเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 4 สำหรับการเลี้ยงกุ้งในปี 2564 ซึ่งต้นทุนค่าอาหารแปรผันตรงกับจำนวนการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวของเกษตรกร โดยการเพาะเลี้ยงที่เกินความต้องการของตลาดย่อมส่งผลต่อปริมาณต้นทุนของเกษตรกรโดยตรง

การเพาะเลี้ยงกุ้งขาวจึงควรเน้นการผลิตที่เหมาะสมและสอดคล้องกับความต้องการของตลาด เพื่อบริหารจัดการต้นทุนให้เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งปริมาณการส่งออกในแต่ละช่วงเวลาสามารถใช้แทนจำนวนความต้องการที่ประเทศ

ไทยสามารถค้าขายกับประเทศคู่ค้าต่าง ๆ โดยการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกรวมทั้งประเทศสามารถช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อควบคุมและตรวจสอบความสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทาน [6-7] ประกอบการกำหนดนโยบายส่งเสริมและสนับสนุนเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงกุ้งขาว

แต่ปริมาณการส่งออกในแต่ละช่วงเวลาเกิดการปรับเปลี่ยนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลจากปัจจัยต่าง ๆ ทั้งปัจจัยภายในประเทศและปัจจัยภายนอกประเทศ [4] ส่งผลให้การคาดการณ์ปริมาณการส่งออกด้วยวิธีการอย่างง่ายอาจไม่สามารถให้ผลพยากรณ์ที่มีความแม่นยำและเหมาะสม เพื่อใช้เป็นสารสนเทศประกอบการตัดสินใจด้านการวางแผนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาเป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการ [6-9] ซึ่งมีความสะดวกในการประยุกต์ใช้ หากข้อมูลของปัจจัยต่าง ๆ ประกอบการวิเคราะห์สมการถดถอยไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ เนื่องจากการวิเคราะห์อนุกรมเวลาอาศัยเพียงข้อมูลอนุกรมเวลาของความต้องการในปัจจุบันย้อนหลังไปในอดีตเพียงมิติเดียวเพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ ส่งผลให้ข้อมูลที่เกี่ยวกับการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลามีมิติที่น้อยกว่ามิติของข้อมูลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สมการถดถอยที่ต้องใช้ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

โดยตัวแบบไฮลด์เป็นรูปแบบสมการความสัมพันธ์ของการปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่สามารถอธิบายรูปแบบของแนวโน้มของข้อมูลอนุกรมเวลา ในขณะที่ตัวแบบไฮลด์วินเทอร์เพิ่มสมการความสัมพันธ์การปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลสำหรับอธิบายส่วนประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาแบบมีฤดูกาล นอกจากนี้ ตัวแบบอาร์มาที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพดีในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ซึ่งสามารถอธิบายได้ทั้งข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีรูปแบบของฤดูกาลและไม่มีฤดูกาล ซึ่งตัวแบบเหล่านี้ยังคงได้รับความนิยมในปัจจุบัน จึงมีความน่าสนใจประยุกต์ใช้เพื่ออธิบาย

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งรายเดือนของประเทศไทย

อย่างไรก็ตาม การพยากรณ์ความต้องการในปัจจุบันให้ความสำคัญความแม่นยำของการพยากรณ์ที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาตัวแบบพยากรณ์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนเพื่ออธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอนุกรมเวลา [9–11] โดยหนึ่งในวิธีการพัฒนาตัวแบบพยากรณ์แบบผสมที่ให้ความสนใจลดความผิดพลาดของตัวแบบพยากรณ์อย่างเป็นระบบ [9],[11],[12] ซึ่งงานวิจัยนี้พัฒนาตัวแบบผสมระหว่างตัวแบบโฮลต์ (Holt) และตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์เรกเรชัน (Support vector regression; SVR) โดยตัวแบบโฮลต์เป็นหนึ่งในตัวแบบการปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่ได้รับความนิยมทั้งในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งมีความแข็งแกร่งของประสิทธิภาพการพยากรณ์ด้วยสมการที่เรียบง่ายเพื่ออธิบายรูปแบบแนวโน้มรวมทั้งการยกระดับของข้อมูลอนุกรมเวลา แต่การประยุกต์ใช้ตัวแบบโฮลต์เพียงตัวแบบเดียวอาจไม่สามารถอธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอนุกรมเวลาได้ดีในทุกสถานการณ์ ส่งผลให้ส่วนที่ไม่สามารถอธิบายได้ถูกรวมเข้ากับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดของการพยากรณ์ค่อนข้างมาก โดยส่วนเหลือที่ตัวแบบโฮลต์ไม่สามารถอธิบายได้มักมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน การประยุกต์ใช้ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์เรกเรชัน ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแบบการเรียนรู้ของเครื่องแบบมีผู้สอนที่ใช้ข้อกำหนดเบื้องต้นไม่มากสำหรับการสร้างสมการความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนสำหรับการพยากรณ์และได้รับความนิยมประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นตรงหรือไม่เป็นเชิงเส้นตรงเพื่อลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบซึ่งสามารถให้ผลการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวภายใต้หลักการการลดความเสี่ยงเชิงโครงสร้างที่น้อยที่สุด (Principle of Structural Risk Minimization) เพื่ออธิบายค่าส่วนเหลือที่ได้จากตัวแบบโฮลต์เพื่อลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบสำหรับลดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งให้ลดน้อยลง หรือกล่าวในอีกมุมหนึ่ง ตัวแบบผสมสามารถเพิ่มความแม่นยำของการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็ง

ตัวแบบผสมที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับตัวแบบอาร์มา (ARIMA) ที่ได้รับความนิยมและได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพดีในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่สามารถอธิบายได้ทั้งข้อมูลแบบมีอิทธิพลของฤดูกาลหรือไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล [6–9] ซึ่งนิยมใช้เป็นตัวแบบสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวแบบพยากรณ์ในงานวิจัยต่าง ๆ นอกจากนี้ ตัวแบบที่น่าเสนอยังเปรียบเทียบกับตัวแบบการปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล [7],[9],[10] ซึ่งการเปรียบเทียบกับตัวแบบโฮลต์เพื่อบ่งชี้ถึงข้อดีของการลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการพยากรณ์ให้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งเปรียบเทียบกับตัวแบบโฮลต์วินเทอร์ (Holt-Winters) ทั้งแบบเชิงบวกและเชิงคูณ ซึ่งเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่เพิ่มสมการของการอธิบายรูปแบบของฤดูกาลเพิ่มจากตัวแบบโฮลต์ เพื่อบ่งชี้ถึงความสามารถของการลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบช่วยเพิ่มความแม่นยำให้มากยิ่งขึ้น แทนการอธิบายด้วยสมการของการอธิบายรูปแบบของฤดูกาล ด้วยเกณฑ์การวัดประสิทธิภาพการพยากรณ์ 5 เกณฑ์ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error; MAE) รากของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error; RMSE) ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error; MAPE) ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยแบบสมมาตร (Symmetric Mean Absolute Percentage Error; sMAPE) และความคลาดเคลื่อนเชิงระดับของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Scaled Error; MASE)

2. ข้อมูลปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็ง

ข้อมูลปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลรายเดือนที่เผยแพร่ในรูปแบบสื่อออนไลน์บนเว็บไซต์สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรในส่วนของข้อมูลการนำเข้าส่งออกสินค้าทางการเกษตร [2] โดยข้อมูลการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็ง ตั้งแต่ เดือนมกราคม พ.ศ. 2559 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งรายเดือน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาทั่วไปที่ได้รับความนิยมและยังคงประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ รวมทั้งตัวแบบพยากรณ์แบบผสมที่นำเสนอ ดังนี้

3.1 ตัวแบบอนุกรมเวลาที่นิยม

3.1.1 ตัวแบบโฮลต์

ตัวแบบโฮลต์เป็นหนึ่งในตัวแบบการปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่มีสมการของการอธิบายข้อมูลอนุกรมเวลาทั้งระดับและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอนุกรมเวลา ซึ่งมีสมการดังสมการที่ (1) ถึง (3) ดังนี้

สมการระดับ

$$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (1)$$

สมการแนวโน้ม

$$b_t = \beta(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (2)$$

การพยากรณ์

$$\hat{y}_{t+h|t} = l_t + hb_t \quad (3)$$

เมื่อ l_t คือ ค่าประมาณของระดับของข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลาที่ t

b_t คือ ค่าประมาณของแนวโน้มของข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลาที่ t

α คือ ค่าการปรับเรียบของระดับ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

β คือ ค่าการปรับเรียบของแนวโน้ม ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

h คือ ค่าช่วงการพยากรณ์ไปข้างหน้า

$\hat{y}_{t+h|t}$ คือ ค่าพยากรณ์ล่วงหน้า h ช่วงเวลา เมื่อทราบข้อมูลในอดีตถึงข้อมูล ณ เวลาที่ t

การพิจารณาความเหมาะสมของตัวแบบโฮลต์ใช้เกณฑ์ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error; MSE) น้อยที่สุด เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่าง ๆ ซึ่งประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน holt() ของโปรแกรม R [13] โดยกำหนดสัญลักษณ์ Holt แทนตัวแบบโฮลต์ในส่วนของการนำเสนอผลการวิจัย

3.1.2 ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์

ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์เป็นตัวแบบพยากรณ์ที่พัฒนาเพิ่มเติมจากตัวแบบโฮลต์ด้วยการเพิ่มสมการของการอธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลเพื่อให้สามารถอธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอนุกรมเวลาได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีทั้งรูปแบบเชิงบวกและเชิงคูณดังนี้

ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงบวกดังสมการที่ (4) ถึง (7)

$$l_t = \alpha(y_t - s_{t-m}) + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (4)$$

$$b_t = \beta(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (5)$$

$$s_t = \gamma(y_t - l_{t-1} - b_{t-1}) + (1 - \gamma)s_{t-m} \quad (6)$$

$$\hat{y}_{t+h|t} = l_t + hb_t + s_{t-m+1+(h-1) \bmod m} \quad (7)$$

ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงคูณดังสมการที่ (8) ถึง (11)

$$l_t = \alpha \left(\frac{y_t}{s_{t-m}} \right) + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (8)$$

$$b_t = \beta(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (9)$$

$$s_t = \gamma \left(\frac{y_t}{(l_{t-1} - b_{t-1})} \right) + (1 - \gamma)s_{t-m} \quad (10)$$

$$\hat{y}_{t+h|t} = l_t + hb_t + s_{t-m+1+(h-1) \bmod m} \quad (11)$$

เมื่อ l_t คือ ค่าประมาณของระดับของข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลาที่ t

b_t คือ ค่าประมาณของแนวโน้มของข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลาที่ t

s_t คือ ค่าประมาณของฤดูกาลของข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลาที่ t

α คือ ค่าการปรับเรียบของระดับ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

β คือ ค่าการปรับเรียบของแนวโน้ม ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

γ คือ ค่าการปรับเรียบของฤดูกาล ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

h คือ ค่าช่วงการพยากรณ์ไปข้างหน้า

m คือ ค่าช่วงเวลาของอิทธิพลของฤดูกาล

$\hat{y}_{t+h|t}$ คือ ค่าพยากรณ์ล่วงหน้า h ช่วงเวลา เมื่อทราบข้อมูลในอดีตถึงข้อมูล ณ เวลาที่ t

สำหรับการค้นหาตัวแบบ โฮลต์วินเทอร์ที่เหมาะสมทั้งแบบเชิงบวกและเชิงคูณอาศัยเกณฑ์ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดด้วยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน hw() ของโปรแกรม R [13] โดยกำหนดสัญลักษณ์ HW(A) และ HW(M) แทนตัวแบบโฮลต์วินเทอร์เชิงบวกและเชิงคูณตามลำดับในส่วนของการแสดงผลการวิจัย

3.1.3 ตัวแบบอาร์มา

ตัวแบบอาร์มาเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่มีความโดดเด่นสำหรับการพยากรณ์ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปและสามารถอธิบายข้อมูลที่

ไม่อยู่ในสภาวะคงที่ (Non-stationary state) โดยมีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีอิทธิพลของฤดูกาลและมีอิทธิพลของฤดูกาล ดังนี้

ตัวแบบอาร์มาแบบมีฤดูกาลดังสมการที่ (12)

$$\Phi_p(B^S)\varphi_p(B)\nabla_s^p\nabla^d Y_t = \mu + \theta_q(B)\theta_q(B^S)\varepsilon_t \quad (12)$$

ตัวแบบอาร์มาแบบไม่มีฤดูกาลดังสมการที่ (13)

$$(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i)(1 - B)^d(Y_t - \mu) = (1 - \sum_{j=1}^q \theta_j B^j)\varepsilon_t \quad (13)$$

เมื่อ Y_t และ ε_t คือ ค่าข้อมูลอนุกรมเวลาและค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลาที่ t ตามลำดับ

μ และ B คือ ค่าเฉลี่ยและตัวแปลงค่าอนุกรมเวลาย้อนกลับ (Backward shift operator) ตามลำดับ

D และ d คือ ลำดับผลต่างของฤดูกาลและลำดับผลต่างข้อมูลแบบไม่มีฤดูกาล ตามลำดับ

P และ Q คือ ลำดับของตัวแบบอาร์มาแบบมีฤดูกาล p และ q คือ ลำดับของตัวแบบอาร์มาแบบไม่มีฤดูกาล

โดยขั้นตอนการพิจารณาตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมสามารถดำเนินการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การพิจารณาสภาวะคงที่ (Stationary state) โดยการพิจารณาผลต่างของลำดับข้อมูลสำหรับตัวแบบอาร์มาแบบไม่มีฤดูกาลและผลต่างของช่วงฤดูกาลสำหรับตัวแบบอาร์มาแบบมีฤดูกาล เพื่อให้ข้อมูลอนุกรมเวลามีสภาวะคงที่

ขั้นตอนที่ 2 การพิจารณาลำดับของข้อมูลอนุกรมเวลาของช่วงเวลาก่อนหน้าเพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ โดยพิจารณาจากค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (Autocorrelation function; ACF) และ ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเองบางส่วน (Partial autocorrelation function; PACF)

ขั้นตอนที่ 3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบอาร์มา

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบตัวแบบอาร์มา หากตัวแบบอาร์มาไม่เหมาะสมให้ดำเนินการในขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 ใหม่

อย่างไรก็ตาม โปรแกรมการวิเคราะห์ต่าง ๆ ในปัจจุบันได้รับการพัฒนาและสามารถเป็นเครื่องมือในการพิจารณาตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมและสะดวกในการประยุกต์ใช้ รวมทั้งได้รับการยอมรับและอ้างอิงในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น ฟังก์ชัน `auto.arima()` ซึ่งได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้ในการพิจารณาตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสม [6],[9],[14–16]

การพิจารณาตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อค้นหาตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ในฟังก์ชัน `auto.arima()` ของโปรแกรม R [13] โดยได้รับการยอมรับและอ้างอิงในงานวิจัยต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมที่สุดใช้เกณฑ์สารสนเทศอะกัยเคสำหรับจำนวนชุดตัวอย่างขนาดเล็ก (Akaike information criterion for small sample size; AICc) ที่น้อยที่สุด

แต่เนื่องจากตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละชุดข้อมูลอนุกรมเวลาของการสร้างตัวแบบมีลำดับที่แตกต่างกันรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ที่เปลี่ยนแปลงไป จึงไม่สามารถระบุลำดับที่จะสอดคล้องและเหมาะสมเพียงตัวแบบใดตัวแบบหนึ่งที่เหมาะสมกับการสร้างตัวแบบในทุกชุดข้อมูล จึงเป็นเรื่องที่ยาก ส่งผลให้ใช้การนำเสนอเพียงตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมจากอัลกอริทึมการพิจารณาตัวแบบที่เหมาะสมแทนการระบุตัวแบบอาร์มาที่มีการระบุลำดับ (ARIMA(p,d,q)) โดยกำหนดสัญลักษณ์ ARIMA แทนตัวแบบอาร์มาในส่วนของนำเสนอผลการวิจัย [17]

3.2 ตัวแบบผสมระหว่างโพลต์และซัพพอร์ตเวกเตอร์เรกเรชัน

ตัวแบบผสมที่นำเสนอพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายคุณลักษณะของข้อมูลอนุกรมเวลาให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยประยุกต์ใช้หลักการลดความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบด้วยการประยุกต์ใช้ตัวแบบโพลต์ในการอธิบายลักษณะรูปแบบของข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งระดับและแนวโน้ม ในขณะที่เดียวกัน ตัวแบบซัพพอร์ต

และไม่เป็นเชิงเส้นตรงเพื่ออธิบายค่าส่วนเหลือของตัวแบบโพลต์ที่เหมาะสม สำหรับการลดความผิดพลาดของการพยากรณ์ลงอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ช่วยความผิดพลาดจากการพยากรณ์ของตัวแบบโพลต์ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

- 1) กำหนดขนาดข้อมูลป้อนเข้าเริ่มต้นของข้อมูลส่วนเหลือที่เหมาะสมของตัวแบบโพลต์เท่ากับ 1 ค่า
- 2) กำหนดค่าพารามิเตอร์ C เริ่มต้นของตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์เรกเรชันเท่ากับ 0.01
- 3) กำหนดค่าพารามิเตอร์ γ เริ่มต้นเท่ากับ 0.01
- 4) การประยุกต์ใช้ตัวแบบโพลต์เพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายข้อมูลอนุกรมด้วยสมการที่ (1) ถึง (3) ด้วยการพิจารณาตัวแบบที่เหมาะสมจากผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนและให้ค่าส่วนเหลือที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบโพลต์ หลังจากนั้นประยุกต์ใช้ตัวแบบโพลต์ที่เหมาะสมที่สุดพยากรณ์ค่าล่วงหน้า 1 ช่วงเวลา โดยสามารถอธิบายสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (14) ดังนี้

$$y_t = \hat{y}_t + R_t \quad (14)$$

เมื่อ y_t คือ ค่าข้อมูลอนุกรมเวลาของปริมาณการส่งออก กุ้งขาว ณ เวลาที่ t

$\hat{y}_t$ คือ ค่าพยากรณ์ที่เหมาะสมของตัวแบบโพลต์ ณ เวลาที่ t

R_t คือ ค่าส่วนเหลือของตัวแบบโพลต์ที่เหมาะสม ณ เวลาที่ t

- 5) จัดเรียงข้อมูลอนุกรมเวลาของค่าส่วนเหลือของตัวแบบโพลต์ที่เหมาะสมให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ดังสมการที่ (15) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} R_{m+1} & R_{m+2} & R_{m+3} & \cdots & R_{2m} \\ R_{m+2} & R_{m+3} & R_{m+4} & \cdots & R_{2m+1} \\ R_{m+3} & R_{m+4} & R_{m+5} & \cdots & R_{2m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{t-m+1} & \cdots & R_{t-2} & R_{t-1} & R_t \end{bmatrix} \quad (15)$$

เมื่อ R_t คือ ค่าส่วนเหลือของตัวแบบโพลต์ที่เหมาะสม ณ เวลาที่ t

6) ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน [18] อธิบายค่าส่วนเหลือที่ได้จากตัวแบบโสดตามรูปแบบการจัดข้อมูลอนุกรมเวลาของค่าส่วนเหลือ ซึ่งคอลัมน์สุดท้ายกำหนดให้เป็นข้อมูลที่ต้องการพยากรณ์ (Target data) และคอลัมน์ที่เหลือใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้า (Input data) เพื่อสร้างตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันที่เหมาะสมด้วยสมการที่ (16) ถึง (17) และพยากรณ์ค่าส่วนเหลือที่เหมาะสม

$$f(x) = \sum_{i=1}^T (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + b \quad (16)$$

$$K(x, x_i) = \exp(-\gamma |x - x_i|^2) \quad (17)$$

เมื่อ α_i และ α_i^* คือ ค่าของลากรางจ์

b คือ ค่าเอนเอียง

γ คือ ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันเรเดียลเบสิก (Radial basis function)

7) รวมผลการพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบโสดและตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันดังสมการที่ (18)

$$y_{t+1} = \hat{y}_{t+1} + \hat{R}_{t+1} + \varepsilon_{t+1} \quad (18)$$

เมื่อ $\hat{y}_{t+1}$ คือ ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบโสด

$\hat{R}_{t+1}$ คือ ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน

y_{t+1} และ ε_{t+1} คือ ค่าข้อมูลอนุกรมเวลาและค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลาที่ $t+1$ ตามลำดับ

8) ดำเนินการเพิ่มค่า γ ที่ละ 0.01 และดำเนินการข้อ 4)

ถึง 7) จนกระทั่งค่า γ ถึง 0.15 จึงหยุดเพิ่มค่า γ

9) ดำเนินการปรับค่า C ที่ละ 0.01 และดำเนินการข้อ 3)

ถึง 7) จนกระทั่งค่า C ถึง 380 จึงหยุดเพิ่มค่า C

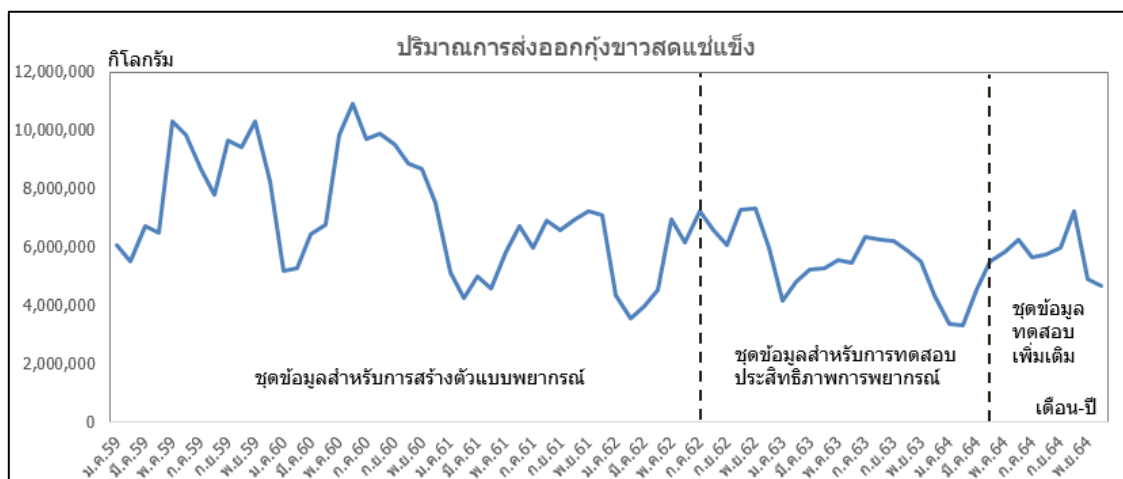
10) ดำเนินการปรับค่า ขนาดของข้อมูลป้อนเข้าของส่วนเหลือที่เหมาะสมของตัวแบบโสดที่ละ 1 และดำเนินการข้อ 2) ถึง 7) จนกระทั่งค่าป้อนเข้าเท่ากับ 14 จึงหยุดการดำเนินการ

การลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบใช้การพิจารณาการลดความคลาดเคลื่อนของร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเพื่อเป็นเป้าหมายของการปรับตัวแบบผสมที่เหมาะสม

โดยกำหนดสัญลักษณ์ Proposed model แทนตัวแบบผสมระหว่างตัวแบบโสดและตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน เพื่อความกระชับในส่วนของการนำเสนอผลการวิจัย

3.3 การประเมินประสิทธิภาพการพยากรณ์

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการพยากรณ์ของตัวแบบพยากรณ์ต่าง ๆ ใช้การทดสอบแบบไขว้ (Cross-validation) โดยแบ่งชุดข้อมูลอนุกรมเวลาของปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งออกเป็น 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ประมาณร้อยละ 60 (ม.ค. 59–ก.ค. 62) ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบประมาณร้อยละ 28 (ส.ค. 62–มี.ค. 64) และชุดข้อมูลนอกเหนือจากทั้งสองชุดแรกประมาณร้อยละ 12 (เม.ย. 64–ธ.ค. 64) ตามลำดับ



รูปที่ 2 การแบ่งชุดข้อมูลเพื่อสร้างและทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์

โดยตัวแบบพยากรณ์ต่าง ๆ จะสร้างจากชุดข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์เพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพยากรณ์ล่วงหน้า 1 ช่วงเวลา ภายหลังจากการพยากรณ์จะเปิดเผยค่าแรกของชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบเพื่อคำนวณค่าความผิดพลาดของการพยากรณ์ของแต่ละตัวแบบ เมื่อค่าแรกของชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบเปิดเผยจะถูกรวมเข้ากับชุดข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์เดิมเพื่อปรับปรุงข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ให้ทันสมัยเพื่อพยากรณ์ค่าล่วงหน้า 1 ช่วงเวลาถัดไป เพื่อเปรียบเทียบและคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าจริง ซึ่งจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงค่าสุดท้ายของชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบเพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย โดยการดำเนินการนี้เป็นการทดสอบแบบไขว้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์ค่าในอนาคตของตัวแบบต่าง ๆ ตัวแบบพยากรณ์ที่ให้ค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดในหลาย ๆ เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพย่อมเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการอธิบายข้อมูลอนุกรมเวลามากที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ตัวแบบดังกล่าวมีความแม่นยำในการพยากรณ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวแบบพยากรณ์อื่น ๆ

นอกจากนี้ ชุดข้อมูลนอกเหนือจากทั้งสองชุดแรกใช้ทดสอบและยืนยันความสามารถในการพยากรณ์ค่าที่มองไม่เห็นในอนาคตของตัวแบบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้จากการทดสอบแบบไขว้ โดยจะดำเนินการคล้ายกับการทดสอบแบบไขว้ คือ การใช้ข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์เดิมและข้อมูลสำหรับทดสอบตัวแบบพยากรณ์ที่ถูกเฉลยแล้วรวมเข้าเป็นข้อมูลชุดใหม่ทีปรับปรุงให้ทันสมัยและสอดคล้องกับการพยากรณ์ล่วงหน้า 1 ช่วงเวลาของค่าแรกของชุดข้อมูลที่ซ่อนไว้และอยู่นอกเหนือจากทั้งสองชุดข้อมูลแรก และเมื่อค่าแรกของชุดข้อมูลนี้ถูกเฉลยเพื่อคำนวณค่าความผิดพลาดของการพยากรณ์ ค่าดังกล่าวจะถูกนำมารวมกับชุดข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบเดิมเพื่อปรับปรุงและสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อพยากรณ์ค่าล่วงหน้า 1 ช่วงเวลา ซึ่งจะ

ดำเนินการวนซ้ำจนกระทั่งพยากรณ์ค่าสุดท้ายของชุดข้อมูลที่ซ่อนไว้ เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของเกณฑ์ความผิดพลาดทั้ง 5 เกณฑ์ ดังสมการที่ (19) ถึง (23) สำหรับการยืนยันความคงเส้นคงวาของประสิทธิภาพการพยากรณ์

3.4 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพการพยากรณ์

3.4.1 ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|}{n} \quad (19)$$

3.4.2 รากของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{n}} \quad (20)$$

3.4.3 ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| / y_t}{n} \times 100 \quad (21)$$

3.4.4 ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยแบบสมมาตร

$$sMAPE = \frac{\sum_{t=1}^n 2 \times |y_t - \hat{y}_t| / (y_t + \hat{y}_t)}{n} \times 100 \quad (22)$$

3.4.5 ความคลาดเคลื่อนเชิงระดับของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย

$$MASE = \frac{\frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|}{n}}{\frac{\sum_{j=2}^J |y_j - y_{j-1}|}{J-1}} \quad (23)$$

เมื่อ $\hat{y}_t$ และ y_t คือ ค่าพยากรณ์และค่าข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลาที่ t ของชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ
 y_j คือ ค่าข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลาที่ j ของชุดข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบ

4. ผลการวิจัยและการอภิปราย

หากใช้ชุดข้อมูลตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ก.ค. 62 จำนวน 43 ค่าข้อมูลอนุกรมเวลา ตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสม คือ $ARIMA(1,0,0)(0,1,0)_{12}$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ดังรูปที่ 3

```
Best model: ARIMA(1,0,0) (0,1,0) [12]
Series: data
ARIMA(1,0,0) (0,1,0) [12]
Coefficients:
    ar1
    0.8279
s.e.    0.0911
sigma^2 estimated as 9.34e+11: log likelihood=-471.28
AIC=946.56 AICc=946.99 BIC=949.43
```

รูปที่ 3 ตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ก.ค. 62

ในขณะที่เมื่อทราบค่าลำดับแรกของชุดทดสอบภายหลังจากการเฉลี่ยเพื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อน จึงนำเข้าร่วมกับชุดข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบเดิมเพื่อปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัยสำหรับสร้างตัวแบบเพื่อพยากรณ์ค่าล่วงหน้าถัดไป โดยได้ตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสม คือ $ARIMA(1,0,0)(0,1,0)_{12}$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ดังรูปที่ 4

```
Best model: ARIMA(1,0,0) (0,1,0) [12]
Series: data
ARIMA(1,0,0) (0,1,0) [12]
Coefficients:
    ar1
    0.8105
s.e.    0.0930
sigma^2 estimated as 9.689e+11: log likelihood=-487.02
AIC=978.05 AICc=978.46 BIC=980.98
```

รูปที่ 4 ตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62

โดยผลการพิจารณาตัวแบบอาร์มาที่เหมาะสมพบว่า ตัวแบบอาร์มาเดิมที่เหมาะสมในชุดข้อมูลแรกไม่สามารถอธิบายชุดข้อมูลที่ปรับปรุงใหม่ให้ทันสมัยกับการพยากรณ์ล่วงหน้าในช่วงถัดไปได้

ตัวแบบโฮลต์สำหรับชุดข้อมูลตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ก.ค. 62 จำนวน 43 ค่าข้อมูลอนุกรมเวลา ตัวแบบที่เหมาะสมดังรูปที่ 5

```
Model Information:
Holt's method

Call:
holt(y = data)

Smoothing parameters:
alpha = 0.9999
beta  = 0.0307

Initial states:
l = 6238668.4845
b = 430772.6143

sigma: 1479492

AIC    AICc    BIC
1389.353 1390.975 1398.159
```

รูปที่ 5 ตัวแบบโฮลต์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ก.ค. 62

ในขณะที่เมื่อมีการปรับปรุงข้อมูลอนุกรมเวลาให้ทันสมัย ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแบบโฮลต์มีการปรับเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 6

```
Model Information:
Holt's method

Call:
holt(y = data)

Smoothing parameters:
alpha = 0.9999
beta  = 0.033

Initial states:
l = 6238668.9053
b = 430772.7009

sigma: 1466559

AIC    AICc    BIC
1421.772 1423.351 1430.693
```

รูปที่ 6 ตัวแบบโฮลต์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62

ถึงแม้ค่าสัมประสิทธิ์จะใกล้เคียงเดิมแต่ก็ไม่ได้คงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดการปรับปรุงชุดข้อมูลใหม่ ตัวแบบโฮลต์ที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลใหม่จะเกิดการปรับเปลี่ยน ซึ่งการเขียนสมการตัวแบบโฮลต์ที่ระบุค่าสัมประสิทธิ์แบบคงที่อาจไม่สามารถอธิบายข้อมูลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามการปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัยได้

สำหรับตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงบวกสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ก.ค. 62 ดังรูปที่ 7

```
Model Information:
Holt-Winters' additive method

Call:
hw(y = data, seasonal = "additive")

Smoothing parameters:
alpha = 0.6164
beta  = 1e-04
gamma = 1e-04

Initial states:
l = 8430750.327
b = -13007.2079
s = 526799.7 1548427 1146922 1265765 793272.9 660441.4
1706590 805179.2 -1656874 -1720020 -2779906 -2296597

sigma: 877929.8

AIC    AICc    BIC
1352.659 1377.139 1382.599
```

รูปที่ 7 ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงบวกที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ก.ค. 62

แต่เมื่อปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัย ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงบวกกลับเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 8

```

Model Information:
Holt-Winters' additive method

Call:
hw(y = data, seasonal = "additive")

Smoothing parameters:
alpha = 0.6063
beta = 1e-04
gamma = 1e-04

Initial states:
l = 8433275.6073
b = -11966.1146
s = 515713.3 1537340 1135835 1254679 782186.7 649355.1
      1695803 778228 -1667960 -1731106 -2657956 -2291818

sigma: 864797.2

      AIC      AICc      BIC
1383.899 1407.137 1413.930

```

รูปที่ 8 ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงบวกที่เหมาะสม
สำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62

ซึ่งตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงบวกเดิมที่เหมาะสมกับ
ข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62 ไม่สามารถอธิบาย
ข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62 ได้อย่างเหมาะสม
โดยตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงคูณที่เหมาะสมสำหรับ
ข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62 ดังรูปที่ 9

```

Model Information:
Holt-Winters' multiplicative method

Call:
hw(y = data, seasonal = "multiplicative")

Smoothing parameters:
alpha = 0.4796
beta = 0.0022
gamma = 4e-04

Initial states:
l = 8595350.2273
b = -27152.2158
s = 1.0189 1.1452 1.1209 1.1602 1.1166 1.1094
      1.2448 1.1863 0.8 0.7884 0.6236 0.6857

sigma: 0.1163

      AIC      AICc      BIC
1345.169 1369.649 1375.110

```

รูปที่ 9 ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงคูณที่เหมาะสม
สำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62

ซึ่งตัวแบบโฮลต์วินเทอร์ที่เหมาะสมกับชุดข้อมูล
อนุกรมเวลาที่มีการปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัยกลับให้ค่า
สัมประสิทธิ์ที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 10

```

Model Information:
Holt-Winters' multiplicative method

Call:
hw(y = data, seasonal = "multiplicative")

Smoothing parameters:
alpha = 0.6843
beta = 3e-04
gamma = 3e-04

Initial states:
l = 8615484.7952
b = -28359.4699
s = 1.062 1.1952 1.1324 1.1417 1.0757 1.1048
      1.2156 1.1916 0.807 0.7756 0.6151 0.6834

sigma: 0.1103

      AIC      AICc      BIC
1372.117 1395.656 1402.449

```

รูปที่ 10 ตัวแบบโฮลต์วินเทอร์แบบเชิงคูณที่เหมาะสม
สำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาตั้งแต่ ม.ค. 59 ถึง ส.ค. 62

สำหรับตัวแบบผสมที่นำเสนอใช้การประยุกต์ใช้ตัวแบบ
โฮลต์ที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบในแต่ละ
ช่วงเวลาที่ผ่านมาการปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัยเพื่อใช้เป็น
ข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับ
การพยากรณ์ไปข้างหน้า 1 เดือนล่วงหน้า แล้วจึงใช้ตัวแบบ
ซัพพอร์ตเวกเตอร์เรกเรชันที่มีจำนวนข้อมูลป้อนเข้า 13 ค่า
และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ C และ γ เท่ากับ 379.06 และ 0.15
ตามลำดับ เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์อธิบายค่าส่วนเหลือ
ที่ได้จากตัวแบบโฮลต์ที่เหมาะสม เพื่อลดความผิดพลาดของ
ตัวแบบโฮลต์อย่างเป็นระบบ

จากการสร้างและทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์
ของตัวแบบพยากรณ์ต่าง ๆ ด้วยชุดข้อมูลสำหรับการสร้าง
และทดสอบตัวแบบพบว่า ตัวแบบผสมที่นำเสนอให้ผล
การพยากรณ์ที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับปริมาณการ
ส่งออกกุ้งขาวแช่แข็งมากกว่าตัวแบบพยากรณ์อื่น ๆ ที่บาง
สถานการณ์ให้ค่าความผิดพลาดค่อนข้างชัดเจน เช่น ช่วง
การส่งออกในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ถึงเดือน
กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564 ตัวแบบพยากรณ์ต่าง ๆ ให้ค่าที่
เบี่ยงเบนจากข้อมูลปริมาณการส่งออกจริงค่อนข้างมาก
ยกเว้นตัวแบบผสมที่นำเสนอที่ยังคงให้ค่าพยากรณ์ที่
สอดคล้องและใกล้เคียงกับปริมาณการส่งออกจริง ดัง
แสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวแช่แข็ง

ซึ่งการพิจารณาค่าความผิดพลาดของการพยากรณ์ด้วย
เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ 5 เกณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความผิดพลาดของตัวแบบพยากรณ์

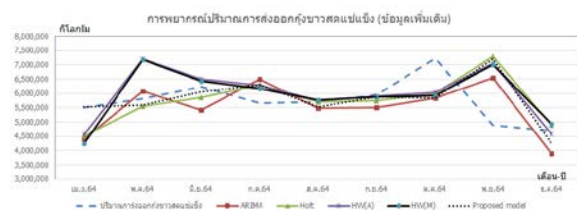
ตัวแบบ	MAE*	MAPE	RMSE*	sMAPE	MASE
ARIMA	66.14	12.57	83.53	12.70	0.62
Holt	64.06	12.71	83.06	12.16	0.61

ตารางที่ 1 ค่าความผิดพลาดของตัวแบบพยากรณ์ (ต่อ)

ตัวแบบ	MAE*	MAPE	RMSE*	sMAPE	MASE
HW(A)	70.71	14.09	89.47	14.69	0.67
HW(M)	62.57	11.70	82.05	11.33	0.59
Proposed model	53.02	9.90	69.12	9.80	0.50

หมายเหตุ * คือ หน่วย 10,000 กิโลกรัม

นอกจากนี้ ชุดข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมที่อยู่นอกเหนือจากชุดข้อมูลทั้งการสร้างและทดสอบตัวแบบพยากรณ์ใช้สำหรับยืนยันประสิทธิภาพของตัวแบบพยากรณ์ที่นำเสนอ เพื่อบ่งชี้การคงประสิทธิภาพของการพยากรณ์ค่าที่มองไม่เห็นในอนาคต ถึงแม้ใช้ชุดข้อมูลใหม่เพิ่มเติมดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การพยากรณ์ข้อมูลเพิ่มเติม

ซึ่งผลการประเมินประสิทธิภาพการพยากรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความผิดพลาดของตัวแบบพยากรณ์เพิ่มเติม

ตัวแบบ	MAE*	MAPE	RMSE*	sMAPE	MASE
ARIMA	83.91	14.93	95.38	15.06	0.79
Holt	70.67	12.75	100.20	12.01	0.67
HW(A)	75.14	13.42	102.39	12.51	0.71
HW(M)	78.96	14.11	105.25	13.45	0.75
Proposed model	60.24	10.90	93.81	10.12	0.57

หมายเหตุ * คือ หน่วย 10,000 กิโลกรัม

จากผลการประเมินประสิทธิภาพตัวแบบพยากรณ์ต่าง ๆ พบว่าตัวแบบพยากรณ์ทั้งหมดมีค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามเกณฑ์การวัดประสิทธิภาพส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม

ตาม ตัวแบบผสมที่นำเสนอยังคงให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวแบบพยากรณ์อื่น ๆ และใกล้เคียงกับประสิทธิภาพที่ทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบ

5. สรุปผลการวิจัย

จากการประเมินประสิทธิภาพทั้งหมดภายใต้วิธีการทดสอบแบบไขว้และชุดข้อมูลเพิ่มเติมที่ถูกปิดบังไว้เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์ค่าที่มองไม่เห็นในอนาคตพบว่า ตัวแบบผสมที่นำเสนอมีความแม่นยำมากที่สุด [19] เมื่อเทียบกับตัวแบบพยากรณ์อื่น ๆ รวมทั้งยังคงให้ประสิทธิภาพการพยากรณ์ที่ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในขั้นตอนการทดสอบแบบไขว้ ถึงแม้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงสามารถกล่าวได้ว่า วิธีการลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบของตัวแบบไฮลด์ที่มีสมการที่สามารถอธิบายได้เพียงการเปลี่ยนแปลงของระดับและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันสามารถเพิ่มความถูกต้องของการพยากรณ์ได้มากยิ่งขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันสามารถช่วยอธิบายลักษณะรูปแบบของอิทธิพลที่เหลืออยู่ในค่าส่วนเหลือจากตัวแบบไฮลด์ได้เหมาะสมยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับตัวแบบไฮลด์วันเทอร์ ซึ่งเหมาะสำหรับการพยากรณ์ระยะสั้นล่วงหน้า 1 เดือน

ด้วยเหตุนี้ ตัวแบบผสมที่นำเสนอสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งรายเดือน เพื่อใช้เป็นสารสนเทศประกอบการวางแผนการผลิตและการเก็บเกี่ยวผลผลิต เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาดการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งที่กำลังจะเกิดขึ้น

สำหรับงานวิจัยในส่วนถัดไปจะเป็นการพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมของส่วนประกอบที่ได้จากตัวแบบไฮลด์และซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถให้ผลการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำเพิ่มมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics, "Marine shrimp farming," in *Information of agricultural commodities*

- 2021, Bangkok, Thailand: Office of Agricultural Economics, 2022. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2565/commodity2564.pdf>
- [2] Frozen white shrimp export, Office of Agricultural Economics, Apr. 1, 2022. [Online]. Available: <https://impexpth.oae.go.th/export>.
- [3] Office of Agricultural Economics, "Export value of shrimps and product by trading partner, 2018-2020," in *Thailand foreign agricultural trade statistics 2021*, Bangkok, Thailand: Office of Agricultural Economics, 2022. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2565/trade2564.pdf>.
- [4] Office of Agricultural Economics, "Shrimp," in *Situation of agricultural commodities and trend 2022*, Bangkok, Thailand: Office of Agricultural Economics, 2022. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2565/trendstat2565-Final-Download.pdf>.
- [5] E. Rattanapun, "Cost and returns of pacific white shrimp", Surat Thani Fisheries Provincial Office, Surat Thani, Thailand, Technical Paper No. 1/2019, Apr. 2, 2019. [Online]. Available: https://hectortarr.arda.or.th/api/uploaded_file/ZJbM_14S_9I05ZOV0IsiB.
- [6] T. W. Yoo and I. S. Oh, "Time series forecasting of agricultural products' sales volumes based on seasonal long short-term memory," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, 2020, Art. no. 8169, doi: 10.3390/app10228169.
- [7] Y. Ensafi, S. H. Amin, G. Zhang and B. Shah, "Time-series forecasting of seasonal items sales using machine learning—A comparative analysis," *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 2, no. 1, 2022, Art. no. 100058, doi: 10.1016/j.jjime.2022.100058.
- [8] K. Kurumatani, "Time series forecasting of agricultural product prices based on recurrent neural networks and its evaluation method". *SN Applied Sciences*, vol. 2, pp.1–17, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03225-9.
- [9] S. K. Purohit, S. Panigrahi, P. K. Sethy and S. K. Behera, "Time series forecasting of price of agricultural products using hybrid methods," *Applied Artificial Intelligence*, vol. 35, no.15, pp.1388–1406, 2021, doi: 10.1080/08839514.2021.1981659.
- [10] Y. Zhu, Y. Zhao, J. Zhang, N. Geng and D. Huang, (2019). "Spring onion seed demand forecasting using a hybrid Holt-Winters and support vector machine model," *PloS one*, vol. 14, no.7, 2019, Art. no. e0219889, doi: 10.1371/journal.pone.0219889.
- [11] S. Wu, H. Han, B. Hou and K. Diao, "Hybrid model for short-term water demand forecasting based on error correction using chaotic time series," *Water*, vol. 12, no. 6, 2020, Art. no. 1689, doi: 10.3390/w12061683.
- [12] M. Devi, J. Kumar, D. P. Malik and P. Mishra, "Forecasting of wheat production in Haryana using hybrid time series model," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 5, 2021, Art. no. 100175, doi: 10.1016/j.jafr.2021.100175.
- [13] R. J. Hyndman, G. Athanasopoulos, C. Bergmeir, G. Caceres, L. Chhay, K. Kuroptev and M. O'Hara-Wild, *Package 'forecast'*, Accessed: Mar. 2022. [Online]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/forecast/forecast.pdf>.
- [14] S. Mohan, A. K. Solanki, H. K. Taluja and A. Singh, "Predicting the impact of the third wave of COVID-19 in India using hybrid statistical machine learning models: A time series forecasting and sentiment analysis approach," *Computers in Biology and Medicine*, vol.144, 2022, Art. no. 105354, doi: 10.1016/j.compbiomed.2022.105354.

- [15] H. Alabdulrazzaq, M. N. Alenezi, Y. Rawajfih, B. A. Alghannam, A. A. Al-Hassan and F. S. Al-Anzi, "On the accuracy of ARIMA based prediction of COVID-19 spread," *Results in Physics*, vol. 27, 2021, Art. no. 104509, doi: 10.1016/j.rinp.2021.104509.
- [16] G. Dudek and P. Pelka, "Pattern similarity-based machine learning methods for mid-term load forecasting: A comparative study," *Applied Soft Computing*, vol.104 , 2021, Art. no. 107223, doi: 10.1016/j.asoc.2021.107223.
- [17] T. Sujjaviriyasup, "Hybrid Model of Support Vector Machine and Genetic Algorithm for Forecasting the Annual Peak Electricity Demand of Thailand," *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 3, pp.453–465, 2017.
- [18] D. Meyer, E. Dimitriadou, K. Hornik, A. Weingessel, F. Leisch, C. -C. Chang and C. -C Lin, *Package 'e1071'*, Accessed: Mar. 2022. [Online]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/e1071/e1071.pdf>.
- [19] N. Wei, C. Li, X. Peng, F. Zeng and X. Lu, (2019). "Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 181, 2019, Art. no. 106187, doi: 10.1016/j.petrol.2019.106187.

การประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนาพร้อมกับวิธีการหาค่า
เหมาะสมของวาฬหลังค่อมสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีช่วงเวลายืดหยุ่น

Hybrid Coronavirus Herd Immunity Optimizer with Whale Optimization

Algorithm for Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows

ศิริชัย ยศวังใจ^{1,*} และ กิตติพงษ์ ม้าลำพอง²

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

²โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Sirichai Yodwangjai^{1,*} and Kittipong Malampong²

¹Department of Industrial Engineering, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800, Thailand

²Thai-German Pre-Engineering School, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800, Thailand

*Corresponding Author E-mail: sirichai.y@cit.kmutnb.ac.th

Received: Oct 05, 2022; Revised: Nov 29, 2022; Accepted: Dec 13, 2022

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งแบบมีช่วงเวลารับสินค้า (Vehicle Routing Problem with Time Windows: VRPTW) เป็นหนึ่งในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial Optimization Problem) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหากลุ่มของเส้นทางที่ขนพาหนะเดินทางไปบริการลูกค้าตามจำนวนความต้องการสินค้าภายในช่วงเวลารับสินค้า บทความนี้นำเสนอการประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนาพร้อมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมของวาฬหลังค่อม (Hybrid Coronavirus Herd Immunity Optimizer with Whale Optimization Algorithm: HCHIO-WOA) สำหรับแก้ปัญหา VRPTW วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนา (CHIO) เลียนแบบกลไกการเว้นระยะห่างทางสังคมในการสร้างภูมิคุ้มกัน พารามิเตอร์ของวิธี CHIO ถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่เชื้อ และเกณฑ์อายุสูงสุดของการติดเชื้อ วิธีเรียงลำดับค่ามากใช้สร้างตัวแทนคำตอบเริ่มต้น ในกรณี que จำนวนมีค่ามากกว่าอัตราการแพร่เชื้อ วิธีการหาค่าเหมาะสมของวาฬหลังค่อมถูกใช้ในการสร้างคำตอบใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงการติดคำตอบท้องถิ่น วิธีการปรับปรุงคำตอบประกอบด้วยวิธีสองตัวดำเนินการ (2-Operator) วิธีการแลกเปลี่ยนแบบแลมด้า (Lambda-Interchange) และวิธีการสลับสายพันธุ์แบบเปลี่ยนขอบ (Alternating Edges Crossover) วิธีการที่เสนอนำไปทดสอบกับโจทย์ปัญหาเทียบเคียงของโซโลมอนที่มีขนาดลูกค้าต่างกันและเปรียบเทียบกับวิธีที่ผ่านมา ผลการทดลองพบว่า วิธี HCHIO-WOA มีค่าเฉลี่ยของค่าคำตอบมากกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Best Known Solution) ในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงขนาดเล็กและขนาดกลางที่ 0.32 เปอร์เซ็นต์ และ 2.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และโจทย์ปัญหาเทียบเคียงขนาดใหญ่มีค่าคำตอบที่ดีที่สุดจำนวน 9 ข้อ จากทั้งหมด 11 ข้อ และมีค่าคำตอบมากกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุด 0.08 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนา, วิธีการหาค่าเหมาะสมของวาฬหลังค่อม, ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง, ช่วงเวลารับสินค้า

Abstract

Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) is one of the combinatorial optimization problems that objective is to find the optimal set of routes for a fleet of vehicles to service a set of customers, a given set of demands within time window. This paper presents the hybrid the Coronavirus Herd Immunity Optimizer with Whale Optimization Algorithm (HCHIO-WOA) for solving VRPTW. The Coronavirus Herd Immunity Optimizer (CHIO) mimics the mechanism the social distancing in the herd immunity strategy. The parameters of CHIO are controlled by basic reproduction rate (BR_r) and maximum age of infected cases (Max_{Age}). The Largest Rank Value (LRV) is used for generating the initial solution. In other case, the random number is larger than BR_r that WOA is used for selecting the new solution to avoid trapped in local optimal. The local search comprised 2-Operator, Lambda-Interchange method and Alternating Edges Crossover (AEX) for solution improvement. The proposed method has been tested in Solomon instance in different size problems and compared with other existing algorithms. The experiment result shows that the average gap of HCHIO-WOA is larger than Best Known Solution for small and medium problems which are 0.32% and 2.06%, respectively. The large problem found 9 out of 11 instances in Best Known Solution that is large value at 0.08%.

Keywords: Coronavirus Herd Immunity Optimizer, Whale Optimization Algorithm, Vehicle Routing Problem, Time Windows

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นปัญหาที่สำคัญในการขนส่ง การกระจายสินค้า และระบบโลจิสติกส์ แต่เดิม Dantzig and Ramser [1] ได้ศึกษาปัญหาการเดินทางของยานพาหนะที่พิจารณาความต้องการสินค้าและปริมาณความจุของยานพาหนะ ปัญหา VRP มีข้อจำกัดหลักอยู่ 3 ข้อ ประกอบด้วย ยานพาหนะเมื่อออกจากคลังสินค้าจะต้องกลับเข้าคลังสินค้าตามเดิม ลูกค้านี้ได้รับสินค้าทั้งหมดครั้งเดียวจากการขนส่งด้วยยานพาหนะคันเดียวเท่านั้น และปริมาณสินค้านั้นรวมทั้งหมดแล้วไม่เกินความจุของยานพาหนะ ช่วงเวลาในการรับสินค้าของลูกค้า (Time Windows) เป็นหนึ่งในข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจริงในภาคอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากแต่ละอุตสาหกรรมจะมีเวลาในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น 8 ชั่วโมง 16 ชั่วโมง หรือ 24 ชั่วโมง ต่อ 1 วัน โดยวัตถุดิบที่นำเข้ามาใช้ในการผลิตจะต้องสอดคล้องกับเวลาทำการผลิตสินค้า โดยลูกค้าแต่ละรายจะมีช่วงเวลาในการรับสินค้าที่แตกต่างกัน การจัดส่งสินค้าให้กับลูกค้าแต่ละรายที่กระจายอยู่รอบ

คลังสินค้าถือเป็นหน้าที่หลักของผู้วางแผนจัดเส้นทางให้ยานพาหนะเดินทาง เพื่อให้มีต้นทุนการขนส่งที่ต่ำที่สุด หรือระยะทางขนส่งที่สั้นที่สุด ช่วงเวลารับสินค้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ช่วงเวลายืดหยุ่น (Soft Time Windows) เป็นเงื่อนไขที่ยอมให้ยานพาหนะเดินทางมาถึงตำแหน่งลูกค้าก่อนเวลารับสินค้า แต่ต้องจอดรอจนกว่าจะถึงช่วงเวลาเริ่มต้นของการรับสินค้าและไม่มีการคิดค่าปรับในการจอดรอคอย และอีกรูปแบบหนึ่งเป็นช่วงเวลาเคร่งครัด (Hard Time Windows) ซึ่งยานพาหนะจำเป็นต้องเดินทางมาถึงตำแหน่งลูกค้าและพร้อมให้บริการภายในช่วงเวลาในการรับสินค้าเท่านั้น ในบางกรณีทั้งช่วงเวลายืดหยุ่นและเคร่งครัดร่วมกันในลูกค้าแต่ละราย [2-4]

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีช่วงเวลาในการรับสินค้า (Vehicle Routing Problem: VRPTW) มีการพัฒนาออกไป 2 แนวทาง คือ การพัฒนาลักษณะของปัญหา และการพัฒนาของวิธีการแก้ปัญหา ส่วนของลักษณะปัญหาจะคิดค่าปรับเมื่อละเมิดข้อจำกัดด้านเวลา [5] การผสมกันของช่วงเวลารับสินค้า [3] หรือมีการเพิ่มเป็นหลายวัตถุประสงค์ [6] ในอีกแนวทางหนึ่งของวิธีการแก้ปัญหา VRPTW

เนื่องจากเป็นปัญหาที่อยู่ในกลุ่มปัญหาเอ็นพีฮาร์ด (NP-Hard Problem) จะใช้วิธีการแม่นยำ (Exact method) แก้ไขปัญหาขนาดเล็ก เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นมีการพัฒนาวิธีฮิวริสติก (Heuristic) จนไปถึงวิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristics) วิธีการที่นิยมนำมาแก้ปัญหประกอบด้วย วิธีอบเหนียวจำลอง (Simulated Annealing) [7] วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) [8] วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) [9] วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [10] วิธีอาณานิคมผึ้งเทียม (Artificial Bee Colony Algorithm: ABC) [11] และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) [12] เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นมีการพัฒนาวิธีหาค่าตอบร่วมกันมากกว่า 1 วิธี [13] กระบวนการค้นหาคำตอบในแต่ละวิธีจะมีลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน โดยแต่ละวิธีจะมีกระบวนการค้นหาลักษณะ 2 อย่าง คือ กระบวนการสำรวจ (Exploration Mechanism) กับ กระบวนการค้นหาคำตอบใกล้เคียง (Exploitation Mechanism) ซึ่งสองกระบวนการนี้จะต้องมีความสมดุลกันเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมภายในระยะเวลาที่ต้องการ

ในปี ค.ศ. 2021 [14] มีการพัฒนาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ (Coronavirus Herd Immunity Optimizer: CHIO) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากความต้องการพื้นฐานของมนุษย์ (Human-based Algorithm) ในการป้องกันการติดเชื้อไวรัสโคโรนา วิธีการจะเลียนแบบกลยุทธในการสร้างภูมิคุ้มกันหมู่ โดยใช้อัตราการแพร่กระจายเชื้อไวรัสระหว่างผู้ป่วยกับคนใกล้ชิดเพื่อสร้างภูมิคุ้มกันของแต่ละคนผ่านเงื่อนไขของการเว้นระยะห่างทางสังคม เพื่อควบคุมการระบาดและปกป้องบุคคลที่ไม่มีภูมิคุ้มกัน การเว้นระยะห่างทางสังคมเป็นกระบวนการหนึ่งในการพัฒนาคำตอบที่อยู่แบบ Exploit Mechanism และเมื่ออัตราภูมิคุ้มกันไม่สามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้ก็จะสร้างภูมิคุ้มกันชุดใหม่ขึ้นมาแทนด้วย Exploration Mechanism ส่วนใหญ่วิธี CHIO มีการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้า [15–16] ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ [17–20] ปัญหาเชิงการจัด [21],[22]

และประยุกต์ใช้กับวิธีการอื่น ๆ [23] ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาเป็นที่น่าสนใจ

นอกจากนี้ วิธีการหาค่าเหมาะสมของวาฬหลังค่อม (Whale Optimization Algorithm: WOA) [24] ยังพัฒนามาจากแนวคิดการหาค่าตอบตามความฉลาดของกลุ่ม (Swarm Intelligence Algorithm) ที่เลียนแบบพฤติกรรมกล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม เมื่อพบเหยื่อจะทำการล้อมเหยื่อและโจมตีเหยื่อด้วยฟองอากาศ ซึ่งจะพยายามบีบวงล้อมของเหยื่อและเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อแบบเกลียว เมื่อเหยื่อถูกล่าแล้ววาฬหลังค่อมจะหาเหยื่อใหม่อีกครั้ง กลไกการทำงานของวิธีนี้จะอาศัยตำแหน่งระหว่างวาฬหลังค่อมกับเหยื่อเป็นตำแหน่งของคำตอบ และจะอัปเดตตำแหน่งใหม่เมื่อได้ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการค้นหาคำตอบ จากวิธี WOA พบว่า กลไกการโจมตีเหยื่อด้วยฟองอากาศเป็น Exploit Mechanism และเมื่อวาฬหลังค่อมหาเหยื่อใหม่เป็น Exploration Mechanism งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า วิธี WOA ที่ประยุกต์ร่วมกับวิธีการค้นหาคำตอบอื่น ๆ มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา [25–28] และเมื่อนำวิธีดังกล่าว ร่วมกับวิธีการค้นหาคำตอบหลักอื่น ๆ มีทั้งการประยุกต์ใช้รูปแบบ Exploit Mechanism ในวิธี ABC [29] และรูปแบบ Exploration Mechanism ในวิธีหาคำตอบแบบราเมือก (Slime Mould Algorithm) [30] ผลการทดลองพบว่า การประยุกต์วิธี WOA ร่วมด้วยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการหาคำตอบ

วิธี CHIO นี้ถือเป็นวิธีหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก แต่ค่าอัตราการแพร่เชื้อ (BR_r) และเกณฑ์อายุสูงสุดของการติดเชื้อ (Max_{Age}) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ต้องปรับให้เกิดความสมดุลระหว่าง Exploitation Mechanism กับ Exploration Mechanism ในทางกลับกันวิธี WOA มีจุดเด่นที่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวน 2 ค่า ประกอบด้วยจำนวนวาฬหลังค่อม (N) และจำนวนรอบค้นหาคำตอบ ($MaxIter$) และมีลักษณะพิเศษในการปรับปรุงคำตอบที่สัมพันธ์กันระหว่างรอบการค้นหาคำตอบปัจจุบันกับจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาคำตอบ แต่มีข้อด้อยในการลู่เข้าหาคำตอบช้าและมีโอกาสติดคำตอบท้องถิ่น [31]

ดังนั้น งานวิจัยนี้ทำการแก้ปัญหา VRPTW ด้วยการประยุกต์วิธี CHIO ร่วมกับวิธี WOA และเรียกวิธีดังกล่าวว่า วิธี HCHIO-WOA โดยเบื้องต้นใช้วิธีเรียงลำดับค่ามากในการสร้างตัวแทนคำตอบ ขั้นตอนการหาคำตอบจะใช้ขั้นตอนหลักของวิธี CHIO และใช้วิธี WOA ในขั้นตอนการพัฒนาคำตอบที่ไม่ผ่านเกณฑ์การคัดเลือก แล้วนำไปทดสอบกับโจทย์ปัญหาที่เทียบเคียง ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา VRPTW ได้อย่างเหมาะสม

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปัญหา VRPTW เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial Optimization Problem) ที่ประกอบด้วย 2 เซตย่อย คือ เซตยานพาหนะ และ เซตของลูกค้า ปัญหา VRP สามารถแสดงได้ด้วยกราฟ $G = (V, A)$ ซึ่ง V แทนเซตของจุดลูกค้าทั้งหมด $V = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ A แทนเซตของเส้นเชื่อมระหว่างจุดทั้งหมด $A = \{(v_i, v_j) : 0 \leq i, j \leq n, v_i \text{ เป็นลูกค้าซึ่ง } i = \{1, 2, \dots, N\}\}$ กำหนดให้ v_0 คือ คลังสินค้า และลูกค้า $v_i \in V$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย กลุ่มของดัชนี (Indices) พารามิเตอร์ (Parameters) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) สมการข้อจำกัด (Constraints) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ดัชนีและเซต

i, j แทนหมายเลขลูกค้า

k แทนหมายเลขยานพาหนะ

N เซตของลูกค้า

K เซตของยานพาหนะ

พารามิเตอร์

d_{ij} ระยะทางขนส่งจากลูกค้าที่ i ไปยัง j

t_{ij} เวลาขนส่งจากลูกค้า i ไปยัง j

q_i ปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้าที่ i

Q_k ความจุของยานพาหนะคันที่ k

t_i ระยะเวลาการให้บริการที่ลูกค้า i

e_i เวลาเริ่มต้นของช่วงเวลาในการบริการลูกค้าที่ i

l_i เวลาสิ้นสุดของช่วงเวลาในการบริการลูกค้าที่ i

a_i เวลามาถึงของยานพาหนะที่ตำแหน่งลูกค้าที่ i

w_i เวลารอคอยในการบริการลูกค้าที่ i

M จำนวนบวกที่มีค่ามาก

ตัวแปรตัดสินใจ

$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{ยานพาหนะคันที่ } k \text{ ขนส่งสินค้าจาก } i \text{ ไปยัง } j \\ 0 & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$

st_i เวลาเริ่มต้นในการให้บริการลูกค้าที่ i

แบบจำลอง

$$\text{Min } \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

ข้อจำกัด

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{0jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N q_i x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^N x_{0jk} = \sum_{i=0}^N x_{i0k} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ilk} - \sum_{j=0}^N x_{ljk} = 0 \quad \forall l = 1, \dots, N, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$st_i + t_i + t_{ij} + w_i - M(1 - x_{ijk}) \leq st_j \quad \forall i, j = 1, \dots, N, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (9)$$

$$e_i \leq st_i + w_i \leq l_i \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (10)$$

$$w_i = \max\{e_i - a_i, 0\} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$a_i \leq st_i \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (12)$$

$$st_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (13)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, N, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (14)$$

จากตัวแบบจำลองคณิตศาสตร์ข้างต้น ในสมการที่ (1) แสดงระยะทางรวมทั้งหมดที่ต่ำที่สุด สมการ (2) และ (3) เป็นเงื่อนไขบังคับให้มียานพาหนะเข้าและออกได้เพียงหนึ่งคันสำหรับลูกค้าแต่ละราย สมการ (4) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดว่ายานพาหนะจะต้องเดินทางออกจากคลังสินค้า สมการ (5) เป็นเงื่อนไขบังคับให้ปริมาณสินค้านำรวมที่จะต้องขนส่งต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะ สมการที่

(6)–(7) กำหนดว่ายานพาหนะที่เดินทางออกจากคลังสินค้าจะต้องเดินทางกลับมาสิ้นสุดที่คลังสินค้าเดิม อสมการที่ (8) เป็นเงื่อนไขกำหนดว่ายานพาหนะที่เข้าและออกแต่ละจุดต้องเป็นยานพาหนะคันเดียวกัน อสมการที่ (9) กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มขนส่งสินค้าของลูกค้าที่มีเส้นทางขนส่งต่อเนื่องกัน อสมการที่ (10) กำหนดให้เวลาในการให้บริการต้องเริ่มหลังจากช่วงเวลาเริ่มต้นและไม่เกินหลังจากเวลาที่กำหนด สมการที่ (11) เป็นเงื่อนไขกำหนดเวลาให้บริการ อสมการที่ (12) กำหนดเวลาเริ่มต้นการให้บริการหลังเวลาการมาถึงของยานพาหนะ อสมการที่ (13) และ (14) กำหนดคุณสมบัติของตัวแปรตัดสินใจที่เกี่ยวข้อง

3. การหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนา

วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนาถูกพัฒนามาจากแนวความคิดการป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา อัตราการแพร่เชื้อขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างผู้ป่วยโรคโควิดและบุคคลทั่วไป การเว้นระยะห่างทางสังคมเป็นแนวทางการป้องกันการแพร่เชื้อ โดยในปี 2021 งานวิจัยของ Al-Betar et al. [14] นำเสนอแนวทางการเว้นระยะห่างทางสังคมมาประยุกต์ในการหาค่าคำตอบ โดยแบ่งขั้นตอนการค้นหาคำตอบออกเป็น 6 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพารามิเตอร์ (Initial the CHIO Parameter)

พารามิเตอร์ของวิธี CHIO ประกอบด้วย พารามิเตอร์ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Algorithmic Parameters) และพารามิเตอร์ของกระบวนการหาคำตอบ (Operational Parameters) โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดของวิธี CHIO มี 6 ค่า ประกอบด้วย จำนวนผู้ป่วยที่ติดเชื้อเริ่มต้น (Infected Case, c_0) จำนวนประชากร (HIS) จำนวนรอบสูงสุดในการค้นหาคำตอบ (MaxIter) และขนาดของปัญหา (Problem Dimension, n) อัตราการแพร่เชื้อ (BR_r) และ เกณฑ์อายุสูงสุดของการติดเชื้อ (Max_{Age})

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างภูมิคุ้มกันหมู่ (Generate Herd Immunity Population, HIP)

ขั้นตอนการสร้างภูมิคุ้มกันหมู่ จะเป็นการสร้างกลุ่มตัวแทนคำตอบตามจำนวนประชากร (HIS) รูปแบบตัวแทนคำตอบจะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ 2 มิติ ซึ่งขนาดของ HIP เท่ากับ $n \times HIS$ โดยแต่ละแถว j ในเมทริกซ์กลุ่มตัวแทนคำตอบแสดงด้วยตัวแทนคำตอบ x^j โดยในแต่ละ x^j จะมีค่า x_i^j เป็นอัตราภูมิคุ้มกันที่สร้างมาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหา เช่น $lb_i + (ub_i - lb_i) \times U(0, 1) \forall i = 1, 2, \dots, n$ ดังสมการที่ (15)

$$HIP = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^{HIS} & x_2^{HIS} & \dots & x_n^{HIS} \end{bmatrix} \quad (15)$$

นอกจากนี้มีการระบุสถานะของ x^j ด้วยค่าเวกเตอร์ S แทนกรณีความเสี่ยงติดเชื้อไวรัสโคโรนาด้วย 0 และกรณีที่ติดเชื้อแล้วด้วย 1 ซึ่งจำนวนสถานะเวกเตอร์ S จะมีจำนวนเท่ากับ c_0 โดยเริ่มต้นจะกำหนดให้ S_j เท่ากับ 0 และเกณฑ์อายุเริ่มต้น A_j เท่ากับ 0

ขั้นตอนที่ 3 วิวัฒนาการภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนา (Coronavirus Herd Immunity Evolution)

ขั้นตอนวิวัฒนาการภูมิคุ้มกันหมู่เป็นการหาคำตอบใหม่ $x^j(t+1)$ ที่ได้รับอิทธิพลมาจากยีนส์ x_i^j ในตัวแทนคำตอบ x^j การหาคำตอบใหม่จะใช้กฎการเว้นระยะห่างทางสังคม (Social Distancing) เพื่อหาคำตอบในแต่ละกรณีด้วยค่า BR_r ที่เปรียบเทียบกับค่า r โดยเป็นค่าเลขที่ได้จากการสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งจะแบ่งในแต่ละกรณีตามสมการที่ (16)

$$x_i^j(t+1) \leftarrow \begin{cases} x_i^j(t) & r \geq BR_r \\ C(x_i^j(t)) & r < \frac{1}{3}BR_r \\ N(x_i^j(t)) & r < \frac{2}{3}BR_r \\ R(x_i^j(t)) & r < BR_r \end{cases} \quad (16)$$

กรณีติดเชื้อไวรัส (Infected Case)

ค่ายีนส์ $x_i^j(t+1)$ มีผลมาจากระยะห่างทางสังคม ซึ่งมีความต่างระหว่างยีนส์ปัจจุบันกับยีนส์ที่มีการติดเชื้อโดยค่า $r \in \left[\frac{0.1}{3BR_r}\right)$ ค่า $x^c(t)$ เป็นการสุ่มเลือกจาก x^c ของเวกเตอร์ S , $c = \{i | S_i = 1\}$ ซึ่งค่า $x_i^j(t+1)$ และ $C(x_i^j(t))$ คำนวณจากสมการที่ (17)–(18)

$$x_i^j(t+1) = C(x_i^j(t)) \quad (17)$$

$$C(x_i^j(t)) = x_i^j(t) + r \times (x_i^j(t) - x_i^c(t)) \quad (18)$$

กรณีเสี่ยงต่อการติดเชื้อไวรัส (Susceptible Case)

ค่าขึ้น $x_i^j(t+1)$ มีผลมาจากระยะห่างทางสังคมจากค่า $r \in \left[\frac{1}{3BR_r}, \frac{2}{3BR_r}\right)$ ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนระหว่างขึ้นสืบปัจจุบันกับขึ้นสืบที่ไม่พบเชื้อ x^m ค่า $x_i^m(t)$ เป็นการกระจายของ x^m อย่างสุ่ม และเป็นศูนย์กลางของเวกเตอร์ S , $m = \{i | S_i = 0\}$ ซึ่งค่า $x_i^j(t+1)$ และ $N(x_i^j(t))$ คำนวณจากสมการที่ (19)–(20)

$$x_i^j(t+1) = N(x_i^j(t)) \quad (19)$$

$$N(x_i^j(t)) = x_i^j(t) + r \times (x_i^j(t) - x_i^m(t)) \quad (20)$$

กรณีมีภูมิคุ้มกันจากไวรัส (Immune Case) ค่าขึ้น $x_i^j(t+1)$ มีอิทธิพลมาจากระยะห่างทางสังคม จากค่า $r \in \left[\frac{2}{3BR_r}, BR_r\right]$ ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนระหว่างขึ้นสืบปัจจุบันกับขึ้นสืบที่ไม่พบเชื้อ x^v ค่า $x_i^v(t)$ เป็นการกระจายของกรณีที่มีความต้านทานเชื้อโรค x^v อย่างสุ่ม และเป็นศูนย์กลางของเวกเตอร์ S ซึ่ง $f(x_i^v) = \operatorname{argmin}_j \{k | S(k) = 2\} f(x_i^j)$ ซึ่งหาค่า $x_i^j(t+1)$ และ $R(x_i^j(t))$ คำนวณจากสมการที่ (21)–(22)

$$x_i^j(t+1) = R(x_i^j(t)) \quad (21)$$

$$R(x_i^j(t)) = x_i^j(t) + r \times (x_i^j(t) - x_i^v(t)) \quad (22)$$

นอกจาก 3 กรณี ข้างต้นที่กล่าวไป เมื่อทำการสุ่มค่า r ที่มีค่ามากกว่า BR_r จะแทนค่าขึ้น $x_i^j(t+1)$ ด้วย $x_i^j(t)$ ในรอบนั้น ๆ

$$S_j \leftarrow \begin{cases} 1 & f(x^j(t+1)) < \frac{f(x)^j(t+1)}{\Delta f(x)} \wedge S_j = 0 \wedge is_corona(x^j(t+1)) \\ 2 & f(x^j(t+1)) > \frac{f(x)^j(t+1)}{\Delta f(x)} \wedge S_j = 1 \end{cases} \quad (23)$$

4. การหาค่าเหมาะสมของวาพหลังค่อม

วาพหลังค่อมถือเป็นสัตว์นักล่าชนิดหนึ่งที่มีพฤติกรรมทางสังคมที่อาศัยอยู่ทั้งเป็นกลุ่มและลำพังตัวเดียว อาหาร

ขั้นตอนที่ 4 อัปเดตภูมิคุ้มกันหมู่ (Update Herd

Immunity Population)

กำหนดให้ค่าอัตราภูมิคุ้มกัน $f(x^j(t+1))$ เป็นค่าวัดอุปสงค์ของตัวแทนคำตอบ $x^j(t+1)$ โดยตัวแทนคำตอบปัจจุบัน $x^j(t)$ จะถูกแทนที่ด้วย $x^j(t+1)$ ในกรณีที่ตัวแทนคำตอบดีกว่า $f(x^j(t+1)) < f(x^j(t))$ ค่าเวกเตอร์ S_j ของแต่ละตัวแทนคำตอบ x^j จะอัปเดตตามเกณฑ์ภูมิคุ้มกันด้วยสมการที่ (23) $is_corona(x^j(t+1))$ มีค่าเป็นไบนารีซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของ $x^j(t+1)$ ในกรณีที่ $x^j(t+1)$ ถูกยืนยันว่าเป็นตัวแทนคำตอบที่ติดเชื้อค่า $is_corona(x^j(t+1))$ จะเท่ากับ 1 โดยค่า $\Delta f(x) = \frac{\sum_{i=1}^{HIS} f(x_i)}{HIS}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราภูมิคุ้มกันหมู่ อัตราภูมิคุ้มกันของกลุ่มตัวแทนคำตอบขึ้นอยู่กับระยะห่างทางสังคมที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ถ้าอัตราภูมิคุ้มกันใหม่ดีกว่าอัตราภูมิคุ้มกันเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่าประชากรมีภูมิคุ้มกันไวรัส และค่าเวกเตอร์อายุ (Age Vector) A_j , $A_j = A_j + 1$ ถ้า $S_j = 1$

ขั้นตอนที่ 5 กรณีร้ายแรง (Fatal Case)

ถ้าอัตราภูมิคุ้มกัน $f(x^j(t+1))$ ของตัวแทนคำตอบที่ติดเชื้อไวรัส ($S_j == 1$) ไม่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้น ($A_j = A_j + 1$) จะถูกกำหนดด้วยค่า Max_{Age} ถ้าค่า $A_j \geq Max_{Age}$ เป็นกรณีที่ตัวแทนคำตอบใช้ไม่ได้ (เสียชีวิต) ซึ่งจะมีการสร้างตัวแทนคำตอบใหม่ $x_i^j(t+1)$, $x_i^j(t+1) = lb_i + (ub_i - lb_i) \times U(0, 1) \forall i = 1, 2, \dots, n$ และ ค่า A_j , S_j จะกำหนดใหม่เท่ากับ 0

ขั้นตอนที่ 6 ครบเงื่อนไข (Stop Criterion)

เป็นกระบวนการค้นหาคำตอบซ้ำจากขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 6 ซึ่งเงื่อนไขของการค้นหาคำตอบขึ้นอยู่กับจำนวนของผู้ที่ไม่พบเชื้อและมีภูมิคุ้มกันครบ หรือจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหาคำตอบ

ของวาพหลังค่อมจะเป็นกิ้งหรือปลาขนาดเล็กโดยพฤติกรรมการล่าเหยื่อมีลักษณะที่น่าสนใจ คือ การสร้างฟองอากาศล่อเหยื่อ Mirjalili and Lewis [24] นำเสนอ

พฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อมเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม มีขั้นตอนการหาคำตอบแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การล่อเหยื่อ

พฤติกรรมของวาฬหลังค่อมในการจับเหยื่อนั้น จะระบุตำแหน่งของเหยื่อและล่อเหยื่อ โดยกระบวนการของวิธี WOA จะกำหนดให้ $\vec{x}$ คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของคำตอบ $\vec{x}^*$ คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุด $\vec{D}$ เป็นตำแหน่งระหว่างวาฬหลังค่อมกับตำแหน่งของเหยื่อ โดยพฤติกรรมดังกล่าวสามารถคำนวณจากสมการที่ (24)–(25)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{x}^*(t) - \vec{x}(t)| \quad (24)$$

$$\vec{x}(t+1) = \vec{x}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (25)$$

เมื่อ t คือ จำนวนรอบปัจจุบัน ค่า $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ คือ เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการคำนวณ, $|\cdot|$ คือ ค่าสัมบูรณ์, คือ การคูณแบบจุดต่อจุด ซึ่ง $\vec{x}^*$ จะอัปเดตใหม่ในแต่ละรอบที่มีคำตอบที่ดีขึ้น โดยที่ $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (26) และ (27) เมื่อ $\vec{a}$ ลดลงแบบเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในแต่ละรอบการหาคำตอบ ตามสมการ (28) และ $\vec{r}$ คือ เวกเตอร์แบบสุ่มในช่วง $[0, 1]$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (26)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \quad (27)$$

$$\vec{a} = 2 - t \frac{2}{MaxIter} \quad (28)$$

ขั้นตอนที่ 2 วิธีการโจมตีด้วยฟองอากาศ

พฤติกรรมการโจมตีเหยื่อด้วยฟองอากาศของวาฬหลังค่อมแบ่งออกเป็น 2 วิธี ประกอบด้วยวิธีการบีบวงล่อ และการเคลื่อนที่แบบเกลียว มีรายละเอียดดังนี้

การบีบวงล่อ

พฤติกรรมการบีบวงล่อจะปรับค่าลดลงตาม $\vec{a}$ ตามสมการ (28) ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า $\vec{A}$ โดยค่า $\vec{A}$ จะมีค่าสุ่มในช่วง $[-a, a]$ เมื่อค่า $\vec{A}$ ลดลงขอบเขตของการค้นหาคำตอบจะแคบลงตาม

การเคลื่อนที่แบบเกลียว

หลังจากที่วาฬหลังค่อมทำการบีบวงล่อเหยื่อแล้ว วาฬหลังค่อมจะเข้าหาเหยื่อในรูปแบบเกลียว โดยมีสมการคณิตศาสตร์ที่จำลองการเคลื่อนที่แบบเกลียวที่คำนวณระยะทางระหว่างตำแหน่งวาฬหลังค่อมกับตำแหน่งเหยื่อจากสมการ (29)

$$\vec{x}(t+1) = \vec{D}^* \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{x}^*(t) \quad (29)$$

เมื่อ $\vec{D}^* = |\vec{x}^*(t) - \vec{x}(t)|$ คือ ระยะทางของวาฬหลังค่อมกับเหยื่อ, b คือ ค่าคงที่สำหรับการกำหนดรูปร่างเกลียว, l คือ ค่าสุ่มระหว่าง $[-1, 1]$

ในการจำลองพฤติกรรมของวาฬหลังค่อมที่ว่ายน้ำล่อเหยื่อและบีบวงล่อเข้าหาเหยื่อเรื่อย ๆ พร้อมกับเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียว ซึ่งกำหนดความน่าจะเป็นด้วยค่า r ที่สุ่มในช่วง $[0, 1]$ ถ้า $r < 0.5$ เป็นการบีบวงล่อ ในทางกลับกัน $r \geq 0.5$ เป็นการเคลื่อนที่แบบเกลียว ตามสมการ (30)

$$\vec{x}(t+1) = \begin{cases} \vec{x}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } r < 0.5 \\ \vec{D}^* \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{x}^*(t) & \text{if } r \geq 0.5 \end{cases} \quad (30)$$

ขั้นตอนที่ 3 การค้นหาเหยื่อ

นอกจากวาฬหลังค่อมโจมตีเหยื่อด้วยฟองอากาศแล้ว เมื่อกินเหยื่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว วาฬหลังค่อมจะค้นหาเหยื่อใหม่ตามตำแหน่งต่างๆ ด้วยการสุ่ม ซึ่ง ค่า $\vec{A}$ ที่ได้จากการสุ่มควรมีค่ามากกว่า 1 หรือ น้อยกว่า -1 เพื่อบังคับให้ได้ตำแหน่งใหม่ที่ไกลจากตำแหน่งเดิม ซึ่งวิธีนี้ถือเป็นวิธีการค้นหาแบบสุ่มกระจาย จะอัปเดตตำแหน่งที่ได้จากการสุ่ม ($\vec{x}_{rand}$) แทนตำแหน่งที่ดีที่สุด การค้นหาแบบสุ่มกระจายจะทำเมื่อค่า $|\vec{A}| > 1$ ตามสมการ (31) และ (32)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{x}_{rand} - \vec{x}| \quad (31)$$

$$\vec{x}(t+1) = \vec{x}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (32)$$

5. การประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนาพร้อมกับการหาค่าเหมาะสมของวาฬหลังค่อม

การแก้ปัญหา VRPTW จะประยุกต์วิธี CHIO และวิธี WOA โดยใช้ขั้นตอนการค้นหาคำตอบหลักของวิธี CHIO ส่วนกรณีที่เงื่อนไขไม่ตรงตามที่กำหนดไว้จะทำการค้นหาคำตอบด้วยวิธี WOA และปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี Local Search โดยมีรายละเอียด ดังนี้

5.1 การสร้างตัวแทนคำตอบ

การสร้างตัวแทนคำตอบในปัญหา VRPTW ด้วยวิธี CHIO จะทำการสุ่มเลขระหว่าง 0 ถึง 1 ลงใน x^j ด้วยเลขสุ่มที่ไม่ซ้ำกัน แทนลงในค่ายีนส์ x_i^j ซึ่งค่า $i=0, 1, 2, \dots, n$ และ n เท่ากับจำนวนลูกค้า ค่า $j=1, 2, \dots, HIS$ และค่า x_j^i ของวิธี WOA จะแทนด้วย x_i^j รูปที่ 1 เป็นตัวอย่างของตัวแทนคำตอบที่ได้จากการสุ่ม กำหนดให้ HIS เท่ากับ 4 และ n เท่ากับ 6 หลังจากนั้นจะแปลงค่ายีนส์ในแต่ละตัวแทนคำตอบให้เป็นลำดับของลูกค้าด้วยวิธีเรียงลำดับค่ามาก (Large Rank Value: LRV) [27] แสดงดังรูปที่ 2

	(x_1^j)	(x_2^j)	(x_3^j)	(x_4^j)	(x_5^j)	(x_6^j)
คนไข้ที่ 1 (x^1)	0.18	0.26	0.75	0.28	0.89	0.36
คนไข้ที่ 2 (x^2)	0.56	0.93	0.29	0.84	0.12	0.45
คนไข้ที่ 3 (x^3)	0.76	0.49	0.28	0.84	0.27	0.64
คนไข้ที่ 4 (x^4)	0.98	0.77	0.86	0.73	0.33	0.52

รูปที่ 1 การสร้างยีนส์ของตัวแทนคำตอบ

0.18	0.26	0.75	0.28	0.89	0.36
------	------	------	------	------	------



6	5	2	4	1	3
---	---	---	---	---	---

รูปที่ 2 ตัวแทนคำตอบของปัญหา VRPTW

5.2 ขั้นตอนการประยุกต์วิธี CHIO ร่วมกับวิธี WOA

ในขั้นตอนการวิวัฒนาการภูมิคุ้มกันหมู่ ทำการสุ่มค่า r ด้วยเลขสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 กรณีที่ $r \geq BR_r$ จะแทน $x_i^j(t+1)$ ด้วยเทคนิคการหาคำตอบของวิธี WOA เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการค้นหาแบบสุ่มกระจายพร้อมกับการค้นหาคำตอบใกล้เคียงร่วมกัน ที่แบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ ค่า $|A| < 1$ และค่า $|A| \geq 1$

กรณีที่ค่า $|A| < 1$ ในบรรทัดที่ 23 แทน $x(t+1)$ จากสมการที่ (25) โดยในตำแหน่ง $x^*(t)$ แทนด้วยยีนส์ x_i^j ที่อยู่ใน x^* ที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด ค่าเวกเตอร์ $x(t)$ ในสมการที่ (24) แทนด้วย $x_i^j(t)$

กรณีที่ค่า $|A| \geq 1$ ในบรรทัดที่ 25 แทน $x(t+1)$ จากสมการที่ (32) โดยในตำแหน่ง x_{rand} ได้จากการเลือกยีนส์ x_i^j ที่อยู่ใน x^{rand} ที่สุ่มสร้างขึ้นมา ค่าเวกเตอร์ x ในสมการที่ (31) แทนด้วย $x_i^j(t)$ การค้นหาคำตอบจะแสดงรายละเอียดดังอัลกอริทึม 1

อัลกอริทึม 1 HCHIO-WOA

วิธี HCHIO-WOA

- 1: ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพารามิเตอร์
- 2: กำหนดค่าพารามิเตอร์ $HIS, BR_r, c_0, Max_{Age}$ และ $MaxIter$
- 3: ขั้นตอนที่ 2 การสร้างภูมิคุ้มกันหมู่
- 4: for $j = 1$ to HIS do
- 5: สร้างประชากร x_i^j
- 6: คำนวณ $f(x_i^j)$
- 7: กำหนด $S_j = 0 \forall j = 1, 2, \dots, HIS$
และ $A_j = 0 \forall j = 1, 2, \dots, HIS$
- 8: $Iteration \leftarrow 0$
- 9: ขั้นตอนที่ 3 วิวัฒนาการภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนา
- 10: while ($Iteration \leq MaxIter$) do
- 11: for $j = 1$ to HIS do
- 12: $is_corona(x^j(t+1)) = false$
- 13: for $i = 1$ to n do
- 14: if ($r < \frac{1}{3}BR_r$) then

อัลกอริทึม 1 HCHIO-WOA (ต่อ)

```

15:     แทน  $x_i^j(t+1) \leftarrow C(x_i^j(t))$ ,
16:      $is\_corona(x^j(t+1)) = true$ 
17:     else if  $(r < \frac{2}{3}BR_r)$  then
18:         แทน  $x_i^j(t+1) \leftarrow N(x_i^j(t))$ 
19:     else if  $(r < BR_r)$  then
20:         แทน  $x_i^j(t+1) \leftarrow R(x_i^j(t))$ 
21:     else
22:         อัปเดตค่า  $\vec{d}, \vec{A}$  และ  $\vec{C}$ 
23:         if  $(|\vec{A}| < 1)$ 
24:             แทน  $x_i^j(t+1)$  ตามสมการ (25)
25:         else if  $(|\vec{A}| \geq 1)$ 
26:             สุ่มเลือก  $x_i^{rand}$  จาก  $x^{rand}$ 
27:             แทน  $x_i^j(t+1)$  ตามสมการ (32)
28:         end if
29:     end if
30: end for
31: ขั้นตอนที่ 4 อัปเดตภูมิคุ้มกันหมู่
32: if  $f(x^j(t+1)) \leq f(x^j(t))$  then
33:     แทน  $x^j(t) \leftarrow x^j(t+1)$ 
34: else
35:      $A_j = A_j + 1$ 
36: end if
37: if  $f(x^j(t+1)) \leq \frac{f(x^{j(t+1)})}{\Delta f(x)} \wedge S_j = 0 \wedge is\_corona(x^j(t+1))$  then
38:      $S_j = 1, A_j = 1, A_j = 1$ 
39: end if
40: if  $f(x^j(t+1)) > \frac{f(x^{j(t+1)})}{\Delta f(x)} \wedge S_j = 1$  then
41:      $S_j = 2, A_j = 0$ 
42: end if
43: ขั้นตอนที่ 5 กรณิร้ายแรง
44: if  $((A_j \geq Max_{Age})) \wedge (S_j == 1)$  then
45:      $x_i^j \leftarrow Random\ insertion\ by\ LRV$ 
46:      $S_j = 0, A_j = 0$ 
47: end if

```

อัลกอริทึม 1 HCHIO-WOA (ต่อ)

```

48:     end for
49:      $Iteration \leftarrow Iteration + 1$ 
50: end while

```

5.3 การปรับปรุงคำตอบ

ตัวแทนคำตอบที่ได้จากการค้นหาคำตอบจะถูกนำมาปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น โดยวิธีการปรับปรุงคำตอบเป็นการพัฒนาคำตอบให้มีค่าคำตอบที่น้อยกว่าเดิมด้วยการปรับปรุงคำตอบภายในเส้นทางขนส่งเดียวกัน (Intra Route) ด้วยวิธี 2-Opt และการปรับปรุงคำตอบระหว่างเส้นทางขนส่งต่างกัน (Inter Route) ด้วยวิธี λ -Interchange และใช้วิธีการสลับสายพันธุ์แบบ Alternating Edges Crossover (AEX) ในการสลับตำแหน่งของลูกค้าในแต่ละตัวแทนคำตอบ

6. ผลการทดลองและอภิปรายผล**6.1 โจทย์ปัญหา**

การทดลองครั้งนี้ใช้โจทย์ปัญหาที่ยากของ Solomon [32] ที่มีลูกค้าจำนวน 100 ราย ลักษณะของโจทย์เป็นการกระจายแบบกลุ่ม (Cluster Distribution: C) ที่มีคลังสินค้าอยู่ตรงกลางและอยู่ระหว่างตำแหน่งของลูกค้า ลักษณะของปัญหามีการแบ่งช่วงเวลารับสินค้าและความจุยานพาหนะออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ช่วงเวลาแคบและความจุยานพาหนะน้อยแทนด้วยเลข 1 และช่วงเวลากว้างและความจุยานพาหนะมากแทนด้วยเลข 2

6.2 ค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พารามิเตอร์ของวิธี CHIO ประกอบด้วย HIS , BR_r , Max_{Age} และ $MaxIter$ ส่วนวิธี WOA ประกอบด้วย N และ $MaxIter$ โดยค่าพารามิเตอร์ในการทดลองครั้งนี้จะถูกการปรับค่าให้เหมาะสมกับโจทย์ปัญหาในแต่ละข้อ การทดลองสำหรับปัญหานี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนตัว 1 เครื่อง สำหรับการพัฒนาวิธีการและหาคำตอบด้วยหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel Core™ i5 1.80 GHz หน่วยความจำหลัก (RAM) 4.00 GB ระบบปฏิบัติการ

Microsoft Windows 10 และโปรแกรมภาษาไพธอน (Python)

6.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองของวิธี HCHIO-WOA นำมาเปรียบเทียบกับค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Best Known Solution: BKS) วิธี PSO [10] วิธี WOA และวิธี CHIO ในโจทย์ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนวิธี ACO [9] วิธีประยุกต์อาณานิคมมด ร่วมกับวิธีหาค่าที่เหมาะสมการระดมความคิด (Hybrid Ant

Colony System with Brain Storm Optimization: ACS-BSO) [13] จะนำมาเปรียบเทียบในโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ร่วมด้วย วิธี HCHIO-WOA ทดลองซ้ำ 30 ครั้ง ด้วยเลขสุ่มที่แตกต่างกัน ผลการทดลองจะแสดงค่าระยะทาง (T.D.) ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 และแสดงจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง (N.V.) ดังตารางที่ 3 โดยค่า Gap เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ แสดงความแตกต่างของค่าคำตอบของวิธี HCHIO-WOA กับวิธีที่นำไปเปรียบเทียบ

ตารางที่ 1 ค่าระยะทางต่ำสุดของการทดลองในโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก

Problem	BKS	PSO [10]	WOA	CHIO	HCHIO-WOA	Gap _{BKS} (%)	Gap _{PSO} (%)
C101	191.3	191.81	191.81	191.81	191.81	0.27%	0.00%
C102	190.3	190.74	190.74	190.74	190.74	0.23%	0.00%
C103	190.3	190.74	190.74	190.74	190.74	0.23%	0.00%
C104	186.9	187.45	187.45	187.45	187.45	0.29%	0.00%
C105	191.3	191.81	191.81	191.81	191.81	0.27%	0.00%
C106	191.3	191.81	191.81	191.81	191.81	0.27%	0.00%
C107	191.3	191.81	191.81	191.81	191.81	0.27%	0.00%
C108	191.3	191.81	191.81	191.81	191.81	0.27%	0.00%
C109	191.3	191.81	191.81	191.81	191.81	0.27%	0.00%
C201	214.7	215.54	215.54	215.54	215.54	0.39%	0.00%
C202	214.7	223.31	215.54	215.54	215.54	0.39%	-3.48%
C203	214.7	223.31	215.54	215.54	215.54	0.39%	-3.48%
C204	213.1	221.28	213.93	213.93	213.93	0.39%	-3.32%
C205	214.7	297.45	215.54	215.54	215.54	0.39%	-27.54%
C206	214.7	285.39	215.54	215.54	215.54	0.39%	-24.48%
C207	214.5	274.78	215.34	215.34	215.34	0.39%	-21.63%
C208	214.5	229.84	215.37	215.37	215.37	0.41%	-6.30%

ตารางที่ 2 ค่าระยะทางต่ำสุดของการทดลองในโจทย์ปัญหามาตรกลาง

Problem	BKS	PSO [10]	WOA	CHIO	HCHIO-WOA	Gap _{BKS} (%)	Gap _{PSO} (%)
C101	362.4	363.25	363.25	363.25	363.25	0.23%	0.00%
C102	361.4	362.17	362.17	362.17	362.17	0.21%	0.00%
C103	361.4	362.17	363.34	363.34	363.34	0.54%	0.32%
C104	358.0	358.88	365.38	365.38	365.38	2.06%	1.81%

ตารางที่ 2 ค่าระยะทางต่ำสุดของการทดลองในโจทย์ปัญหขนาดกลาง (ต่อ)

Problem	BKS	PSO [10]	WOA	CHIO	HCHIO-WOA	GapBKS(%)	GapPSO(%)
C105	362.4	363.25	363.25	363.25	363.25	0.23%	0.00%
C106	362.4	363.25	363.25	363.25	363.25	0.23%	0.00%
C107	362.4	363.25	363.25	363.25	363.25	0.23%	0.00%
C108	362.4	363.25	363.92	363.92	363.92	0.42%	0.18%
C109	362.4	363.25	363.25	363.25	363.25	0.23%	0.00%
C201	360.2	441.96	382.12	382.12	382.12	6.09%	-13.54%
C202	360.2	403.81	377.45	377.45	377.45	4.79%	-6.53%
C203	359.8	402.52	379.14	379.14	379.14	5.38%	-5.81%
C204	350.1	356.77	365.54	365.54	365.54	4.41%	2.46%
C205	359.8	429.12	380.83	380.83	380.83	5.84%	-11.25%
C206	359.8	412.50	361.41	361.41	361.41	0.45%	-12.39%
C207	359.4	426.13	370.51	370.51	370.51	3.09%	-13.05%
C208	350.5	352.29	352.29	352.29	352.29	0.51%	0.00%

ตารางที่ 3 ค่าระยะทางต่ำสุดและจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งของการทดลองในโจทย์ปัญหขนาดใหญ

Problem	BKS		PSO [10]		ACO [9]		ACS-BSO [13]		WOA		CHIO		HCHIO-WOA		Gap _{BKS} (%)
	N.V.	T.D.	N.V.	T.D.	N.V.	T.D.	N.V.	T.D.	N.V.	T.D.	N.V.	T.D.	N.V.	T.D.	
C101	10	828.94	10	828.94	10	828.93	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	0.00%
C105	10	828.94	10	828.94	10	828.90	10	824.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	0.00%
C106	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	851.01	10	828.94	0.00%
C107	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	10	828.94	0.00%
C108	10	828.94	10	828.94	10	830.94	10	828.94	10	828.94	10	847.86	10	834.67	0.69%
C109	10	828.94	10	828.94	10	829.22	10	828.94	10	828.94	10	830.87	10	828.94	0.00%
C201	3	591.56	3	591.56	3	591.58	3	591.56	3	591.56	3	591.56	3	591.56	0.00%
C205	3	588.88	3	588.88	3	588.88	3	588.88	3	588.88	3	591.56	3	588.88	0.00%
C206	3	588.49	3	588.88	3	588.49	3	588.49	3	588.49	3	636.07	3	588.88	0.07%
C207	3	588.29	3	591.35	3	588.88	3	588.29	3	588.29	3	692.16	3	588.29	0.00%
C208	3	588.32	3	588.49	3	588.03	3	588.32	3	588.32	3	606.28	3	588.32	0.00%

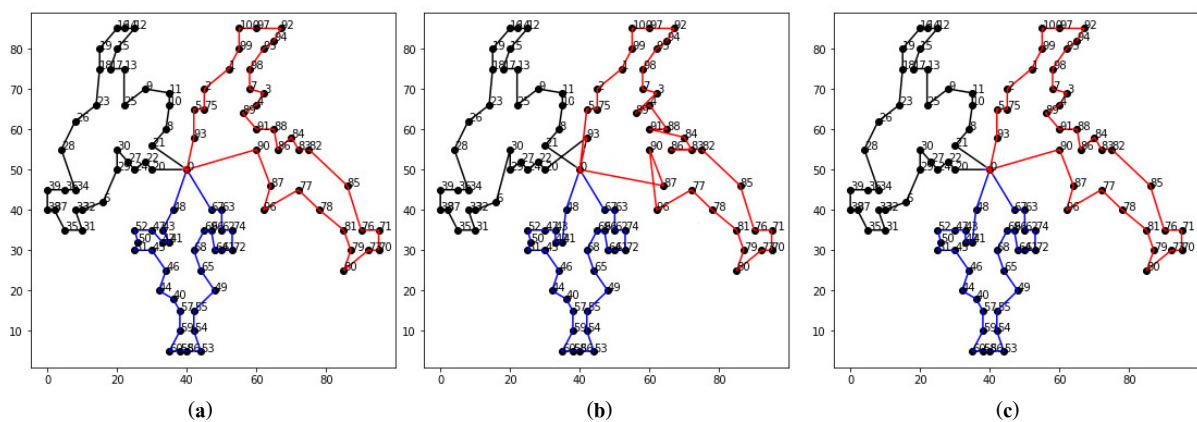
จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พบว่า โจทย์ปัญหาในกลุ่ม 1 ของทั้งสองขนาดจะให้ค่าคำตอบใกล้เคียงกันซึ่งต่างจากโจทย์ปัญหาในกลุ่ม 2 ของทั้ง 4 วิธี จากตารางที่ 1

พบว่าวิธี HCHIO-WOA มีประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบได้เท่ากับวิธี WOA และวิธี CHIO ยิ่งไปกว่านั้นในโจทย์ปัญหขนาดเล็กร้อย C202 ถึงข้อ C208 มีค่าคำตอบที่ดีกว่า

วิธี PSO โดยวิธี HCHIO-WOA มีค่าเฉลี่ยของค่าคำตอบมากกว่าค่า BKS ที่ 0.32 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยของค่าคำตอบน้อยกว่าวิธี PSO ที่ 5.31 เปอร์เซ็นต์ และตารางที่ 2 พบว่า วิธี HCHIO-WOA มีค่าเฉลี่ยของค่าคำตอบมากกว่าค่า BKS ที่ 2.06 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยของค่าคำตอบน้อยกว่าวิธี PSO ที่ 3.40 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบวิธี HCHIO-WOA กับ 6 วิธี จำนวน 11 ข้อ พบว่า วิธี HCHIO-WOA มีค่าคำตอบเท่ากับ BKS จำนวน 9 ข้อ โดยวิธี CHIO จะมีค่าระยะทางมากกว่า BKS จำนวน 6 ข้อ เมื่อนำวิธี CHIO ร่วมกับวิธี WOA แล้ว พบว่า ค่าคำตอบที่ได้มีค่าเท่ากับ BKS ในโจทย์ปัญหาข้อ C106 ข้อ C109 ข้อ C207 และข้อ C208 ส่วนข้อ C108 และข้อ C206 มีค่าคำตอบที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบคำตอบกับ BKS พบว่า วิธี HCHIO-WOA มีค่าคำตอบมากกว่า 0.08 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์คำตอบของทั้ง 3 วิธี คือ วิธี WOA วิธี CHIO และวิธี HCHIO-WOA ในโจทย์ปัญหาที่เทียบเคียงข้อ C206 พบว่า คำตอบทั้ง 3 วิธี มีความคล้ายคลึงกัน โดยเส้นทางขนส่งของวิธี HCHIO-WOA มีลำดับการเดินทางจาก 47 → 43 → 42 → 41 → 48 และกลับคลังสินค้า ซึ่งต่างจากวิธี WOA ที่มีลำดับการเดินทางจาก 47 → 42 → 41 → 43 → 48 และกลับคลังสินค้าในเส้นทางสินค้าเงิน ทำให้มีระยะมากกว่า 0.07 เปอร์เซ็นต์ ในเส้นทางสีแดงของวิธี HCHIO-WOA มีลำดับการเดินทางเช่นเดียวกับวิธี WOA ในทางกลับกันเส้นทางของวิธี CHIO นั้น ลูกค้ารายที่ 93 อยู่ในลำดับแรกของเส้นทางสีแดง และลูกค้ารายที่ 5 อยู่ในลำดับแรกของเส้นทางสีแดง ซึ่งต่างจากวิธี WOA และวิธี HCHIO-WOA ที่ลูกค้ารายที่ 93 อยู่ในลำดับแรกของเส้นทางสีแดง แสดงดังรูปที่ 3 ดังนั้น เพื่อให้ลำดับการเดินทางของวิธี CHIO ในเส้นทางสีแดงมีระยะทางที่สั้นขึ้นสามารถสลับลำดับลูกค้าภายใต้เงื่อนไขด้านช่วงเวลาในการรับสินค้า

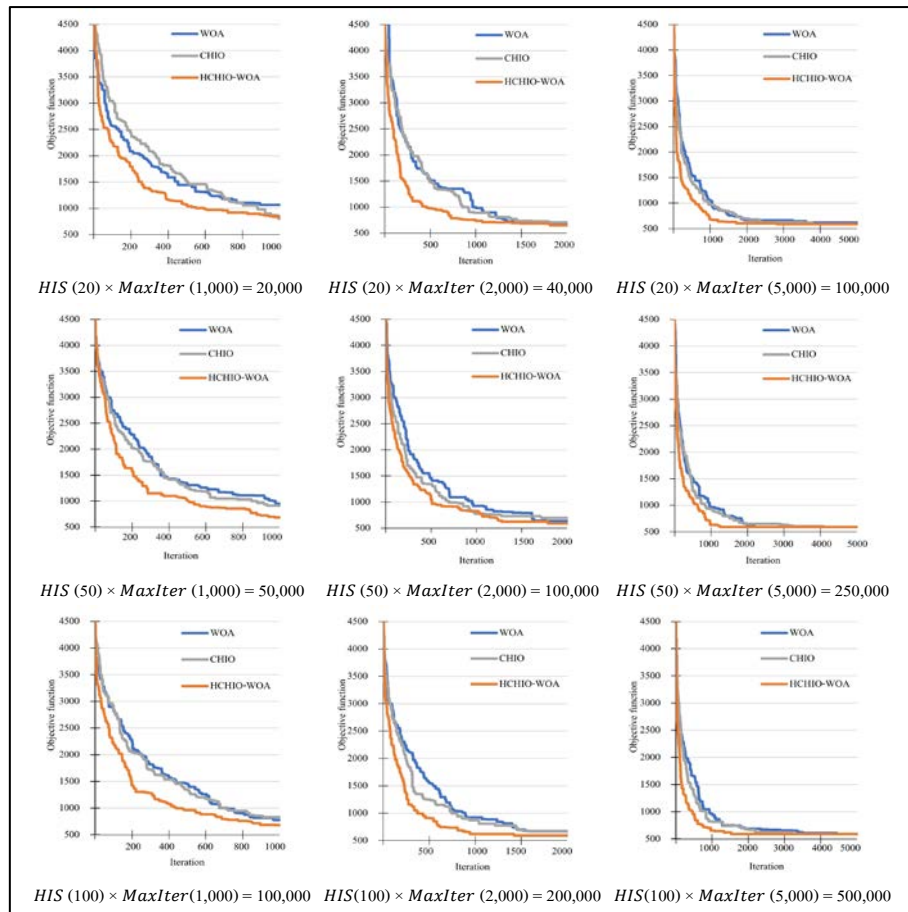


รูปที่ 3 เส้นทางขนส่งที่ต่ำสุดในแต่ละวิธีของโจทย์ปัญหาที่เทียบเคียงข้อ C206 (a) วิธี WOA มีระยะทาง 588.49 หน่วย (b) วิธี CHIO มีระยะทาง 636.07 หน่วย (c) วิธี HCHIO-WOA มีระยะทาง 588.88 หน่วย

6.4 การหาคำตอบ

เนื่องจากวิธี HCHIO-WOA มีการนำวิธี WOA มาช่วยในการค้นหาคำตอบ และขั้นตอนการพัฒนาคำตอบของวิธี WOA จะสัมพันธ์กันระหว่างรอบการค้นหาคำตอบปัจจุบันกับจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาคำตอบตามสมการที่

(28) การหาคำตอบของการแก้ปัญหาในครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการหาคำตอบทั้ง 3 วิธี ประกอบด้วยวิธี WOA วิธี CHIO และวิธี HCHIO-WOA โดยกำหนด HIS ที่ 20, 50 และ 100 คำตอบ และ $MaxIter$ ที่ 1,000, 2,000 และ 5,000 รอบ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การลู่เข้าหาคำตอบของโจทย์ปัญหาเทียบเคียงข้อ C201

จากรูปที่ 4 พบว่า วิธี HCHIO-WOA มีการลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วกว่าวิธี WOA และวิธี CHIO จากการทดลองทั้ง 9 รูปแบบ เมื่อพิจารณา $MaxIter$ ที่ 1,000 รอบ พบว่า ค่า HIS ที่ 100 จะให้คำตอบที่ต่ำกว่า HIS ที่ 20 และ 50 ในช่วง 200 และ 400 รอบ ส่วนค่า HIS ที่ 100 และ $MaxIter$ ที่ 2,000 พบว่า วิธี CHIO มีการลู่เข้าหาคำตอบเร็วใกล้เคียงกับวิธี HCHIO-WOA ในช่วงก่อน 500 รอบ ส่วนวิธี WOA มีการลู่เข้าหาคำตอบช้าในช่วง 500–1,000 รอบ ในการทดลอง HIS ที่ 20 กับ $MaxIter$ ที่ 2,000 รอบ โดยภาพรวมเมื่อเรียงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบจากเร็วไปช้า ได้ดังนี้ วิธี HCHIO-WOA วิธี CHIO และวิธี WOA ตามลำดับ ซึ่งการลู่เข้าหาคำตอบเร็วของ HCHIO-WOA ไม่ติด Local Optima

6.5 อิทธิพลของ BR_r และ Max_{Age} ต่อคำตอบ

การค้นหาคำตอบของวิธี HCHIO-WOA มีค่า BR_r และ Max_{Age} เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ โดยการทดลองครั้งนี้ ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 3^k

Full Factorial Design เพื่อหาระดับที่เหมาะสม กำหนดค่า BR_r และค่า Max_{Age} อย่างละ 3 ระดับ โดยค่า BR_r ประกอบด้วย 0.25, 0.50 และ 0.75 ซึ่งถ้าค่า r ที่สุ่มได้มีค่ามากกว่า BR_r จะใช้วิธี WOA ในการหาคำตอบ และค่า Max_{Age} ประกอบด้วย 100, 300 และ 500 เป็นเกณฑ์ที่กำหนดการสร้างคำตอบขึ้นมาใหม่แทนคำตอบเดิม ซึ่งการทดลองเท่ากับ 3^2 เท่ากับ 9 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวม 27 การทดลอง

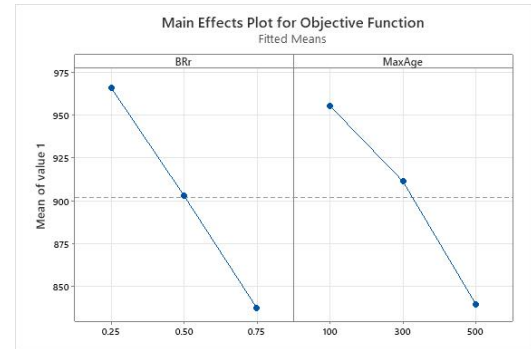
จากตารางที่ 4 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของโจทย์ปัญหาเทียบเคียงข้อ C101 พบว่า BR_r และค่า Max_{Age} เป็นปัจจัยหลัก (Main Effect) มีอิทธิพลต่อคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) และเมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interactions) แสดงว่ามีอิทธิพลต่อคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เช่นกัน

จากรูปที่ 5 เป็นกราฟวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effect) แสดงให้เห็นว่า การกำหนดค่า BR_r ที่ 0.75 และค่า Max_{Age}

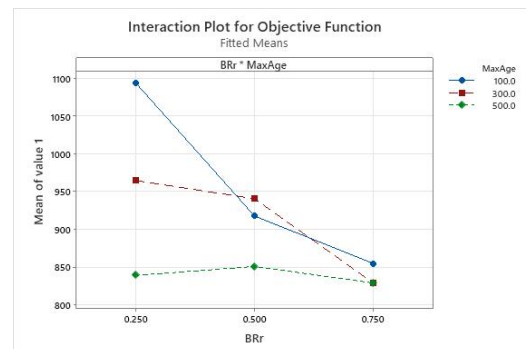
ที่ 500 ให้ค่าคำตอบต่ำสุด และรูปที่ 6 เป็นกราฟวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) แสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่า BR_r และค่า Max_{Age} ที่สูงให้ค่าคำตอบต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับกราฟวิเคราะห์อิทธิพลหลัก ในกรณีที่กำหนดค่า BR_r ที่ 0.25 และค่า Max_{Age} ที่ 100 จะให้ค่าคำตอบที่สูงกว่าค่า BR_r ที่ระดับอื่น ในทางกลับกันถ้ากำหนดค่า BR_r ที่ 0.50 และค่า Max_{Age} ที่ 100 จะให้ค่าคำตอบที่ต่ำกว่าการกำหนดค่า BR_r ที่ 0.50 และค่า Max_{Age} ที่ 300

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโจทย์ปัญหาเทียบเคียงข้อ C101

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	185970	23246	8.23	0.000
Linear	4	135670	33918	12.01	0.000
BR_r	2	74057	37028	13.11	0.000
Max_{Age}	2	61613	30807	10.91	0.001
2 Way Interactions	4	50300	12575	4.45	0.011
$BR_r * Max_{Age}$	4	50300	12575	4.45	0.011
Error	18	50845	2825		
Total	26	236815			

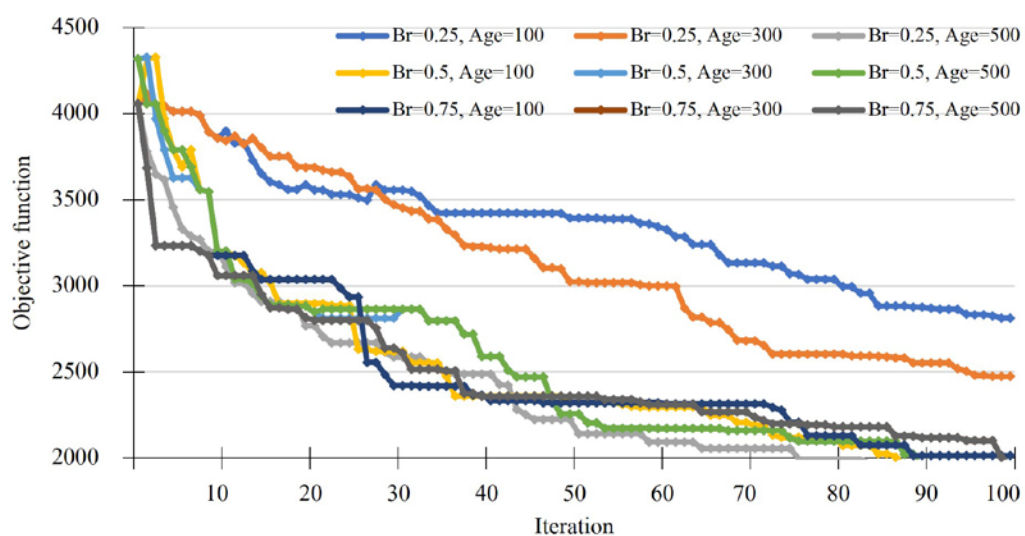


รูปที่ 5 การวิเคราะห์ Main Effects Plot ของ C101



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ Interaction Plot ของ C101

จากรูปที่ 7 เป็นการทดลองของโจทย์ปัญหาเทียบเคียงข้อ C101 ในช่วง 100 รอบ แสดงให้เห็นว่าค่า BR_r ที่ 0.50 และ 0.75 มีการลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าค่า BR_r ที่ 0.25 ส่วนค่า BR_r ที่ 0.75 และค่า Max_{Age} ที่ 500 จะลู่เข้าหาคำตอบเร็วในช่วง 10 รอบ



รูปที่ 7 การลู่เข้าหาคำตอบของค่า BR_r และ Max_{Age} ที่แตกต่างกันของโจทย์ปัญหาเทียบเคียงข้อ C101

ซึ่งแตกต่างจากค่า BR_r ที่ 0.75 และค่า Max_{Age} ที่ 100 จะเข้าสู่หาคำตอบเร็วในช่วง 20–30 รอบ ในทางกลับกันถ้า กำหนดค่า BR_r ที่ 0.25 ควรกำหนดค่า Max_{Age} ที่ 500 เพื่อให้เข้าสู่หาคำตอบได้ดีกว่า โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่า BR_r ที่ 0.75 ทำให้มีโอกาสนำมาใช้ กลไกการค้นหาคำตอบจากวิวัฒนาการภูมิคุ้มกันหมู่ทั้ง 3 กรณีร่วมกับวิธี WOA อย่างละ 25 เปรอร์เซ็นต์ และค่า Max_{Age} ที่สูงเพื่อเป็นเกณฑ์ในการระบุสถานะของ ตัวแทนคำตอบที่มีค่าคำตอบไม่ได้ขึ้นหลังจากการ ปรับปรุงคำตอบในแต่ละรอบ และเป็นตัวแทนคำตอบที่มี สถานะ $S_j == 1$ ที่ติดเชื่อไวรัสให้มีโอกาสในการสร้าง ภูมิคุ้มกัน

7. สรุป

งานวิจัยเรื่องนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสม ภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนาพร้อมกับวิธีการหาค่าเหมาะสม ของวาฬหลังค่อม (HCHIO-WOA) ในการแก้ปัญหา VRPTW โดยใช้วิธี WOA ในขั้นตอนหาคำตอบเมื่อเลขคู่ ที่ได้มากกว่าค่าอัตราการแพร่เชื้อ ด้วยกลไกการพัฒนา ตัวแทนคำตอบที่สัมพันธ์กันระหว่างรอบการค้นหาคำตอบ ปัจจุบันกับจำนวนรอบสูงสุด นำค่าคำตอบที่ได้ไป เปรียบเทียบกับวิธีที่ผ่านมา จากผลการทดลองพบว่า วิธี HCHIO-WOA สามารถหาคำคำตอบได้ใกล้เคียง BKS ใน โจทย์ปัญหามิติขนาดเล็กและขนาดกลาง และให้คำตอบที่ เท่ากันส่วนใหญ่ในโจทย์ขนาดใหญ่ สำหรับงานวิจัยใน อนาคตผู้วิจัยคาดหวังว่าสามารถนำวิธี HCHIO-WAO ไป แก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งที่มีข้อจำกัดต่าง ๆ สมจริงมากขึ้นและถูกพัฒนาวิธีการเพื่อแก้ปัญหาการหา ค่าที่เหมาะสมที่สุดอื่น ๆ ได้

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยี อุดสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ นครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0616/2022

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.
- [2] S. Mouthuy, F. Massen, Y. Deville and P. Van Hentenryck, "A multistage very large-scale neighborhood search for the vehicle routing problem with soft time windows," *Transportation Science*, vol. 49, no. 2, pp. 223–238, 2015, doi: 10.1287/trsc.2014.0558.
- [3] D. Taş, O. Jabali and T. Van Woensel, "A vehicle routing problem with flexible time windows," *Computers & Operations Research*, vol. 52, pp. 39–54, 2014, doi: 10.1016/j.cor.2014.07.005.
- [4] M. Batsyn, I. Bychkov, L. Komosko and A. Nikolaev, "Tabu Search for Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Hard and Soft Time Windows," in *International Conference on Network Analysis*, Nizhny Novgorod, Russia, May. 26–28, 2016, 2016, pp. 3–18.
- [5] P. Badeau, F. Guertin, M. Gendreau, J.-Y. Potvin and E. Taillard, "A parallel tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 109–122, 1997, doi: 10.1016/S0968-090X(97)00005-3.
- [6] B. Ombuki, B. Ross, and F. Hanshar, "Multi-Objective Genetic Algorithms for Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Applied Intelligence*, vol. 24, pp. 17–30, 2006, doi: 10.1007/s10489-006-6926-z.
- [7] W. C. Chiang and R. A. Russell, "Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows," *Annals of Operations Research*, vol. 63, pp. 3–27, 1996, doi: 10.1007/BF02601637.
- [8] G. B. Alvarenga, G. R. Mateus and G. De Tomi, "A genetic and set partitioning two-phase approach for the

- vehicle routing problem with time windows,” *Computers & Operations Research*, vol. 34, no. 6, pp. 1561–1584, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.07.025.
- [9] B. Yu, Z.-Z. Yang and B. Yao, “A hybrid algorithm for vehicle routing problem with time windows,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 1, pp. 435–441, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.06.082.
- [10] Y. -J. Gong, J. Zhang, O. Liu, R. -Z. Huang, H. S. -H. Chung and Y. -H. Shi, “Optimizing the vehicle routing problem with time windows: A discrete particle swarm optimization approach,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 42, no. 2, pp. 254–267, 2011, doi: 10.1109/TSMCC.2011.2148712.
- [11] B. Yao, Q. Yan, M. Zhang and Y. Yang, “Improved artificial bee colony algorithm for vehicle routing problem with time windows,” *PloS One*, vol. 12, no. 9, 2017, Art. no. e0181275, doi: 10.1371/journal.pone.0181275.
- [12] D. Aggarwal and V. Kumar, “Performance evaluation of distance metrics on firefly algorithm for VRP with time windows,” *International Journal of Information Technology*, vol. 13, pp. 2355–2362, 2021, doi: 10.1007/s41870-019-00387-7.
- [13] Y. Shen, M. Liu, J. Yang, Y. Shi and M. Middendorf, “A hybrid swarm intelligence algorithm for vehicle routing problem with time windows,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 93882–93893, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984660.
- [14] M. A. Al-Betar, Z. A. A. Alyasseri, M. A. Awadallah and I. Abu Doush, “Coronavirus herd immunity optimizer (CHIO),” *Neural Computing and Applications*, vol. 33, pp. 5011–5042, 2021, doi: 10.1007/s00521-020-05296-6.
- [15] M. Alqarni, “Sodium sulfur batteries allocation in high renewable penetration microgrids using coronavirus herd immunity optimization,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 2, 2022, Art. no. 101590, doi: 10.1016/j.asej.2021.09.017.
- [16] M. M. Refaat, S. H. A. Aleem, Y. Atia, Z. M. Ali and M. M. Sayed, “AC and DC Transmission Line Expansion Planning Using Coronavirus Herd Immunity Optimizer,” in 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Assiut, Egypt, Dec. 14–16, 2021, pp. 313–318, doi: 10.1109/MEPCON50283.2021.9686191.
- [17] C. Kumar, D. Magdalin Mary and T. Gunasekar, “MOCHIO: a novel Multi-Objective Coronavirus Herd Immunity Optimization algorithm for solving brushless direct current wheel motor design optimization problem,” *Automatika*, vol. 63, no. 1, pp. 149–170, 2022, doi: 10.1080/00051144.2021.2014035.
- [18] S. N. Makhadmeh, M. A. Al-Betar, M. A. Awadallah, A. K. Abasi, Z. A. A. Alyasseri, I. A. Doush, O. A. Alomari, R. Damaševičius, A. Zajančauskas and M. A. Mohammed, “A Modified Coronavirus Herd Immunity Optimizer for the Power Scheduling Problem,” *Mathematics*, vol. 10, no. 10, 2022, Art. no. 315, doi: 10.3390/math10030315.
- [19] A. Naderipour, A. Abdullah, M. H. Marzbali and S. A. Nowdeh, “An improved corona-virus herd immunity optimizer algorithm for network reconfiguration based on fuzzy multi-criteria approach,” *Expert Systems with Applications*, vol. 187, 2022, Art. no. 115914, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115914.
- [20] Z. M. Ali, S. H. A. Aleem, A. I. Omar, and B. S. Mahmoud, “Economical-Environmental-Technical Operation of Power Networks with High Penetration of Renewable Energy Systems Using Multi-Objective Coronavirus Herd Immunity Algorithm,” *Mathematics*, vol. 10, no. 7, 2022, doi: 10.3390/math10071201.
- [21] L. M. Dalbah, M. A. Al-Betar, M. A. Awadallah, and R. A. Zitar, “A coronavirus herd immunity

- optimization (CHIO) for travelling salesman problem,” *International Conference on Innovative Computing and Communications*, 2022, pp. 717–729, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-3071-2_58.
- [22] L. M. Dalbah, M. A. Al-Betar, M. A. Awadallah and R. A. Zitar, “A modified coronavirus herd immunity optimizer for capacitated vehicle routing problem,” *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 8, pp. 4782–4795, 2021, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.013.
- [23] M. Alweshah, S. Alkhalaileh, M. A. Al-Betar, and A. A. Bakar, “Coronavirus herd immunity optimizer with greedy crossover for feature selection in medical diagnosis,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 235, 2022, Art. no. 107629, doi: 10.1016/j.knosys.2021.107629.
- [24] S. Mirjalili and A. Lewis, “The whale optimization algorithm,” *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51–67, 2016, doi: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [25] S. Khalilpourazari, S. H. R. Pasandideh and A. Ghodratnama, “Robust possibilistic programming for multi-item EOQ model with defective supply batches: Whale Optimization and Water Cycle Algorithms,” *Neural Computing and Applications*, vol. 31, pp. 6587–6614, 2019, doi: 10.1007/s00521-018-3492-3.
- [26] S. K. Dewi and D. M. Utama, “A new hybrid whale optimization algorithm for green vehicle routing problem,” *Systems Science & Control Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 61–72, 2021, doi: 10.1080/21642583.2020.1863276.
- [27] M. Abdel-Basset, G. Manogaran, D. El-Shahat and S. Mirjalili, “A hybrid whale optimization algorithm based on local search strategy for the permutation flow shop scheduling problem,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 85, pp. 129–145, 2018, doi: 10.1016/j.future.2018.03.020.
- [28] J. Zhang, L. Hong, and Q. Liu, “An improved whale optimization algorithm for the traveling salesman problem,” *Symmetry*, vol. 13, no. 1, 2021, Art. no. 48, doi: 10.3390/sym13010048.
- [29] P. Stephan, T. Stephan, R. Kannan and A. Abraham, “A hybrid artificial bee colony with whale optimization algorithm for improved breast cancer diagnosis,” *Neural Computing and Applications*, vol. 33, pp. 13667–13691, 2021, doi: 10.1007/s00521-021-05997-6.
- [30] M. Abdel-Basset, V. Chang, and R. Mohamed, “HSMA_WOA: A hybrid novel Slime mould algorithm with whale optimization algorithm for tackling the image segmentation problem of chest X-ray images,” *Applied Soft Computing*, vol. 95, 2020, Art. no. 106642, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106642.
- [31] G. -Y. Ning and D. -Q. Cao, “Improved Whale Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems,” *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2021, 2021, Art. no. 8832251, doi: 10.1155/2021/8832251.
- [32] M. M. Solomon, “Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints,” *Operations Research*, vol. 35, pp. 254–265, 1987, doi: 10.1287/opre.35.2.254.

การศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับ

Study on thermal performance enhancement in rectangular duct heat exchanger installed with staggered baffle

สมพล สกุลหลง¹, สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์² และ ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์^{3,*}

¹กลุ่มวิจัยระบบพลังงาน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา พังงา สุราชนา ศรีราชา ชลบุรี 20230

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40000

³สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ทะเลชุมพร เมือง ลพบุรี 15000

Sompol Skullong¹, Supattarachai Suwannapan² and Panuwat Hoonpong^{3,*}

¹Energy System Research Group, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Thung Sukhla, Sriracha, Chon Buri, 20230, Thailand.

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus, Nai Mueang, Mueang, Khon Kaen, 40000, Thailand.

³Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University, Thale Chup Son, Mueang, Lopburi 15000, Thailand.

*Corresponding Author E-mail: panuwat.h@lawasri.tru.ac.th

Received: Sep 12, 2022; Revised: Dec 07, 2022; Accepted: Dec 19, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับ แบบให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่ โดยการทดลองจะมีการปรับอัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 5300 ถึง 24,000 ซึ่งลักษณะของแผ่นกั้นวางสลับมีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นกับความสูงของท่อ ($P/H = PR = 1$) อัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นกับความสูงของท่อ ($e/H = BR = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) และมุมปะทะการไหลของแผ่นกั้น ($\alpha = 45^\circ$) อิทธิพลของ BR ต่อพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน และตัวประกอบค่าการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) จะถูกศึกษาในการทดลองนี้ โดยที่การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานจะถูกแสดงในเทอมของเลขนัสเซิล (Nusselt Number, Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor, f) ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าในการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีค่า $BR = 0.4$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานสูงกว่าทุกกรณี ในขณะที่เมื่อพิจารณาตัวประกอบค่าการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจะพบว่าที่ค่า $BR = 0.2$ จะให้ค่าสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.59

คำสำคัญ: แผ่นกั้นวางสลับ, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน, การเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

Abstract

The research studies on thermal performance enhancement and friction loss behavior in a constant heat - fluxed rectangular duct heat exchanger installed with staggered baffle. The experiments were carried out by varying the airflow rate for Reynolds number from 5300 to 24,000. Several staggered baffle characteristics were introduced such as baffle pitch to duct height ratio ($P/H = PR = 1$), baffle to duct height ratio ($e/H = BR = 0.1, 0.2, 0.3$ and 0.4) and baffle attack angle ($\alpha = 45^\circ$). The effect of BR on heat transfer friction loss behaviors and thermal enhancement factor was experimentally investigated. The heat transfer and friction loss were presented in terms of Nusselt number and friction factor respectively. The experimental results reveal that the rectangular duct installed staggered baffle with $BR = 0.4$ provides higher heat transfer and friction loss than the other cases, while the duct with $BR = 0.2$ yields the highest thermal enhancement factor is about 1.59.

Keywords: staggered baffle, heat exchanger, friction loss, thermal performance enhancement

1. บทนำ

ความเจริญก้าวหน้าด้านต่างๆ บนโลกในปัจจุบันส่งผลทำให้เกิดการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่อันส่งผลให้เกิดการพัฒนาด้านเทคโนโลยีในการผลิตไม่ว่าจะเป็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ วัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆอันส่งผลทำให้มีการตอบสนองต่อผู้ใช้ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของเอกชนและรัฐบาลทั่วโลกต่างมีความตระหนักและเห็นถึงความสำคัญด้านการใช้พลังงานที่มีความต้องการเป็นอย่างมากในปัจจุบันและมีการใช้กันอย่างต่อเนื่องจนอาจทำให้เกิดผลกระทบในเวลาต่อมา อย่างไรก็ตามผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษ วิกฤตราคาเชื้อเพลิงและวิกฤตเศรษฐกิจ อาจส่งผลทำให้ทรัพยากรต่างๆหมดไปมากที่สุด ฉะนั้นแล้วการนำเอาองค์ความรู้ที่มีมาใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ อย่างจริงจังก็จะส่งผลช่วยให้อุปกรณ์กล่าวลดความสูญเสียและร้ายแรงที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในที่สุด ดังนั้นในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในปัจจุบันถือว่ามีความเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากการนำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้งานในระบบจึงทำให้การใช้พลังงานยิ่งสูงขึ้นเพราะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงจะย่อมส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนที่ดีขึ้นดังนั้นจึงส่งผลทำให้การออกแบบและ

การประยุกต์ใช้งานในหลายอย่าง ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เตาเผา เครื่องอบแห้ง เครื่องทำความเย็น เครื่องควบแน่น เป็นต้น อย่างไรก็ตามหลักการในการออกแบบอุปกรณ์และระบบจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติและการตอบสนองต่อความต้องการเป็นอย่างดีเพื่อทำให้เกิดความเชื่อมั่นและน่าเชื่อถือต่อบุคคลที่นำไปใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามการลดการใช้พลังงานของระบบจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนอย่างต่อเนื่องและส่งผลทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงอย่างคุ้มค่า

ครีป/แผ่นกั้นในลักษณะต่างๆ ถูกนำมาพัฒนาและมีบทบาทในการช่วยเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนที่ดีขึ้นโดยใช้หลักการพื้นฐานของการดูดซับความร้อนของชั้นความร้อน (Thermal Boundary Layer) ที่บริเวณชิดผนังตลอดความยาวท่อและพาความร้อนออกจากผนังท่อมายังบริเวณกลางท่อ อันเป็นผลทำให้เกิดการแยกตัวของของไหล การหมุนวนและการกระแทกเข้ากับผนังท่อ ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้เป็นสาเหตุนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแต่อย่างไรก็ตามลักษณะของครีปที่จัดวางจะส่งผลให้การไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปทรงและลักษณะของทางจัดวางที่แตกต่างจนส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมไปถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการพัฒนารูปร่างของครีปในการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจะส่งผลทำให้ค่า

สมรรถนะเชิงความร้อนดีขึ้นต่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ใน ท่อขนาน โดย Promthaisong and Promvong [1] ได้ ทำการศึกษาพฤติกรรมความร้อนในช่องขนานเครื่องอุ่น อากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งครีบล้อเหลี่ยมคางหมู วางเป็นรูปตัววีซึ่งพบว่าช่วยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและ สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศดีขึ้น Prasopsuk et al.[2] ได้ทำการทดลองติดตั้งปีกโค้งบนแผ่นดูดซับความร้อนภายในท่ออุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้ดีขึ้นโดยการทดลองช่วงเลขเรย์โนลด์อยู่ ระหว่าง 5400 ถึง 23,000 ซึ่งปีกโค้งจะทำมุมเอียง 45 องศา ตามทิศทางการไหลและยังพบว่าติดตั้งปีกโค้งจะให้ค่า อัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานสูงกว่าท่อผนัง เรียบ Skullong et al. [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความร้อน และการต้านทานการไหลภายในท่ออุ่นอากาศพลังงาน แสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนชนิดร่องผสมปีก พูรณ โดยการทดลองพบว่าแผ่นดูดซับความร้อนดังกล่าวให้ ค่าการถ่ายเทความร้อนและการต้านทานการไหลสูงกว่าท่อ ผนังเรียบและมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าการใช้แผ่น ดูดซับความร้อนชนิดร่องเพียงอย่างเดียวในช่วง 37.7–46.3 เปอร์เซ็นต์ Skullong [4] ทำการศึกษาการทดลองเกี่ยวกับแรง เสียดทานของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่ออุ่น อากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีติดตั้งครีบล้อเหลี่ยมคางหมู บนแผ่นดูดซับความร้อน โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการ ระบายความร้อนที่มีผลต่อการติดตั้งครีบล้อเอียงทำมุม ($\alpha = 45^\circ$ และ 60°) ซึ่งเงื่อนไขในการทดลองคือฟลักซ์ความร้อนคงที่ การไหลของอากาศภายในท่อเลขเรย์โนลด์ Reynolds (Re) อยู่ ระหว่าง 5300–23,000 ความสูงของครีบล้อเท่ากับ ($b/H = BR = 0.1, 0.2$ และ 0.3) โดยพบว่าจากการทดลองการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบประมาณ 3.7–4.7 เท่า ในขณะที่ปัจจัยแรงเสียดทาน (f) ก็เพิ่มขึ้นเท่ากับ 24.4–70.7 เท่า Skullong et al. [5] ทำการศึกษาพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งครีบบางบนแผ่นดูดซับความร้อนซึ่งพบว่า สามารถทำให้การถ่ายเทความร้อน ความเสียดทานและ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อผิวเรียบ Jim et al [6] ศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรม การไหลและการถ่ายเทความร้อน

ร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้ง ครีบบรูปตัววีต่อเนื่องบนแผ่นดูดซับความร้อน พบว่าการ ติดตั้งครีบล้อมุมปะทะ 45 องศาให้ค่าถ่ายเทความร้อนและค่า สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด Chokphoemphun et al. [7] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียด ทานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี การติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนเซาะร่องสามเหลี่ยมโดยมีมุม ปะทะที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 30 และ 45 องศาช่วงเลขเรย์ โนลด์อยู่ระหว่าง 6700 ถึง 17,000 จากการทดลองพบว่า การ ติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนที่ทำการเซาะร่องสามเหลี่ยมจะ ช่วยในการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานที่ สูงขึ้นและส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 1.49 Promvong and Skullong [8] ได้ทำการศึกษาการติดตั้งปีกด้านบนแผ่นดูดซับ ความร้อนเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ช่วงระยะเลข เรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 4100 ถึง 25,500 และมีค่าอัตราการ ถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียแรงเสียดทานสูงกว่าท่อผนัง เรียบราว 5.7 และ 40 เท่า Promthaisong et al.[9] ได้ ทำการศึกษาเชิงทดลองสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่ออุ่น อากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งแผ่นดูดซับความ ร้อนแบบครีบล้อ โดยกรณีการศึกษาอิทธิพลของความสูงครีบล้อ จำนวน 4 ค่า ($e/H = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) มีอิทธิพลต่อการ ถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานและ สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อเทียบกับกรณีท่อผิวเรียบ Kumar et al.[10] ทำการทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนและการ ไหลด้วยการติดตั้งครีบล้อบนแผ่นดูดซับความร้อนภายใน เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ผลการทดลองพบว่า การ ติดตั้งครีบล้อรูปตัววีมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 6.74 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ Tamna et al.[11] ทำการทดลองร่วมกับการจำลองเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการเพิ่ม การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีบนแผ่นดูดซับความร้อน จาก การวิจัยพบว่าติดตั้งแผ่นกั้นบนแผ่นดูดซับความร้อนให้ ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ ถึง 622–753 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่

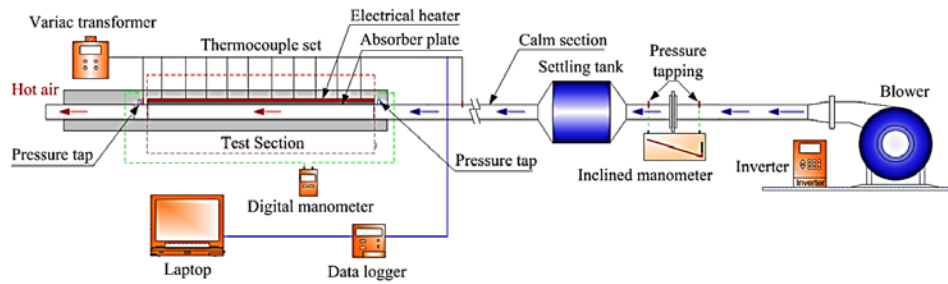
ที่ 1.83 โดยผลการทดลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการจำลองเชิงตัวเลข Skullong et al.[12] ทำการทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้แก่เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์โดยติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนแบบร่องผสมปีกเจาะรู จากการทดลองพบว่าผลการติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนแบบร่องผสมปีกเจาะรูมีค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อผนังเรียบ Hoonpong and Skullong [13] ทำการติดตั้งแผ่นกันตัววี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 2.32–4.3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ Xiao et al.[14] ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขถึงการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมู โดยพบว่าแผ่นที่มีการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมูจะสร้างการไหลที่ช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นดูดซับผิวเรียบ Dong et al.[15] ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการจำลองเชิงตัวเลขที่มีการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมูที่มีมุมปะทะต่างๆ และทำการเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ ซึ่งพบว่าครีบลีเหลี่ยมคางหมูที่มีมุมปะทะ 60 องศาจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด Promvong and Skullong [16] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบลีเหลี่ยมคางหมู ผลการทดลองพบว่าผลการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่ใช้ครีบลีเหลี่ยมคางหมูจะให้ค่าที่ดีกว่าการใช้ร่องเพียงอย่างเดียว Promvong and Skullong [17] ได้ทำการพัฒนาแผ่นกันติดตั้งกับแผ่นดูดซับความร้อนรูปตัววีผสมร่องเพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ Promvong et al.[18] ได้ทำการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์โดยมีการติดตั้งปีกครีบลีเหลี่ยมคางหมูบนแผ่นดูดซับความร้อนและเปรียบเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ โดยการศึกษาพบว่าผลการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมูบนแผ่นดูดซับความร้อนจะช่วยให้ภายในเครื่องอุ่นอากาศมีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผนังเรียบเท่ากับ 17.1–78.21 เปอร์เซ็นต์และมีสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.1 Jayranaiwachira

et al.[19] ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งแผ่นดูดซับความร้อนแบบเจาะรูร่องมีครีบลีเหลี่ยมคางหมูเรียงทำมุม 0, 45, 90 และ 135 องศา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 4.94–5.10 Baissi et al.[20] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความร้อนที่มีผลต่อการไหลภายในท่ออุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งครีบลีเหลี่ยมคางหมู 45 องศา บนแผ่นดูดซับความร้อน ซึ่งการทดลองพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนและการต้านทานการไหลสูงกว่าท่อผนังเรียบ

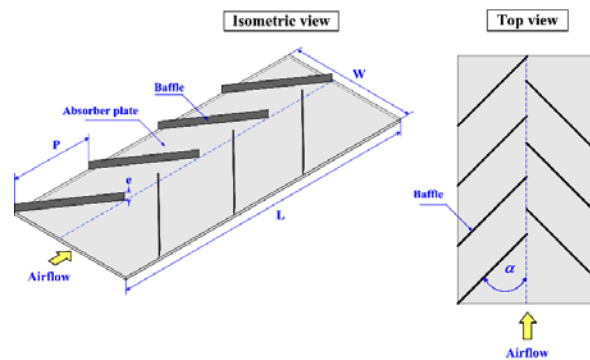
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลการติดตั้งแผ่นกันจะช่วยให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดีดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวทางในการพัฒนาแผ่นกันเพื่อติดตั้งภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทรงรีเหลี่ยมคางหมูเพื่อให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นและทำการเปรียบเทียบอิทธิพลการติดตั้งผลต่างของความสูงแผ่นกันต่างๆ กับท่อผนังเรียบว่ามีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในสภาวะปลั๊กซ์ความร้อนคงที่ โดยการทดลองการศึกษาดังกล่าวใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบซึ่งการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 5300 ถึง 24,000

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาลักษณะการทดลองการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนโดยใช้แผ่นกันวางสลับภายในท่อรีเหลี่ยมคางหมู ซึ่งการทดลองจะใช้ขนาดความสูงท่อเท่ากับ 30 มิลลิเมตร มีความยาวของแผ่นดูดซับความร้อนที่ทำการติดแผ่นกันวางสลับเท่ากับ 420 มิลลิเมตร กว้าง 300 มิลลิเมตร โดยการทดลองจะมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนความสูงแผ่นกันต่อความสูงท่อเท่ากับ $(c/H = BR)$ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 และใช้ช่วงในการควบคุมความเร็วลมให้อยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5300 ถึง 24,000 ในช่วงเวลาการทดสอบจะต้องรอให้อุณหภูมิผิวภายในทั้ง 12 จุดและอุณหภูมิเข้าออก 2 จุดมีค่าคงที่ก่อนจึงจะบันทึกค่าในขณะเดียวกันจะต้องดำเนินการวัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบด้วย โดยแสดงในรูปที่ 1 และตำแหน่งการติดตั้ง-จุดวัดของชุดทดลองดังรูปที่ 2

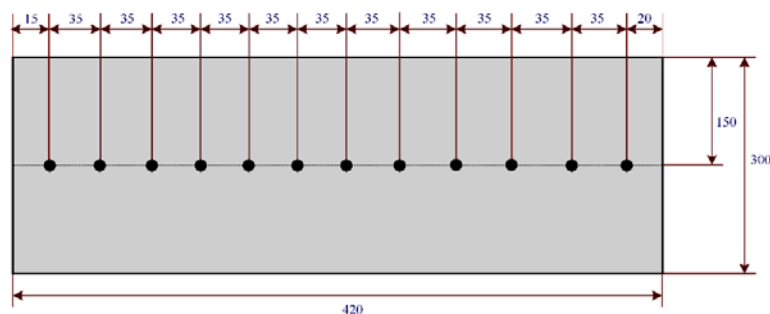


รูปที่ 1 โดอะแกรมชุดทดลองเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า



(ก)

All dimensions in mm



(ข)

รูปที่ 2 แสดงลักษณะตำแหน่งการติดตั้งและจุดวัดของชุดทดลอง (ก) ส่วนทดสอบที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น และ (ข) ตำแหน่งติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิ

จากตารางที่ 1 เป็นการแสดงถึงค่าความแม่นยำของเครื่องมือวัดและค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง [20]

การทดลองจะเริ่มตั้งแต่เปิดสวิตช์พัดลมแรงดันขนาด 3 กิโลวัตต์ ซึ่งการไหลของแรงดันอากาศจะไหลผ่านแผ่นออริฟิซสำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าสู่แท่งปรับสภาพการไหล (Settling tank) ของอากาศและมีช่องปรับสภาพการไหล (Calm section) ของอากาศให้มีลักษณะพัฒนาเต็มที่ (Fully developed flow) ดังแสดงใน รูปที่ 2 (ก) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ (แผ่นดูดซับความร้อนที่ติดตั้งแผ่นกั้น

วางสลับ) โดยช่วงทดสอบจะมีการติดตั้งดังแสดงใน รูปที่ 2 (ข) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouple) จำนวน 12 โดยมีระยะ จุดทำหน้าที่วัดอุณหภูมิผิวแผ่นดูดซับความร้อนและเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดอาร์ทีดี (RTD PT100) จำนวน 2 จุดใช้วัดอุณหภูมิทางเข้าทางออก ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger FLUKE 2680A) และประมวลผลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ในส่วนของดิจิทัลโวลต์มิเตอร์จะถูกนำมาใช้ในการวัดค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ จากนั้นนำผลการทดลองมาพิจารณาตามทฤษฎีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงถึงความแม่นยำของเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัด	ความแม่นยำ
เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดอาร์ทีดี (RTD PT100)	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouple)	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
มานอมิเตอร์ (Manometer)	$\pm 0.5\%$
ตัวแปร	ความคลาดเคลื่อน
เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re)	$\pm 4.5\%$
เลขนัสเซล (Nusselt number, Nu)	$\pm 5.2\%$
ประกอบเสียดทาน (Friction factor, f)	$\pm 6.1\%$

การหาค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยเลขเรย์โนลด์ในท่อนของไฮดรอลิกส์ไดมิเตอร์ (D_h) สามารถเขียนได้ดัง สมการที่ (1)

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ V เป็นความเร็วเฉลี่ย, μ เป็นความหนืดสมบูรณ์ของของไหล และ h เป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ซึ่งหาได้จากการวัดอุณหภูมิและความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ ความร้อนที่ให้กับอากาศและความแตกต่างของอุณหภูมิผนังและอุณหภูมิอากาศ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้จากสมการ

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_b)} \quad (2)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ผิวสัมผัสการถ่ายเทความร้อน, T_w คือค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่วัดจากจุดแต่ละจุดของผนังจำนวน 12 จุด, T_b คืออุณหภูมิของกลุ่มอากาศโดยสามารถคำนวณได้จาก $T_b = (T_i + T_o)/2$, โดย T_i และ T_o คืออุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออก ในท่อนของ Q สามารถหาได้จาก $Q = \dot{m} C_p \Delta T$ โดยที่ $\dot{m}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ และ ΔT คือค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออก เลขนัสเซลเขียนได้เป็น

$$Nu = \frac{h D_h}{K} \quad (3)$$

ตัวประกอบแรงเสียดทานเขียนได้เป็น สมการที่ (4)

$$f = \frac{2 D_h \Delta P}{\rho U^2 L} \quad (4)$$

โดยที่ ΔP คือความดันตกคร่อม และ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ

ซึ่งการหาค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$TEF = \left(\frac{Nu}{Nu_o} \right) \left(\frac{f}{f_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

ในการทดลองมีการหาค่าความแม่นยำของเครื่องมือวัดรวมถึงค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง [21] และมีการทดลองซ้ำเพื่อความถูกต้องของข้อมูลในงานวิจัย

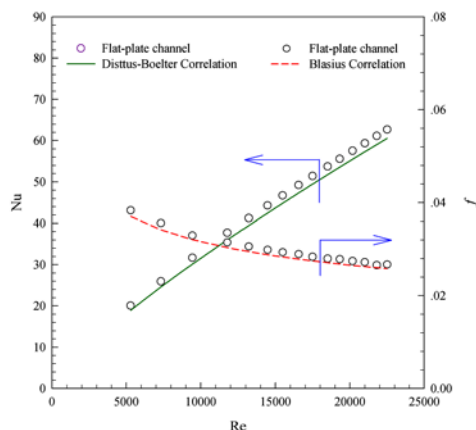
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การตรวจสอบท่อผนังเรียบ

การทดลองเป็นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนโดยใช้แผ่นกั้นวางสลับภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความสูงของช่องขนานเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ($AR = 10$), ความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อที่ ($BR = e/H = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4), ที่มุมปะทะ ($\alpha = 45^{\circ}$) การจัดวางระยะพิคต์ ($P = 30$ มิลลิเมตร) โดยมีช่วงระยะแผ่นดูดซับความร้อน (Test section) ความยาวเท่ากับ 420 มิลลิเมตร ซึ่งการทดลองดังกล่าวจะแสดงผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานกรณีท่อ

ผนังเรียบเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์จากเอกสารอ้างอิง Dewitt et al.[21], แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์, แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์, แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์, แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ และ แสดงผลการเปรียบเทียบเลขเรย์โนลด์กับสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 3 เป็นผลการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานกรณีท่อผนังเรียบเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Blasius สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อจากเอกสารอ้างอิง Dewitt et al.[21] โดยแสดงการเปรียบเทียบค่า Nu และ f ระหว่างผลการทดลองกรณีแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบกับสหสัมพันธ์จากสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ พบว่า ค่า Nu มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 6.6% ขณะที่ f มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.3% ทั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบเพื่อความแม่นยำของชุดทดสอบ โดยผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับสหสัมพันธ์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์กรณีท่อผนังเรียบ

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

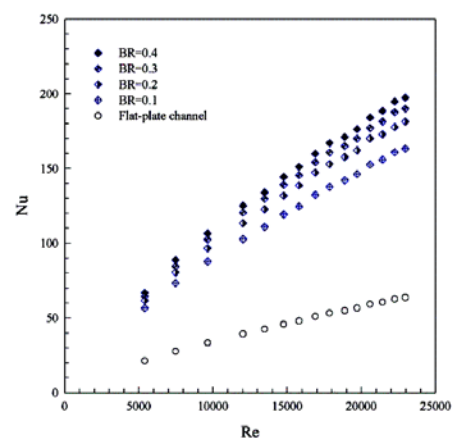
$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (6)$$

สหสัมพันธ์ของ Blasius

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (7)$$

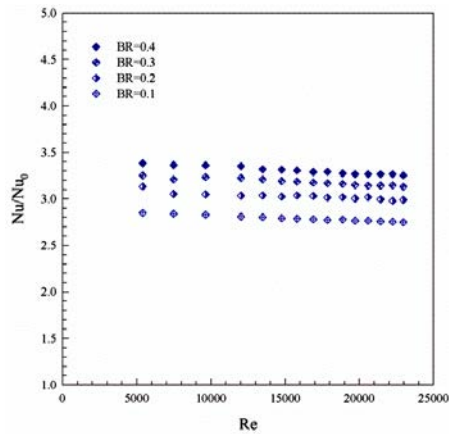
3.2 การถ่ายเทความร้อน ความเสียดทาน และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนในพจน์ (Nu) กับการไหลในพจน์ (Re) จากการทดลองพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นที่ความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ (BR= 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4) จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการไหลในพจน์ (Re) โดยแผ่นกั้นความสูงที่ BR = 0.4 จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นที่มีความสูงมากจะมีระดับความปั่นป่วนในท่อมกและส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อที่มีอุณหภูมิสูงและของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ดี

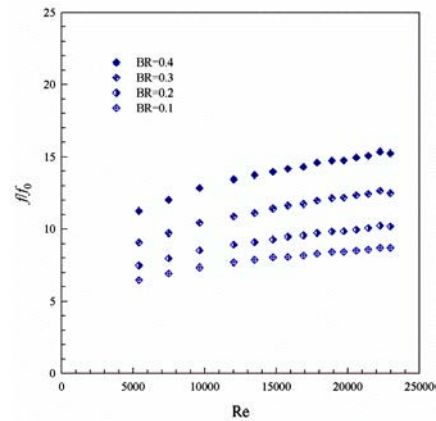


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซล

รูปที่ 5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกรณีติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับต่อเลขนัสเซลผนังเรียบ (Nu/Nu_0) กับการไหลที่พจน์ (Re) จากการทดลองพบว่าค่า (Nu/Nu_0) มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น โดยค่า (Nu/Nu_0) กรณี ($e/H= 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.89, 3.21, 3.36 และ 3.4 เท่าตามลำดับ

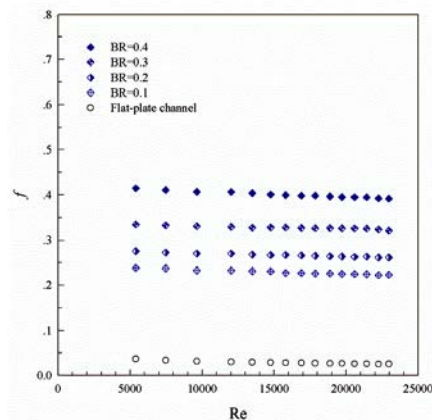


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับสัดส่วนเลขนัสเซล



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับสัดส่วนตัวประกอบเสียดทาน

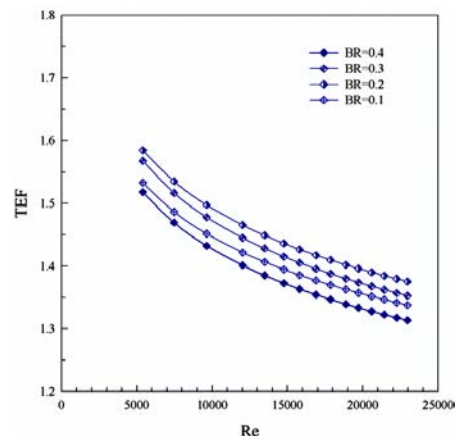
รูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสียดทาน (f) กับการไหลในพจน์ (Re) จากการทดลองพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ ($BR = b/H$) จะให้ค่าความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงแผ่นกั้น โดยแผ่นกั้นที่มีความสูง $BR = 0.4$ จะขัดขวางการไหลของของไหลกว่ากรณีอื่นๆ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเสียดทานกรณีติดตั้งแผ่นกั้นกับความเสียดทานท่อผนังเรียบ (f/f_0) จากการทดลองพบว่าค่า (f/f_0) มีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองพบว่ากรณี $e/H = 0.4$ มีค่าความเสียดทานสูงสุดตามด้วย $e/H = 0.3, 0.2$ และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.6, 11.2, 8.6 และ 6.2 ตามลำดับ

รูปที่ 8 เป็นการประเมินผลของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ (5) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ในรูปของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) กับการไหลในพจน์ Re โดยพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับที่มีความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ $BR = 0.2$ จะให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนความสูงที่สุดเท่ากับ 1.59 และตามด้วย $BR = 0.3, 0.1$ และ 0.4 มีค่าเท่ากับ 1.56, 1.54 และ 1.52 ตามลำดับ

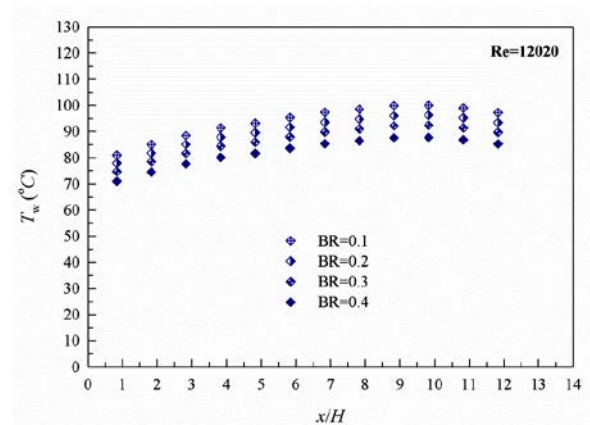


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์

3.3 ผลกระทบระหว่างอุณหภูมิผิวกับระยะช่วงทดสอบ

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิว (T_w) กับระยะช่วงทดสอบ (x/H) ระหว่าง 1 ถึง 12 ของการเปรียบเทียบตามสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้น ($BR = 0.1$,

0.2, 0.3 และ 0.4) ที่เลขเรย์โนลด์ 12,020 โดยเมื่อพิจารณาจากการทดลองพบว่าเมื่อระยะช่วงทดสอบที่ยาวขึ้น อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเป็นเชิงเส้นและจะลดลงเล็กน้อยที่บริเวณทางออกของท่อเนื่องจากผลกระทบที่ทางออกซึ่งอากาศร้อนภายในท่อไหลไปสู่อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำด้านนอกท่อ โดยการติดตั้งแผ่นกั้นที่ $BR = 0.1$ มีค่าอุณหภูมิผิวสูงสุด ตามด้วย $BR = 0.2, 0.3$ และ 0.4 ตามลำดับ เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นที่มีความสูงน้อยจะเกิดการไหลหมุนวนน้อยส่งผลให้เกิดการระบายความร้อนบริเวณผิวท่อน้อยตามเมื่อเทียบกับแผ่นกั้นที่มีความสูงมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4 และสมการที่ (2) คือ กรณี $BR = 0.4$ ให้ค่า T_w น้อย เมื่อนำไปคำนวณในสมการที่ (2) จะทำให้ h มีค่ามาก และเมื่อนำไปแทนในสมการที่ (3) จะส่งผลให้ Nu มีค่าสูงสุดสำหรับกรณีทดสอบนี้ โดยจะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 4

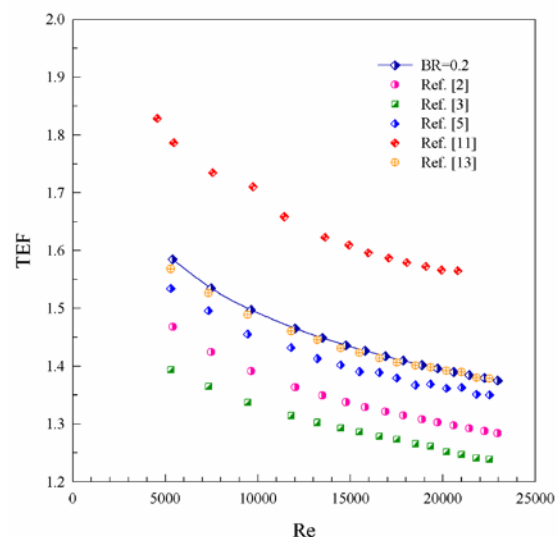


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิว (T_w) กับ ระยะช่วงทดสอบ (x/H)

3.4 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับงานวิจัยในอดีต

การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของงานวิจัยปัจจุบันกับงานวิจัยในอดีตแสดงในรูปที่ 10 โดยคัดเลือกค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Maximum TEF, TEF_{Max}) ของงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับ TEF_{Max} ของงานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [2],[3],[5],[11] และ [13] จากการเปรียบเทียบพบว่า TEF_{Max} ของงานวิจัยนี้มี

ค่าสูงกว่า TEF_{Max} ของงานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [2],[3],[5] และ [13] อยู่ที่ 1–13% แต่มีค่าต่ำกว่างานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [11] เฉลี่ย 11% เนื่องจากงานวิจัยในอดีตจากเอกสารอ้างอิง [11] ทำการจัดวางแผ่นกั้นแบบต่อเนื่อง ทำให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนสูง แต่ค่าความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นสูงมากเช่นกัน ซึ่งโดยภาพรวมเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตแล้ว การติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับของงานวิจัยนี้ถือว่ามีข้อได้เปรียบในแง่ของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจะทำการออกแบบแผ่นกั้นรูปทรงใหม่ๆ และทำการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงๆ และให้มีค่าความเสียดทานต่ำๆ อันจะส่งผลทำให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงยิ่งขึ้นต่อไปในงานวิจัยเรื่องถัดไป



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของงานวิจัยปัจจุบันกับงานวิจัยในอดีต

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่าการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อหาค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าความเสียดทานที่ผลต่ออิทธิพลการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับที่มีการปรับเปลี่ยนตามสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้น ($BR = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) มีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยการทดสอบจะใช้

อากาศในการทำงานแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วงระหว่าง 5300 ถึง 24,000 ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การติดตั้งแผ่นกั้นภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นแต่ในขณะเดียวกันยังส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามในการติดตั้งแผ่นกั้นดังกล่าวจะส่งผลดีต่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นกว่าท่อผนังเรียบเท่ากับ 2.8 ถึง 3.4 เท่า

2) เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นภายในท่อยังส่งผลทำให้ทราบถึงผลที่มีต่อความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อในการถ่ายเทความร้อนและการเกิดแรงเสียดทานภายในท่อ โดยพบว่าเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่มีความสูงจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นเพราะของไหล (อากาศ) จะไปกระทบกับผิวร้อนจะส่งผลให้ของไหลไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อนเพื่อให้เกิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นที่ $(b/H = BR)$ 0.4, 0.3, 0.2 และ 0.1 ตามลำดับ

3) จากการเปรียบเทียบการติดตั้งแผ่นกั้นกับกรณีท่อผนังเรียบพบว่าที่การติดตั้งแผ่นกั้น $(b/H = BR)$ เท่ากับ 0.2 จะให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด (TEF) โดยจะให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.59

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาเกี่ยวกับระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้อากาศเป็นของไหลในการทำงานได้และยังสามารถนำไปเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกันซึ่งจะทำให้เกิดสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้นกว่าระบบเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Promthaisong and P. Promvonge, "Thermal behaviors in solar air heater channel with v-shaped trapexoidal-ribs on absorber plate," *Engineering Transactions*, vol 21, no. 1, pp. 62–80, 2018.
- [2] C. Prasopsuk, W.Chingtuaythong, P. Promvonge, S. Wittayapiyanon and S. Skullong, "Heat transfer and friction in solar air heater duct with curved-winglet roughness on absorber plate," in *Me-nett 31st*, Nakhon Nayok, Thailand, Jul. 4–7, 2017, pp. 1161–1168.
- [3] S. Skullong, "Performance Enhancement in a Solar air heater duct with inclined ribs mounted on the absorber," *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 55–64, 2017, doi: 10.14456/jrame.2017.5.
- [4] S. Skullong, P. Promvonge, C. Thianpong and M. Pimsarn, "Thermal Performance in Solar Air Heater Channel with Combined Wavy-groove and Perforated-delta Wing Vortex Generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 611–620, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.107.
- [5] S. Skullong, C. Thianpong and P. Promvonge, "Effects of rib size and arrangement on forced convective heat transfer in a solar air heater channel," *Heat Mass Transfer*, vol. 51, pp. 475–1485, 2015, doi: 10.1007/s00231-015-1515-5.
- [6] D. Jin, M. Zhang, P. Wang and S. Xu, "Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in a solar air heater duct with multi V-shaped ribs on the absorber plate," *Energy*, vol. 89, pp. 178–190, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.069.
- [7] S. Chokphoemphun, S. Hongkong, S. Thongdaeng and S. Chokphoemphun, "Experimental study and neural networks prediction on thermal performance assessment of grooved channel air heater," *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. 163, 2020, Art. no. 120397, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120397.
- [8] P. Promvonge and S. Skullong, "Enhanced heat transfer in rectangular duct with punched winglets," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 660–671, 2020, 10.1016/j.cjche.2019.09.012.

- [9] P. Promthaisong, P. Hoonpong, P. Eiamsa-ard, N. Koolnapadol, P. Promvonge and S. Skullong, "Experimental Investigation on Thermal Performance in a Solar Air Heater with Ribbed Absorber Plate," *Journal of Renewable Energy for Community*, vol. 5, no. 1, pp. 80–89, 2022.
- [10] A. Kumar, R. P. Saini and J. S. Saini, "Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having multi v-shaped with gap ribs as artificial roughness," *Renewable Energy*, vol. 58, pp. 151–163, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.03.013.
- [11] S. Tamna, S. Skullong, C. Thianpong and P. Promvonge, "Heat transfer behaviors in a solar air heater channel with multiple V-baffle vortex generators," *Solar Energy*, vol. 110, pp. 720–735, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.10.020.
- [12] P. Hoonpong and S. Skullong, "Performance improvement of solar air heater with v-baffles on absorber plate," *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 29–39, 2018, doi: 10.14456/jrame.2018.4.
- [13] H. Xiao, Z. Dong, Z. Liu and W. Liu, "Heat transfer performance and flow characteristics of solar air heaters with inclined trapezoidal vortex generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 179, 2020, Art. no. 115484, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115484.
- [14] Z. Dong, P. Liu, H. Xiao, Z. Liu and W. Liu, "A study on heat transfer enhancement for solar air heaters with ripple surface," *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 477–487, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.042.
- [15] P. Promvonge and S. Skullong, "Heat transfer in solar receiver heat exchanger with combined punched-V-ribs and chamfer-V-grooves," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 143, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118486.
- [16] P. Promvonge and S. Skullong, "Thermal characteristics in solar air duct with V-shaped flapped-baffles and chamfered-grooves," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 172, 2021, Art. no. 121220, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121220.
- [17] P. Promvonge, P. Promthaisong and S. Skullong, "Numerical heat transfer in a solar air heater duct with punched delta-winglet vortex generators," *Case studies in thermal engineering*, vol. 26, 2021, Art. no. 101088, doi: 10.1016/j.csite.2021.101088.
- [18] N. Jayranaiwachira, P. Promvonge and S. Skullong, "Thermal-hydraulic performance of solar receiver duct with inclined punched-ribs and grooves," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 39, 2022, Art. no. 102437, doi: 10.1016/j.csite.2022.102437.
- [19] M. T. Baissi, A. Brima, K. Aoues, R. Khanniche and N. Moummi, "Thermal behavior in a solar air heater channel roughened with delta-shaped vortex generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 165, 2020, Art. no. 113563, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.134.
- [20] R.J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results," *Thermal and Fluid Science*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1988, doi: 10.1016/0894-1777(88)90043-X.
- [21] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, "Internal Flow," in *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Hoboken, NJ, USA: John-Wiley & Sons, 2006, ch. 8, sec. 8.5–8.10, pp. 514–532.

การส่งเสริมค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดด้วยเครื่องทำน้ำเย็นแบบ ระบายความร้อน

An Improvement of Tubular-Ice Making Machine

Coefficient of Performance with a Commercial Water Chiller

พงศ์ธร ญาติพร้อม และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ*

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

Pongthorn Yartprom and Anusorn Chinsuwan*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Nai Mueang, Mueang, Khon
Kaen, 40002, Thailand

*Corresponding Author E-mail: pongthorny@kkumail.com

Received: Oct 14, 2022; Revised: Dec 21, 2022; Accepted: Dec 22, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) ของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด โดยใช้เครื่องทำน้ำเย็นเชิงพาณิชย์และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นในการลดอุณหภูมิน้ำป้อน การวิจัยทำโดยพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการลดอุณหภูมิเบื้องต้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบกับการจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายผลสมรรถนะทางความร้อนได้ดี โดยรูปแบบการไหลแบบน้ำป้อนไหลวนให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (ϵ) สูงกว่าแบบน้ำป้อนไหลผ่านที่จำนวนหน่วยของการถ่ายเท (NTU) ที่เท่ากันในทุกๆ อัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนต่อน้ำเย็น (w_r) เมื่อนำระบบให้ความเย็นล่วงหน้ามาทดสอบร่วมกับเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดแล้ว พบว่า ที่เครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดขนาด 50 ton/day เมื่อระบบทำอุณหภูมิน้ำป้อนที่ 12°C โดยที่ไม่ทำให้อุณหภูมิน้ำกลับเข้าเครื่องทำน้ำเย็นเกินกว่าค่ากำหนดของเครื่องผลิตน้ำเย็น โดยทั่วไปที่ 12.78 แล้ว $^{\circ}\text{C}$ สามารถลดเวลาการทำงานในหนึ่งรอบการผลิตได้ 9.1 นาที, ลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้ 7.47 kW-h, COP เพิ่มขึ้นจาก 1.89 เป็น 2.48 จากระบบการผลิตเดิม แบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานแบบรอบการผลิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนพลังงานล่วงหน้าได้

คำสำคัญ: รอบการผลิต, การผลิตน้ำแข็งหลอด, เครื่องทำน้ำเย็น, ระบบให้ความเย็นล่วงหน้า

Abstract

The purpose of this study is to increase the coefficient of performance (COP) of the tube ice maker by using commercial water chillers and plate heat exchanger. The research was done by developing a mathematical model for predicting the thermal behavior of a pre-cooling system. By comparing predicted temperatures with measured temperatures, it is seen that both are agreed well and mathematical models can be used to predict thermal performance. The circulating water flow model provides a higher effectiveness (ϵ) at the same number of transfer units (NTU). with a certain heat capacity rate ratio of the feed water to the chilled water (w_r). The pre-cooling system was tested with the tube ice machine. It was found that when the system reduces the feed water temperature to

12°C with the temperature of return water to chiller not more than that required by commercial water chillers at 12.78 °C , the batch time can be reduced by 9.1 minutes, increase overall power consumption can be reduced by 7.47 kw·h and COP can be increased from 1.89 to 2.48. This resulted could be applied to pre-cooling or pre-heating of any batch production process.

Keywords: Batch process, Tubular ice maker, Commercial water chiller, Precooling system

1. บทนำ

สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นเมืองร้อน มีความนิยมใช้น้ำแข็งสำหรับอุปโภคบริโภค โดยน้ำแข็งที่มีการผลิตในประเทศ มีน้ำแข็งหลอด น้ำแข็งซอง และน้ำแข็งบด โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบการนำไปใช้ น้ำแข็งหลอดเป็นที่นิยมใช้สำหรับใส่เครื่องดื่ม แห่อาหารตามร้านอาหารตามสั่ง หรือร้านอาหารทั่วไป เป็นน้ำแข็งที่คนส่วนใหญ่ใช้ในการอุปโภคบริโภคมากที่สุด และเป็นที่ต้องการอย่างมากในฤดูร้อน

น้ำแข็งหลอด มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง มีหลายขนาด ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องผลิตน้ำแข็ง โดยขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งคือการนำน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้องปกติที่ผ่านการกรอง นำมาผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube heat exchanger) ที่มีแอมโมเนียซึ่งเป็นสารทำความเย็นไหลฝั่งเปลือก ทำให้น้ำที่ไหลผ่านผิวด้านนอกท่อในแนวตั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งซึ่งคือน้ำแข็งเกาะรอบผิวท่อ จนกระทั่งได้ขนาดของน้ำแข็งตามที่ต้องการ น้ำแข็งก็จะไหลออกมาสู่เครื่องตัดน้ำแข็งหลอดและส่งสู่ผู้บริโภคต่อไป

ในการผลิตน้ำแข็งหลอดนั้นแบ่งออกเป็นสองช่วง คือช่วงที่ให้ความเย็นกับน้ำจนน้ำมีอุณหภูมิต่ำลง ซึ่งเป็นช่วงที่มีการทำความเย็นแบบความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และช่วงที่มีการทำความเย็นแบบความร้อนแฝง (latent heat) การให้ความเย็นในช่วงความร้อนสัมผัสนั้นไม่จำเป็นต้องอาศัยการทำงานภายในเครื่องผลิตน้ำแข็งเพื่อลดอุณหภูมิ น้ำป้อน ดังนั้นการเตรียมน้ำป้อนให้มีอุณหภูมิลดลงก่อนป้อนเข้าเครื่องผลิตน้ำแข็งจึงเป็นวิธีที่จะสามารถลดการใช้พลังงานในการผลิตน้ำแข็ง และทำให้ลดระยะเวลาในหนึ่งรอบการผลิตลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำแข็งที่ได้เพิ่มขึ้น อ้างอิงจากเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดขนาด 30-50 ton/day ที่อุณหภูมิ น้ำป้อนที่ 30°C ผลผลิตจะเพิ่มขึ้น 1%

ต่ออุณหภูมิ น้ำป้อนที่ลดลงทุกๆ 1°C [1]

มีงานวิจัยที่ศึกษาสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดเช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอดโดยเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือกและแบบท่อสองชั้นแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำป้อนและไอของสารทำความเย็น [2] โดยดัดแปลงระบบผลิตเดิมเพื่อติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดและคอมเพรสเซอร์ของสารทำความเย็น พบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือกที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่มากกว่ามีประสิทธิภาพดีกว่า โดยหลังติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของการทำความเย็นเท่ากับ 1.66 จาก 1.33 ปริมาณการผลิตเพิ่มเป็น 26.79 จาก 22.43 ton/day ลดระยะเวลาในหนึ่งรอบการผลิตลงได้ 7 นาที และสามารถลดการใช้ไฟฟ้าไปได้ 17.1%

ศึกษาการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงาน และอัตราการพลังงานต่อหน่วยการผลิตระหว่างท่อเรียบและท่อติดครีبد้านนอกท่อทำน้ำแข็งของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด[3] พบว่า การติดครีบท่อส่งผลให้รอบการผลิตน้ำแข็งมีค่าลดลงประมาณ 10% เมื่อกำหนดให้ความหนาของน้ำแข็งหลอดเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ในกรณีท่อเรียบ มีรอบการผลิตเท่ากับ 29.4 นาที ในขณะที่ท่อติดครีบกานาน 6, 8 และ 10 ครีบท่อนี้มีรอบการผลิตเท่ากับ 25.7, 25.3 และ 25.0 นาทีตามลำดับ โดยพลังงานที่ใช้ต่อรอบการผลิตน้ำแข็งและอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตเฉลี่ยในหนึ่งรอบการผลิตระหว่างกรณีท่อเรียบ และท่อติดครีบท่อ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน การเพิ่มครีบท่อทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่ามากขึ้นและสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากท่อทำน้ำแข็งได้ แต่การเพิ่มครีบท่อจาก 6 ครีบท่อนี้เป็น 10 ครีบท่อนี้หรือคิดเป็นจำนวนครีบท่อที่เพิ่มขึ้นประมาณ 70% สามารถลดเวลาต่อ

หนึ่งรอบการผลิตลงได้เพียง 0.7 นาที หรือ 2% เท่านั้น พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น มีผลช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนสัมผัส แต่เมื่อน้ำแข็งหลอดเริ่มมีความหนาที่ 4 มิลลิเมตรขึ้นไป ความหนาของน้ำแข็งจะทำให้สภาพเป็นตัวต้านทานความร้อนมากขึ้น แนวโน้มการก่อตัวของน้ำแข็งจะใกล้เคียงกับการทดลองที่ไม่ติดครีบ การเพิ่มครีบเกินความจำเป็นจึงไม่ได้เป็นการเพิ่มผลผลิตตามที่ต้องการ เช่นเดียวกับที่ทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดโดยใช้การติดตั้งครีบหยักบนท่อผลิตน้ำแข็งหลอด [4] เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอดโดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอดที่มีกำลังการผลิต 50 ton/day [5] โดยทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ตั้งแต่ 0.5 ถึง 3 นิ้ว โดยกำหนดขนาดความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ที่ 34 เมตรสูบน้ำป้อนผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งในอ่างน้ำทิ้ง โดยใช้เทคนิค Computational Fluid Dynamics โปรแกรม FLUENT 6.3 ซึ่งเป็นเทคนิคการประมาณค่าในรูปแบบไฟไนต์วอลุ่ม ในการวิเคราะห์และจำลอง พบว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 2 นิ้ว เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุด โดยปริมาณการไหลของน้ำป้อนอยู่ที่ 51.4 ton/hr.สามารถลดอุณหภูมิน้ำป้อนจาก 28°C ลงเหลือ 22°C เวลาต่อหนึ่งรอบการผลิตลดลง 2.75 นาที

มีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคประสิทธิผลทางความร้อนและจำนวนหน่วยของการถ่ายเท (effectiveness-NTU) โดยใช้สองตัวชี้วัดนี้เพื่อกำหนดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอัตราส่วนการไหลระหว่างสารให้เหมาะสมในการนำพลังงานเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ [6–8] กำหนดขนาดแหล่งแลกเปลี่ยนพลังงานและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับการทำงานภายใต้เวลาที่กำหนด[9],[10] รวมถึงใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายพฤติกรรมทางความร้อน

ข้อสังเกตที่ได้จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า ทั้งการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและการลดอุณหภูมิน้ำป้อน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of

Performance, COP) ของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดที่ปกติมีค่าอยู่ที่ 1.3–1.8 มีค่าสูงขึ้น แต่ยังมีข้อจำกัดในส่วนของ การคัดแปลงหรือเพิ่มอุปกรณ์เพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด ทำให้ยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องผลิตน้ำแข็งขนาดอื่นๆ และแหล่งแลกเปลี่ยนพลังงานที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำป้อนมีปริมาณที่จำกัด

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสร้างระบบประหยัคพลังงานที่จะลดอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดกับน้ำเย็นจากเครื่องผลิตน้ำเย็น ที่มี COP อยู่ที่ 3.5 และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหลักการ effectiveness-NTU ในการกำหนดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการทำงานของระบบเพื่อให้ได้กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดที่มี COP สูงขึ้นจากการใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่ามาส่งเสริมกระบวนการผลิต และได้ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนภายนอกเครื่องผลิตน้ำแข็ง ที่มีขนาดที่เหมาะสมบำรุงรักษาได้ง่าย มีเสถียรภาพสูง สามารถนำไปใช้เป็นระบบต้นแบบเชิงพาณิชย์และนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดได้ทุกขนาด

2. เงื่อนไขการทดลอง

การศึกษาเริ่มจาก การศึกษาระบบเดิม เพื่อให้ได้รายละเอียดของระบบการทำงานและสามารถทำงานร่วมกับระบบที่จะทำในงานวิจัยได้ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแผนผังการไหลและเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลองโดยการทดสอบเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ พร้อมกับทดลองจริง ณ สถานที่ปฏิบัติการ ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงงานน้ำแข็งสมชัย จังหวัดขอนแก่น

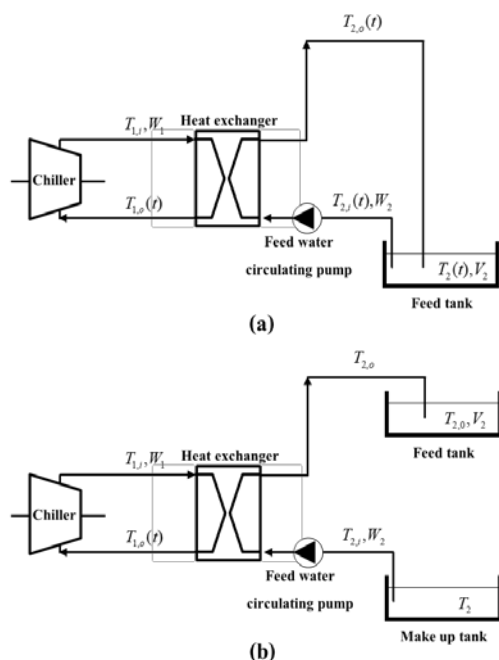
2.1 ออกแบบระบบการไหลของน้ำป้อนก่อนจ่ายเข้าเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดเดิม

ข้อมูลของระบบเดิมจะเป็นตัวกำหนดการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยประกอบไปด้วย กำลังการผลิตของเครื่อง, เวลาในการผลิตแต่ละรอบการผลิต, ปริมาณน้ำป้อนและอุณหภูมิของน้ำป้อนข้อมูลดังกล่าวมีรายละเอียดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลของเครื่องผลิต ณ สถานที่ปฏิบัติการ

กำลังการผลิต (ton/day)	ระยะเวลารอบ การผลิต(min)	ปริมาณน้ำ ป้อน (l)	อุณหภูมิของ น้ำป้อน ($^{\circ}\text{C}$)
30	38	810	29.8
50	41	1,380	28.7
60	45	1,690	28.9

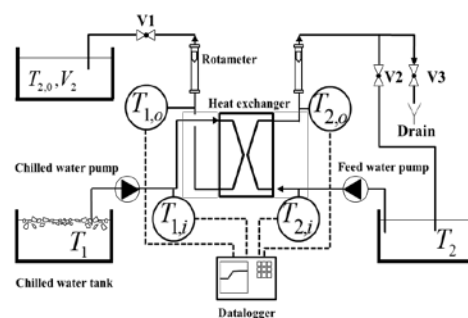
เมื่อพิจารณาจากข้อมูลระบบเดิม รูปแบบที่เป็นไปได้ของระบบที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของน้ำป้อนก่อนจ่ายเข้าเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด สามารถจำแนกได้เป็น รูปแบบน้ำป้อนไหลวน และรูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน ดังรูปที่ 1 โดยระบบประกอบไปด้วย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น, ถังน้ำเดิม, บั๊มน้ำเย็น และบั๊มน้ำป้อน โดยระบบน้ำป้อนไหลวน น้ำป้อนหลังแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเย็นแล้ว จะไหลเวียนกลับยังถังน้ำเดิมเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนใหม่ อุณหภูมิน้ำป้อนในรูปแบบนี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาการเดินระบบ ส่วนรูปแบบน้ำป้อนไหลผ่านจะมีถังพักน้ำป้อน เพื่อรองรับน้ำป้อนหลังแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเย็น อุณหภูมิน้ำป้อนจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการเดินระบบ



รูปที่ 1 ระบบลดอุณหภูมิของก่อนจ่ายเข้าเครื่องผลิต (a) รูปแบบน้ำป้อนไหลวน (b) รูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน

2.2 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ

ผังการการไหลของเครื่องมือทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 2 อุปกรณ์ในการทดสอบถูกประกอบให้สามารถทดสอบได้ทั้งรูปแบบน้ำป้อนไหลวน และ รูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน ถังน้ำเย็นใช้จำลองการทำงานของเครื่องผลิตน้ำเย็นโดยการผสมน้ำกับน้ำแข็งโดยตรงในถังเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ ถังน้ำป้อนเดิมไว้ด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง น้ำเย็นจะถูกส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นด้วยบั๊มน้ำเย็น ปรับเปลี่ยนรูปแบบการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำป้อนเป็นแบบน้ำป้อนไหลวนโดยเปิดวาล์ว V_2 ในขณะที่วาล์ว V_3 ปิดอยู่ แบบน้ำป้อนไหลผ่านโดย ปิดวาล์ว V_2 ในขณะที่วาล์ว V_3 เปิดอยู่ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเย็นและน้ำป้อนอ่านค่าจาก Rotameter ที่ติดตั้งอยู่ที่ท่อส่งน้ำขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และสามารถปรับอัตราการไหลนี้ได้ด้วยการปรับวาล์ว V_1 สำหรับน้ำเย็น V_2 หรือ V_3 สำหรับน้ำป้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้เป็นรุ่น Kaori Model K250-100 หัววัดอุณหภูมิ OMEGA Thermocouple Type K มีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ช่วง $0-333^{\circ}\text{C}$ ที่ $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ ติดตั้งไว้ที่ท่อส่งน้ำขาเข้าและขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 4 จุด เชื่อมต่อกับ Datalogger HIOKI LR8400 เพื่อวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 2 ผังการการไหลของเครื่องมือทดสอบ

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กำหนดให้ด้านน้ำเย็นที่ออกจากเครื่องผลิตน้ำเย็น W_1, W_2 คืออัตราการจลความร้อนซึ่งเท่ากับผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}$) กับความร้อนจำเพาะของน้ำ (c_p) ของน้ำเย็นและน้ำป้อนตามลำดับ ไม่มีการเปลี่ยนสถานะของสารในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ

3.1 รูปแบบน้ำป้อนไหลวน

พิจารณาค่าอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนที่ฝั่งน้ำเย็น
หาได้จากสมการที่ (1)

$$q(t) = W_1[T_{1,o}(t) - T_{1,i}] \quad (1)$$

พิจารณาค่าอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนที่ฝั่งน้ำป้อน
หาได้จากสมการที่ (2)

$$q(t) = W_2[T_{2,i}(t) - T_{2,o}(t)] \quad (2)$$

พิจารณาค่าอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำ
เย็นและน้ำป้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หาได้จาก
สมการที่ (3)

$$q(t) = UA \frac{[T_{2,i}(t) - T_{1,o}(t)] - [T_{2,o}(t) - T_{1,i}]}{\ln \frac{[T_{2,i}(t) - T_{1,o}(t)]}{[T_{2,o}(t) - T_{1,i}]}} \quad (3)$$

ปริมาณความร้อนในถึงน้ำป้อนเปลี่ยนแปลงตาม
อุณหภูมิที่ววนแลกเปลี่ยนความร้อน หาได้จาก
สมการที่ (4)

$$q(t) = \rho_2 V_2 c_{p,2} \frac{\partial T_2(t)}{\partial t} \quad (4)$$

เนื่องจากอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเย็นและ
น้ำป้อนเกิดความสมดุล อุณหภูมิที่ออกจากเครื่อง
แลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นไปดังสมการที่ (5)

$$T_{1,o}(t) = \frac{W_2}{W_1} [T_{2,i}(t) - T_{2,o}(t)] + T_{1,i} \quad (5)$$

เนื่องจากอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำป้อนบริเวณ
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดความสมดุล สามารถแทน
สมการที่ (5) ลงใน สมการที่ (3) จะได้เป็นสมการที่ (6)

$$W_2 [T_{2,i}(t) - T_{2,o}(t)] = \frac{UA [T_{2,i}(t) - T_{2,o}(t)] (1 - \frac{W_2}{W_1})}{\ln \frac{[T_{2,i}(t) - T_{1,i}(t)] - \frac{W_2}{W_1} [T_{2,i}(t) - T_{2,o}(t)]}{[T_{2,o}(t) - T_{1,i}(t)]}} \quad (6)$$

จัดรูปแบบสมการที่ (6) ใหม่ ดังสมการที่ (7)

$$\ln \frac{[T_{2,i}(t) - T_{1,i}(t)] - \frac{W_2}{W_1} [T_{2,i}(t) - T_{2,o}(t)]}{[T_{2,o}(t) - T_{1,i}]} = UA \left(\frac{1}{W_2} - \frac{1}{W_1} \right) \quad (7)$$

กำหนดให้เทอม $UA \left(\frac{1}{W_2} - \frac{1}{W_1} \right)$ เป็นไปดังสมการที่ (8)

$$D = UA \left(\frac{1}{W_2} - \frac{1}{W_1} \right) \quad (8)$$

แทนสมการที่ (8) ลงใน สมการที่ (7) และจัดรูปแบบ
สมการใหม่ จะได้สมการที่ (9)

$$T_{2,o}(t) = \frac{[T_{2,i}(t) (1 - \frac{W_2}{W_1}) + T_{1,i} (e^D - 1)]}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \quad (9)$$

แทนสมการที่ (9) ลงใน สมการที่ (5) $T_{1,o}(t)$ สามารถ
หาได้จากสมการที่ (10)

$$T_{1,o}(t) = T_{1,i} + \frac{W_2}{W_1} [T_{2,i}(t) - T_{1,i}] \left[\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \right] \quad (10)$$

เช่นเดียวกับ $T_{2,o}(t)$ สามารถหาได้จากสมการที่ (11)

$$T_{2,o}(t) = T_{2,i}(t) - [T_{2,i}(t) - T_{1,i}] \left[\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \right] \quad (11)$$

แทนสมการที่ (11) ลงใน สมการที่ (2) $q(t)$ สามารถ
หาได้จากสมการที่ (12)

$$q(t) = W_2 [T_{2,i}(t) - T_{1,i}] \left[\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \right] \quad (12)$$

แทนสมการที่ (4) ลงใน สมการที่ (12) อัตราการ
เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ววนในถึงน้ำป้อน
($\partial T_2(t)/\partial t$) สามารถหาได้จากสมการที่ (13)

$$\frac{\partial T_2(t)}{\partial t} = \frac{W_2}{\rho_2 V_2 c_{p,2}} [T_{2,i}(t) - T_{1,i}] \left[\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \right] \quad (13)$$

3.2 รูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน

การไหลในรูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน อัตราการถ่ายเท
ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่ขึ้นกับเวลา
เพราะไม่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาแลกเปลี่ยนความร้อน

ดังนั้น $T_{1,o}$, $T_{2,o}$ และ q สามารถหาได้จากสมการที่ (14)–(16) ตามลำดับ

$$T_{1,o} = T_{1,i} + \frac{W_2}{W_1} [T_{2,i} - T_{1,i}] \left[\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \right] \quad (14)$$

$$T_{2,o} = T_{2,i} - [T_{2,i} - T_{1,i}] \left[\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \right] \quad (15)$$

$$q = W_2 [T_{2,i} - T_{1,i}] \left[\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} \right] \quad (16)$$

3.3 ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและจำนวนหน่วยของ

การถ่ายเท (Effectiveness and Number of Transfer Unit)

ให้ W_{min} และ W_{max} แทน อัตราความจุความร้อน (Heat capacity rate of fluid) ที่มีค่าน้อยกว่าหรือสูงกว่าระหว่างของไหลทั้งสองด้าน จำนวนหน่วยของการถ่ายเท (NTU) และอัตราส่วนความจุความร้อน (w) กำหนดได้จากสมการที่ (17) และสมการที่ (18) ตามลำดับ

$$NTU = \frac{UA}{W_{min}} \quad (17)$$

$$w = \frac{W_{min}}{W_{max}} \quad (18)$$

สามารถแทนสมการที่ (17) และ สมการที่ (18) ลงในสมการที่ (7) รูปแบบของสมการจะเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนความจุความร้อนดังสมการที่ (19) และ สมการที่ (20)

$$D = NTU(1 - w) \quad ; W_1 > W_2 \quad (19)$$

$$D = NTU(w - 1) \quad ; W_1 < W_2 \quad (20)$$

ในกรณีที่ $W_1 = W_2 = W$ เทอม $(e^D - 1)/(e^D - W_2/W_1)$ สามารถเขียนได้ในรูปแบบสมการที่ (21)

$$\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} = \frac{1}{\frac{W}{UA} + 1} \quad (21)$$

เมื่อ $NTU = UA/W$ สมการที่ (21) สามารถเขียนได้ในรูปแบบสมการที่ (22)

$$\frac{e^D - 1}{e^D - \frac{W_2}{W_1}} = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (22)$$

การนำกลับคืนพลังงานสุทธิในช่วงเวลา t (Q) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (23)

$$Q = \int_0^t q(t) dt \quad (23)$$

พลังงานกลับคืนสูงสุดที่เป็นไปได้ (Q_{max}) ในรูปแบบน้ำป้อนไหลวนจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำป้อนในถังพักเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเย็น ดังนั้น Q_{max} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (24)

$$Q_{max} = \rho_2 V_2 c_{p,2} (T_2 - T_{1,i}) \quad (24)$$

ในกรณีของรูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน พลังงานกลับคืนสูงสุดที่เป็นไปได้ [11] คำนวณได้จากสมการที่ (25)

$$Q_{max} = W_{min} (T_{2,i} - T_{1,i}) \quad (25)$$

โดย W_{min} คือ W ที่มีค่าต่ำกว่าระหว่างของไหลทั้งสองสาย ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (ε) ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับคืนพลังงานของระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (26)

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (26)$$

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวมาจะคำนวณทุก ๆ 1 วินาที ที่อัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนต่อน้ำเย็นต่างๆ (w) ดังตารางที่ 2 โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเดียวกัน NTU ที่นำมาคำนวณจะมีค่าเปลี่ยนไปตาม W_r

ตารางที่ 2 อัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนต่อน้ำเย็น

น้ำป้อน:น้ำเย็น (w)								
1:5	1:4	1:3	1:2	1:1	2:1	3:1	4:1	5:1

3.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient)

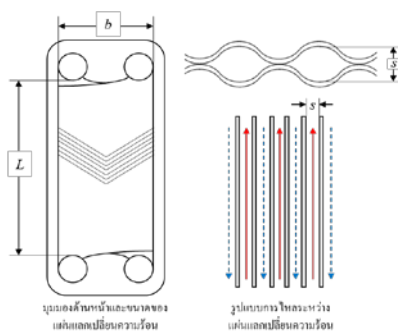
จำนวนพื้นที่การไหลในช่องระหว่างแผ่น (sb) ทั้งสองสายจะเท่ากันสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีจำนวนแผ่นเป็นเลขคี่ (N_{plate}) ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านช่องเฉลี่ย (v) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (27)

$$v = \frac{\frac{\dot{m}}{\rho_{sb}}}{\frac{(N_{plate}+1)}{2}} \quad (27)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (28)

$$D_h = \frac{4sb}{2(s+b)} \quad (28)$$

โดยช่องระหว่างแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (s) กับความกว้างของแผ่น (b) แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของแผ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ของการไหล หาได้จากสมการที่ (29)

$$Re_d = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (29)$$

หาก Re_d มีค่ามากกว่า 100 ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น การไหลจะอยู่ในสถานะปั่นป่วน ตัวเลขนัสเซล (Nu_d) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (30)

$$Nu_d = \frac{h D_h}{k} = 0.374 Re_d^{0.668} Pr^{1/3} \quad (30)$$

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รายละเอียด	น้ำป้อนไหลวน			น้ำป้อนไหลผ่าน			หน่วย
อัตราส่วนการไหล, w_r	0.67	1	1.5	0.67	1	1.5	-
จำนวนหน่วยการถ่ายเท	4.09	3.06	3.43	3.49	3.11	4.16	-
อัตราการไหลน้ำป้อน	40.44	60.65	90.98	60.01	60.14	60.01	lpm
อัตราการไหลน้ำเย็น	60.1	60.1	60.1	88.18	60.01	39.57	lpm
อุณหภูมิน้ำป้อนเริ่มต้น	25.41	25.41	27.1	27.4	22.36	25.14	°C

โดย h และ k คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลตามลำดับ, Pr ตัวเลขพรันด์เทิล

3.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP)

สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของระบบการอัดไอสารทำความเย็นสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่าง พลังงานที่ถูกดูดซับที่อีวาโปเรเตอร์ (E_{evap}) กับพลังงานที่จ่ายให้คอมเพรสเซอร์ (P_{comp}) ระหว่างรอบการผลิต ตามสมการที่ (31)

$$COP = \frac{E_{evap}}{P_{comp}} \quad (31)$$

โดย E_{evap} คำนวณจากผลรวมของปริมาณความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงที่ถ่ายเทออกจากน้ำป้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง และปริมาณความร้อนสัมผัสในน้ำระบายที่ถูกระบายออกหลังจากจบรอบการผลิต P_{comp} คำนวณจากการตรวจวัดพลังงานที่จ่ายให้เครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด (P) ระหว่างระยะเวลาการผลิต (t_p) ตามสมการที่ (32)

$$P_{comp} = \int_0^{t_p} P(t) dt \quad (32)$$

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ทำการทดสอบแบบจำลองการไหลและเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอุณหภูมิ น้ำป้อนและน้ำเย็น เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยปรับอัตราส่วนการไหลระหว่างน้ำป้อนต่อน้ำเย็นที่ 0.67, 1, 1.5 รายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(ต่อ)

รายละเอียด	น้ำป้อนไหลวน			น้ำป้อนไหลผ่าน			หน่วย
อุณหภูมิน้ำเย็นเริ่มต้น	1.4	1.5	1.8	1.26	2.44	1.51	°C
Renold number น้ำเย็น	132.3	132	132	198	134.6	88.4	-
Renold number น้ำป้อน	98.5	147	220	145	146.3	141	-
Nusselt number น้ำเย็น	20.5	20.5	20.5	26.8	20.6	15.6	-
Nusselt number น้ำป้อน	16.3	21.4	28	21	20.6	20.8	-
ปริมาณน้ำป้อน	600	600	600	600	600	600	liter
เวลาในการทดสอบ	300	300	300	216	216	216	sec

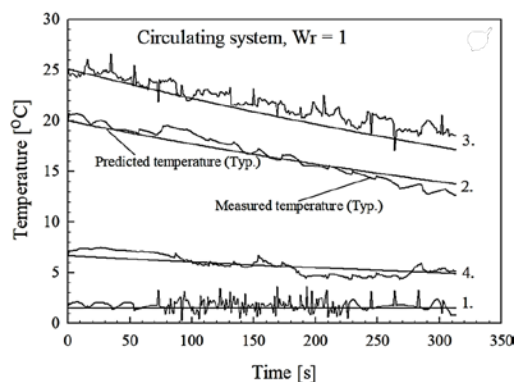
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะนำมาใช้ในการหาอัตราส่วนการไหลที่เหมาะสมกับการทำงานร่วมกับเครื่องทำน้ำเย็น เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน(ϵ) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากรูปแบบการไหลทั้งสองรูปแบบ และเลือกรูปแบบการไหลของน้ำป้อนที่เหมาะสมกับการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องทำน้ำเย็นและรอบการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยทดลองที่เครื่องผลิตน้ำแข็งขนาด 50 ton/day และมีปริมาณน้ำป้อนเข้าเครื่อง 1,380 liter/batch เครื่องผลิตน้ำแข็งทำงานร่วมกับเครื่องผลิตน้ำเย็นที่มีขนาดเท่ากับ 45 RT (Refrigerant Ton) โดยกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำผ่านเครื่องผลิตน้ำเย็นเป็น 2.4 gpm/RT และอุณหภูมิน้ำที่ออกเครื่องผลิตน้ำเย็นเป็น 7.2°C อุณหภูมิน้ำกลับเข้าเครื่องทำน้ำเย็น 12.78°C แลกเปลี่ยนความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทดสอบที่อุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าเครื่องผลิตน้ำแข็ง 24°C และ 12°C

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

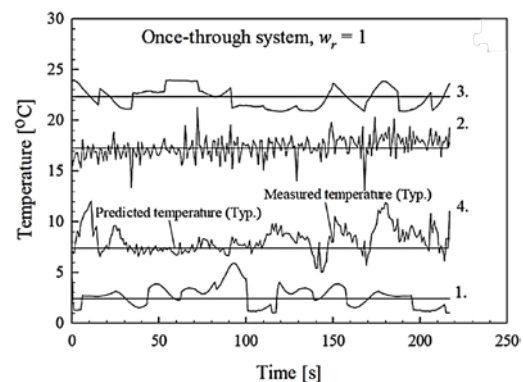
5.1 การสอบทวนผลที่ได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับออกแบบระบบการให้ความเย็นล่วงหน้า

จากการสอบทวนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลดังรูปที่4(a) สำหรับระบบน้ำป้อนไหลวน และรูปที่4(b) สำหรับระบบน้ำป้อนไหลผ่าน เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วมีค่าใกล้เคียงกัน โดยรากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของการวัดอุณหภูมิระบบน้ำป้อนไหลวนกับระบบน้ำป้อนไหลผ่าน ทั้ง 4 จุดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.57°C และ 0.9°C ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งและยังอยู่ในขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายผลสมรรถนะทางความร้อนได้ดี



(a)

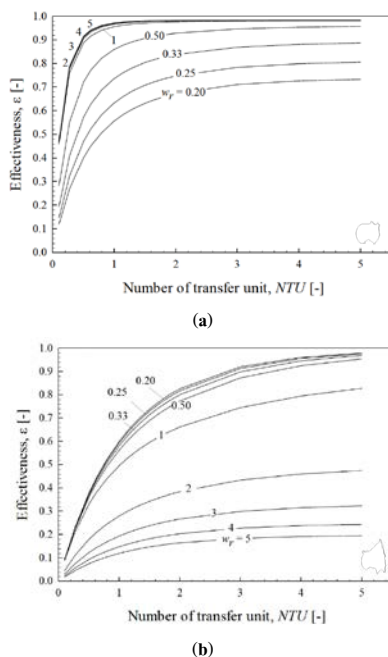


(b)

1. อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. อุณหภูมิน้ำเย็นขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
3. อุณหภูมิน้ำป้อนขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
4. อุณหภูมิน้ำป้อนขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (a) ระบบน้ำป้อนไหลวน (b) ระบบน้ำป้อนไหลผ่าน

การทดสอบรูปแบบน้ำป้อนไหลวน เมื่อความเร็วของน้ำป้อนที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนต่อน้ำเย็น (w_r) เพิ่มขึ้น ตัวเลขเรย์โนลด์ส (Re_c) ของน้ำป้อนจะเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวเลขนัสเซิล (Nu_c) ซึ่งพัฒนาสสัมพันธ์กับ Re_c กับตัวเลขพริ้นคเทิล (Pr) เพิ่มขึ้นตาม น้ำป้อนจึงสามารถถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำเย็นได้มากขึ้นและจำนวนหน่วยของการถ่ายเท (NTU) เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นแล้ว ค่าประสิทธิผลการถ่ายเทความร้อน (ε) เพิ่มขึ้นแปรผกผันกับ w_r และ NTU ตามรูปที่ 5(a) แต่ในส่วนของการไหลในรูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน มีข้อจำกัดภายใต้เงื่อนไขที่ต้องเตรียมน้ำป้อนในเวลาที่กำหนด การปรับอัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนต่อน้ำเย็น จะปรับในสิ่งน้ำเย็นส่งผลทำให้อัตราความจุความร้อนของน้ำเย็นลดลง น้ำป้อนไม่สามารถดึงพลังงานกลับคืนสูงสุดได้เต็มที่ตามรอบการผลิต ε จึงแปรผกผันกับ w_r และแปรผันตรงกับ NTU ตามรูปที่ 5(b)



รูปที่ 5 อิทธิพลของอัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนต่อน้ำเย็นที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลการถ่ายเทความร้อน (a) ระบบน้ำป้อนไหลวน (b) ระบบน้ำป้อนไหลผ่าน

เมื่อเปรียบเทียบ ε ของทั้งสองระบบที่ $NTU = 1$ ในทุกๆ อัตราส่วนการไหล จะเห็นได้ชัดว่าการไหลรูปแบบน้ำป้อนไหลวนมีค่า ε สูงกว่ารูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน ดังนั้นจึงเลือก

รูปแบบน้ำป้อนไหลวนระบบเดียวเพื่อที่จะนำไปออกแบบการทำงานของระบบการทำความเย็นล่วงหน้า

เครื่องทำน้ำเย็นถูกออกแบบเพื่อส่งออกน้ำที่อุณหภูมิ 7.22°C และรับน้ำกลับเข้าเครื่องที่อุณหภูมิ 12.78°C เพื่อไม่ให้เครื่องทำน้ำเย็นทำงานเกินค่าออกแบบ การกำหนด w_r และ NTU ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิน้ำกลับเข้าเครื่องทำน้ำเย็นด้วย จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปแบบน้ำป้อนไหลวน w_r และ NTU ที่ไม่ทำให้อุณหภูมิน้ำกลับเข้าเครื่องทำน้ำเย็นเกิน 12.78°C เป็นไปตามตารางที่ 4

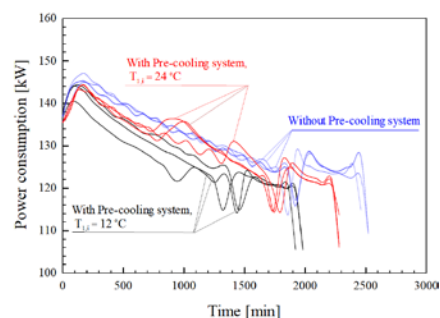
ตารางที่ 4 w_r และ NTU จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ไม่ทำให้อุณหภูมิน้ำกลับเข้าเครื่องทำน้ำเย็นเกิน 12.78°C

NTU	1	2	3	4	5
w_r	0.50	0.33	0.31	0.29	0.28

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4 และรูปที่ 5(a) แล้ว w_r และ NTU ที่เหมาะสมกับการออกแบบระบบที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 และ 1 ตามลำดับ โดยที่ $NTU = 1$ จะมีขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่ใหญ่เกินไป และการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวนี้จะมียุทธ ε อยู่ที่ 0.86

5.2 ผลทดสอบระบบการให้ความเย็นล่วงหน้า

ระบบให้ความเย็นล่วงหน้าที่พัฒนาขึ้นได้ทดสอบร่วมกับระบบผลิตน้ำแข็งหลอดโดยทดสอบที่อุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าเครื่องผลิตน้ำแข็ง $28^\circ\text{C}, 24^\circ\text{C}, 12^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยเก็บข้อมูลซ้ำ 3 รอบการผลิต ผลการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในแต่ละรอบการผลิตได้ผลดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในแต่ละรอบการผลิตสำหรับระบบการผลิตก่อนและหลังติดตั้งระบบการให้ความเย็นล่วงหน้า

พิจารณาที่ระบบการผลิตก่อนติดตั้งระบบการให้ความเย็นล่วงหน้าพบว่าพลังงานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยในแต่ละรอบการผลิต น้ำป้อนจะถูกสูบน้ำเข้าเครื่องผลิตน้ำแข็งและสับวนแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็น ระบบผลิตควบคุมแรงดันของสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องควบแน่นให้คงที่โดยการอัดไอสารทำความเย็น เมื่อถึงนาที่ที่ 4 การใช้พลังงานไฟฟ้าจะค่อยๆลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำป้อนในเครื่องผลิตที่สับวนแลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มก่อตัวเพิ่มความหนาในหลอดผลิตน้ำแข็ง สารทำความเย็นแลกเปลี่ยนความ

ร้อนได้ลดลง การพลังงานไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จึงลดลง น้ำแข็งจะแข็งตัวได้ตามขนาดที่ 30.5 นาที่ และเริ่มกระบวนการละลายน้ำแข็งโดยวิธีการจ่ายแก๊สร้อนเข้าสู่ฮีวโปรเตอร์ เพื่อให้ น้ำแข็งละลายออกจากหลอดผลิตน้ำแข็ง โดยใช้เวลา 11 นาที่ และสิ้นสุดรอบการผลิตที่ 41.5 นาที่

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาที่ระบบการผลิตหลังติดตั้งระบบการให้ความเย็นล่วงหน้า จะเห็นว่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมและระยะเวลาของรอบการผลิตมีค่าลดลง รายละเอียดผลทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดระบบการผลิตก่อนและหลังติดตั้งระบบการให้ความเย็นล่วงหน้า

รายละเอียด	ระบบเดิม	ระบบให้ความเย็นล่วงหน้า	หน่วย	รายละเอียด
อุณหภูมิน้ำป้อน				
ก่อนเข้าเครื่อง	28	24	12	°C
ผลิตน้ำแข็งหลอด				
เวลาในการผลิตรวม	41.5	37.7	32.4	min
- เวลาในการทำน้ำแข็ง	30.5	27.4	22.1	min
- เวลาในการละลายน้ำแข็ง	11.0	10.3	10.3	min
พลังงานไฟฟ้ารวม	91.32	86.01	83.85	kW·h
- พลังงานไฟฟ้าในการทำน้ำแข็ง	70.68	63.80	51.03	kW·h
- พลังงานไฟฟ้าในการละลายน้ำแข็ง	20.64	18.67	18.67	kW·h
- พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องทำน้ำเย็น	-	3.54	14.15	kW·h
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ				
การทำความเย็นเครื่อง	1.89	2.1	2.48	-
ผลิตน้ำแข็งหลอด, COP				
ผลผลิตเพิ่มขึ้น	-	9.16	21.93	%
การใช้พลังงานลดลง	-	5.82	8.18	%
COP เพิ่มขึ้น	-	9.68	23.70	%

ภาระการทำความเย็นในเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดเกิดขึ้น 2 ส่วนคือการลดอุณหภูมิ น้ำป้อนและการเปลี่ยนสถานะ จากการทดสอบพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ลดลง คือส่วนของพลังงานไฟฟ้าในการทำน้ำแข็ง เป็นผลมาจากการลดอุณหภูมิ น้ำป้อน ซึ่งเป็นการลดภาระการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด พิจารณาที่อุณหภูมิ น้ำป้อน 12°C เครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดมีผลผลิตเพิ่มขึ้น 21.93% เวลาที่ใช้ต่อรอบการผลิต 9.1

นาที่ การใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำน้ำแข็งหลอดลดลง 21.62 kW·h โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นเท่ากับ 14.15 kW·h เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำแข็งหลอดก่อนติดตั้งระบบให้ความเย็นล่วงหน้าแล้ว การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 7.47 kW·h, COP ของระบบผลิตเพิ่มขึ้นจาก 1.89 เป็น 2.48 ตลอดจนการทดสอบทำการควบคุมการผลิตโดยมีการระบายน้ำออกจากเครื่องผลิตตามการออกแบบ น้ำแข็งมี

ลักษณะใส ไม่มีสิ่งเจือปน ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน
ล่วงหน้าไม่ผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิต

สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. สรุปผล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางความร้อนได้ถูกพัฒนาขึ้น และใช้ในการเลือกรูปแบบการไหลและขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับเครื่องทำน้ำเย็นที่มีขนาด 45 RT และเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดขนาด 50 ton/day โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน(ϵ)เลือกรูปแบบการไหลน้ำป้อนไหลวนใช้ร่วมกับระบบผลิตน้ำแข็งหลอดจากการพิจารณาที่จำนวนหน่วยของการถ่ายเท (NTU) = 1 ในทุก ๆ อัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อน้ำเย็น (w) รูปแบบน้ำป้อนไหลวนมีค่า ϵ สูงกว่ารูปแบบน้ำป้อนไหลผ่าน เลือกรูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $NTU = 1$ และ $w_r = 0.5$ เพื่อใช้ร่วมกับเครื่องผลิตน้ำเย็น พิจารณาจาก NTU ที่ไม่ทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใหญ่เกินไป ข้อกำหนดของเครื่องทำน้ำเย็นที่อุณหภูมิน้ำกลับเข้าเครื่องต้องไม่เกิน 12.78°C และ $\epsilon = 0.86$ ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการนำกลับคืนพลังงานของระบบสูงที่สุดจากตัวเลือกทั้งหมดจากการทดสอบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนล่วงหน้าพบว่าที่อุณหภูมิน้ำป้อน 12°C สามารถเพิ่มผลผลิตขึ้นได้ 21.93% จากการที่ลดระยะเวลาของรอบการผลิตลงได้, ลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้ 8.18% และ COP ของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดเพิ่มขึ้น 23.70% จากระบบการผลิตเดิม การใช้เครื่องผลิตน้ำเย็นที่มี COP สูงกว่าเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดในการลดอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าเครื่องผลิตสามารถส่งเสริมระบบการผลิตโดยรวมได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตที่ต้องการใช้แหล่งแลกเปลี่ยนพลังงานภายนอกในการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิล่วงหน้าก่อนการผลิตได้ดี

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ หรือการศึกษาอิสระ

คำสัญลักษณ์

A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [m^2]
COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ [-]
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ [m]
E_{evap}	พลังงานที่ถูกดูดซับที่อีวาโปเรเตอร์ [J]
N_{plate}	จำนวนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีของไหลสัมผัสสองด้าน [-]
NTU	จำนวนหน่วยของการถ่ายเท [-]
P	พลังงานที่จ่ายให้เครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด [J]
P_{comp}	พลังงานที่จ่ายให้คอมเพรสเซอร์ [J]
Q	พลังงานกลับคืนสุทธิ [J]
Q_{max}	พลังงานกลับคืนสูงสุดที่เป็นไปได้ [J]
$T_{1,i}$	อุณหภูมิน้ำเย็นเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [$^\circ\text{C}$]
$T_{2,i}$	อุณหภูมิน้ำป้อนออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [$^\circ\text{C}$]
$T_{1,o}$	อุณหภูมิน้ำเย็นออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [$^\circ\text{C}$]
$T_{2,o}$	อุณหภูมิน้ำป้อนออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [$^\circ\text{C}$]
$T_{2,i}(t)$	อุณหภูมิน้ำป้อนออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา [$^\circ\text{C}$]
$T_{1,o}(t)$	อุณหภูมิน้ำเย็นออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา [$^\circ\text{C}$]
$T_{2,o}(t)$	อุณหภูมิน้ำป้อนออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา [$^\circ\text{C}$]
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ\text{C}}$]
V_2	ปริมาณน้ำป้อนที่ต้องเตรียม [m^3]
W_{min}	อัตราความจุความร้อนที่มีค่าต่ำกว่าระหว่างของไหลทั้งสองสาย [$\frac{W}{^\circ\text{C}}$]
W_{max}	อัตราความจุความร้อนที่มีค่าสูงกว่าระหว่างของไหลทั้งสองสาย [$\frac{W}{^\circ\text{C}}$]
W_1, W_2	คืออัตราความจุความร้อน ของน้ำเย็นและน้ำป้อนตามลำดับ [$\frac{W}{^\circ\text{C}}$]

b	ความกว้างของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน [m]
c_p	ความร้อนจำเพาะของน้ำ $\left[\frac{J}{kg}\right]$
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวลของแต่ละสาย $\left[\frac{kg}{s}\right]$
q	อัตราแลกเปลี่ยนความร้อน [W]
$q(t)$	อัตราแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา [W]
s	ช่องระหว่างแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน [m]
t_b	ระยะเวลารอบการผลิต [min]
v	ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านช่องเล็ก $\left[\frac{m}{s}\right]$
w	อัตราส่วนความจุความร้อน [-]
w_r	อัตราส่วนการไหลของน้ำป้อนต่อน้ำเย็น [-]
Nu_d	ตัวเลขนัสเซิล [-]
Pr	ตัวเลขพรันด์เทิล [-]
Re_d	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ [-]
ε	ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [-]
μ	ค่าความหนืดของของไหล [Pas]
ρ	ค่าความหนาแน่นของของไหล $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Thongdee and A. Chinsuwan, "An optimization of the components and operating conditions of a pre-cooling system for tubular ice making machines," *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 602–610, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.225.
- [2] S. Nakomsri, R. Suntivalakorn and K. Thanutwutthigorn, "Performance improvement of tubular-ice making machine by reducing the feed water temperature with shell and tube heat exchanger," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 564, pp. 298–303, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.564.298.
- [3] C. Tangthieng "A Numerical Study for Improvement of a Tubular-Ice Making Process by Employing the External Fins on an Ice-Making Tube," presented at the 21th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Chonburi, Thailand, Oct. 17–19, 2007, pp. 259–266.
- [4] N. Pannucharoenwong, S. Saeng-Uthai, P. Promteerawong, C. Benjapiyaporn, S. Theerakulphisut and J. Benjapiyaporn, "Experiment to enhance the efficiency of tubular ice production machine using the installation of wavy fin on ice making tube," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 5, pp. 6296–6305, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.130.
- [5] N. Kayansayan and M. Ali Acar, "Ice formation around a finned-tube heat exchanger for cold thermal energy storage," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, no. 4, pp. 405–418, 2006, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.05.009.
- [6] C. Kandilli and A. Koclu, "Assessment of the optimum operation conditions of a plate heat exchanger for waste heat recovery in textile industry," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4424–4431, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.110.
- [7] D. Lee and C. Kang, "A study on development of the thermal storage type plate heat exchanger including PCM layer," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, pp. 6085–6093, 2019, doi: 10.1007/s12206-019-1152-x.
- [8] R. M. Saeed, J. P. Schlegel, R. Sawafta and V. Kalra, "Plate type heat exchanger for thermal energy storage and load shifting using phase change material," *Energy Conversion and Management*, vol. 181, pp. 120–132, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.013.
- [9] H. Ma, L. Yin, X. Shen, W. Lu, Y. Sun, Y. Zhang and N. Deng, "Experimental study on heat pipe assisted heat exchanger used for industrial waste heat recovery," *Applied Energy*, vol. 169, pp. 177–186, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.012.

-
- [10] N. H. S. Tay, M. Belusko, and F. Bruno, "An effectiveness-NTU technique for characterising tube-in-tank phase change thermal energy storage systems," *Applied Energy*, vol. 91, no. 1, pp. 309–319, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.09.039.
- [11] W. S. Janna and R. P. Chhabra, "Plate and Frame and Cross Flow Heat Exchangers," in *Design of Fluid Thermal Systems*, 4th ed., Stamford, CT: Cengage Learning, 2015, ch. 10, sec. 3, pp.529–532.

การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

Optimum Design of Reinforced Concrete Stairs Using Hill Climbing Algorithm

กิตติศักดิ์ บรรณสาร และ อลงกรณ์ ละม่อม*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ขามเรียง กันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

Kittisak Bannasarn and Alongkorn Lamom*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,

Khamreiyng, Kantarawichai, Mahasarakham, 44150, Thailand

*Corresponding Author E-mail: alongkorn_lamom@hotmail.com

Received: Sep 8, 2022; Revised: Nov 4, 2022; Accepted: Jan 10, 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เสนอการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมโดยใช้วิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท. 011007-19) การออกแบบจะคำนวณหาขนาดลูกตั้ง ลูกนอน ความหนาพื้นบันได ปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสม คำนวณราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กจากราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน การทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมกับวิธีการคำนวณแบบทั่วไป ผลการศึกษาพบว่าวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมสามารถใช้สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมได้ดีกว่าวิธีการคำนวณแบบทั่วไป ซึ่งผลการออกแบบของวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึม ได้ขนาดความหนาพื้นบันไดที่น้อยกว่า ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีราคารวมที่ต่ำกว่า คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.81 นอกจากนี้แล้ววิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมยังสามารถใช้ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างรวดเร็ว มีหน้าตัดที่เหมาะสม และเสริมเหล็กได้อัตโนมัติ โดยไม่ต้องการประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้ออกแบบ

คำสำคัญ: การออกแบบอย่างเหมาะสม, ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม, การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก, วิธีหน่วยแรงใช้งาน

Abstract

This research proposes the optimal design of reinforced concrete stairs using the Hill Climbing Algorithm. The stairs were designed by the working stress design method of the Engineering Institute of Thailand (EIT Standard 011007-19). The design calculated the size of the riser, the tread, the thickness of the waist slab, the optimum steel reinforcement, and the total price of reinforced concrete stairs from the construction material and labor cost. The experiment compared the Hill Climbing Algorithm and the conventional calculation method. The results showed that the use of the Hill Climbing Algorithm for the proper design of reinforced concrete stairs was better than conventional calculation methods. The Hill Climbing Algorithm resulted in a smaller thickness of waist slab with less steel reinforcement. As a result, the total price was lower than conventional calculation methods, representing an average of 4.81%. In addition, the Hill Climbing Algorithm can quickly design reinforced concrete stairs with suitable cross-sectional dimensions and reinforcing steel automatically and does not require the experience or expertise of the designer.

Keyword: Optimum Design, Hill Climbing Algorithm, Reinforced Concrete Stair, Working Stress Design

1. บทนำ

บันได (Stair) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอาคาร ถูกสร้างขึ้นเพื่อจุดประสงค์ในการเชื่อมต่อชั้นต่างๆ ของอาคาร ใช้สำหรับการสัญจรและขนส่งสิ่งของระหว่างชั้น และเป็นส่วนสำคัญที่ทุกคนต้องใช้เป็นประจำ ดังนั้นการออกแบบบันไดจึงต้องออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยผ่านเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีคำนวณมือทั่วไป เมื่อคำนวณน้อยก็จะได้การออกแบบที่เปลือง หากคำนวณมากก็ใช้เวลาและเสี่ยงกับความผิดพลาด จึงได้มีผู้นำอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Algorithm) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างอาคารที่มีค่าก่อสร้างที่ต่ำ สามารถออกแบบได้อัตโนมัติ รวดเร็วและแม่นยำ

สำหรับการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมมีงานวิจัยหลายเรื่องที่เกี่ยวข้อง อาทิ เมื่อปี ค.ศ. 2005 Govindaraj และ Ramasamy [1] ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) สำหรับการออกแบบรายละเอียดที่เหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องตามข้อกำหนดมาตรฐานของอินเดีย ต่อมา ในปี ค.ศ. 2010 Cheng [2] ได้นำเจเนติกอัลกอริทึมแบบลูกผสม (Hybrid Genetic Algorithm, GA) มาใช้ในการออกแบบสะพานโครงสร้างเหล็กแบบโค้ง ในปี ค.ศ. 2011 Patchotichai และ Lamom [3] นำอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Algorithm, BA) และฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm, HCA) มาใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และในปี ค.ศ. 2012 Tapown และคณะ [4] ใช้ HCA ซิมูเลเต็ดแอนนีลลิ่งอัลกอริทึม (Simulated Annealing Algorithm, SA) และเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 Juisuwannathat และ Smittakorn [5] ได้นำอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และในปีเดียวกัน Techaratanaprasert และ Smittakorn [6] นำวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Harmony Search Algorithm, HA) มาออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ต่อมาในปี ค.ศ. 2015

Prakobkit และ Smittakorn [7] นำอัลกอริทึมหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าตอบอย่างเหมาะสมแบบฮิวริสติก ที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากการใช้แสงในการหาคู่และหาอาหารของหิ่งห้อย ออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในปี ค.ศ. 2021 Tapown และ Cheerarot [8] นำการค้นหาแบบแมลงหวี่ (Fruit Fly Optimization, FOA) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก และในปีเดียวกัน Chomchuen และ Lamom [9] ประยุกต์ใช้ HCA สำหรับออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม ในปี ค.ศ. 2022 Azizi และคณะ [10] ได้นำวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Tribe-Harmony Search, Tribe - HS) มาออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างอาคารสูงและอาคารต่ำ

แม้จะมีอัลกอริทึมหลากหลายวิธี [1-10] ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง แต่วิธี HCA ก็เป็นอีกวิธีที่มีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน พัฒนาง่าย มีประสิทธิภาพที่ดี มีการทำงานที่รวดเร็ว เป็นอัตโนมัติและไม่จำเป็นต้องพึ่งประสบการณ์หรือความเชี่ยวชาญของผู้ออกแบบ อีกทั้งยังไม่พบงานวิจัยที่มีการนำวิธี HCA มาใช้ออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้วิธี HCA เพื่อนำมาใช้ออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยใช้มาตรฐานการออกแบบของ วสท. 011007-19 [11] วิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการยอมรับในระดับสากลและมีการใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อคำนวณหาขนาดลูกตั้ง ลูกนอน ความหนาพื้นบันได ปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสม โดยงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกแบบระหว่าง วิธี HCA กับวิธีการคำนวณแบบทั่วไป (Conventional Calculation Method, CM)

2. ทฤษฎีการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก

บันได (Stair) [12] ใช้เป็นทางขึ้นลงระหว่างชั้นต่างๆ ในอาคาร ส่วนใหญ่มักเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่อยู่ในแนวเอียงและมีคานรองรับระหว่างช่วง โดยทำผิวบนของแผ่นพื้นให้เป็นขั้นบันได ส่วนผิวล่างของแผ่นพื้นอาจเป็นแบบเรียบหรือหยักไปตามขั้นบันไดก็ได้

ปกติส่วนกว้างของชั้นบันได (ลูกนอน) ประมาณ 25–30 ซม. และส่วนยกของชั้นบันได (ลูกตั้ง) ประมาณ 15–18 ซม. โดยมีความสูงระหว่างช่วงไม่เกิน 4 ม. ทั้งนี้เพื่อให้การขึ้นลงสะดวกไม่ชันจนเกินไป

การคำนวณออกแบบบันได คสล. เหมือนกับการออกแบบแผ่นพื้น คสล. ซึ่งประกอบด้วยภาระน้ำหนักบรรทุก โมเมนต์ดัด แรงเฉือน แรงยึดเหนี่ยวและโมเมนต์บิด (ถ้ามี) ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของคานแม่บันไดที่รองรับแผ่นพื้นบันไดนั้น เหล็กเสริมที่ใช้ในแผ่นพื้นบันไดมีทั้งเหล็กเสริมเอกเพื่อรับโมเมนต์ดัดและเหล็กเสริมกันร้าวเพื่อต้านทานการยืดหดตัวของคอนกรีตนอกจากนี้อาจมีเหล็กยึดชั้นทางยาวที่ติดตั้งไปตามชั้นของบันไดและมีเหล็กเสริมที่แต่ละมุมของชั้นบันไดเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตที่ผิวบน อันเนื่องมาจากการยืดหดตัวของคอนกรีต

2.1 บันไดแบบพาดทางช่วงยาว

บันไดแบบพาดทางช่วงยาวแบบพื้นต้นจะมีคานรองรับทั้งสองด้านของช่วงยาวของบันได ถ้าบันไดเป็นแบบไม่มีชานพัก คานรองรับอาจเป็นคานพื้นชั้นล่างกับคานพื้นชั้นบน แต่ถ้าบันไดเป็นแบบมีชานพัก คานรองรับอาจเป็นคานพื้นชั้นล่างหรือคานพื้นชั้นบนกับคานชานพักที่อยู่ระหว่างพื้นชั้นล่างกับพื้นชั้นบน ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบแผ่นพื้นบันไดแบบนี้ พิจารณาให้ช่วงยาวระหว่างคานรองรับเป็นแบบช่วงเดียวธรรมดา (Simple Supported) และคำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน โดยพิจารณาจากระยะช่วงว่างในแนวราบระหว่างคานที่รองรับนั้น ซึ่งการเสริมเหล็กในแผ่นพื้นบันไดแบบนี้จะเหมือนกับการเสริมเหล็กในแผ่นพื้น คสล. ทางเดียว โดยมีเหล็กเสริมเอกวางอยู่ทางด้านล่างตามแนวยาวของพื้นบันไดและฝังยึดเข้าไปในคานที่รองรับ

อนึ่ง เมื่อพิจารณาออกแบบให้ขอบปลายยึดแน่นกับคานที่รองรับจะต้องล้วงเหล็กบนเข้าไปในคานรองรับและให้มีระยะฝังยึดอย่างเพียงพอ เพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวตามต้องการ ส่วนเหล็กทางขวางที่ตั้งฉากกับเหล็กเสริมเอกให้ใช้ตามอัตราส่วนของเหล็กด้านการยึดหดตัว นอกจากนี้ อาจพิจารณาใช้เหล็กยึดชั้นบันไดทางยาวที่ติดตั้งไปตามชั้นของบันไดโดยมีเหล็กเสริมที่แต่ละมุมที่ดัดเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต



รูปที่ 1 บันไดแบบพาดทางยาว

2.2 สมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD)

การคำนวณออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) อาศัยข้อสมมุติฐาน [12] ที่คำนึงถึงพฤติกรรมยืดหยุ่นของส่วน โครงสร้าง คสล. ในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ดังต่อไปนี้

- 1) ระบายของหน้าตัดก่อนและหลังการรับแรงดัดจะยังคงระนาบเดิม โดยความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน
- 2) ขณะรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้โดยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของคอนกรีตให้ถือว่าเส้นตรง
- 3) ให้เหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งหมดที่เกิดจากการดัด
- 4) ให้แทนที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึงด้วยหน้าตัดคอนกรีตซึ่งมีเนื้อที่ n เท่าของหน้าตัดเหล็กเสริม
- 5) ความเครียดสูงสุดที่ขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $\epsilon_u = 0.003$ หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมต้องไม่เกินกำลังคราก ดังสมการที่ (1)–(3)

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad (1)$$

เมื่อ $\epsilon_s < \epsilon_y$

$$f_s = f_y \quad (2)$$

เมื่อ $\epsilon_s \geq \epsilon_y$

$$\varepsilon_y = f_y/E_s \quad (3)$$

เมื่อ

f_y คือ หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม(กก./ชม.²)

f_s คือ หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม(กก./ชม.²)

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม(กก./ชม.²)

ε_s คือ หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึง(มม./มม.)

ε_y คือ หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมที่จุดคราก(มม./มม.)

6) บันไดคอนกรีตเสริมเหล็กจะออกแบบคล้ายกับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่น้ำหนักของบันไดจะถ่ายลงคานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป การออกแบบจึงจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆ ในการออกแบบ ดังต่อไปนี้

6.1) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c)

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวบ่งบอกหรือแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูป (Deformation) ของวัสดุ เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก มาตรฐาน วสท.011007-19 [11] กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังสมการที่ (4)–(5)

$$E_c = 4,270W_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

เมื่อ

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (กก./ชม.²)

W_c คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กก./ม.³)

f'_c คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน เมื่ออายุ 28 วัน (กก./ชม.²)

ดังนั้น สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาใช้หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.323 (ตัน/ม.³) [11]

จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

$$E_c = 15,120\sqrt{f'_c} \quad (5)$$

6.2) โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (E_s)

สำหรับเหล็กเสริมทุกชั้นคุณภาพจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_s เท่ากับ 2.04×10^6 กก./ชม.²

6.3) อัตราส่วนโมดูลัส ดังสมการที่ (6)

$$n = E_s/E_c \quad (6)$$

อาจใช้เป็นเลขจำนวนเต็มทีใกล้ที่สุดแต่ต้องไม่ต่ำกว่า 6

2.3 ขั้นตอนการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบพาดทางช่วงยาว

1) กำหนดค่า f'_c และ f_y เพื่อหาค่า f_c และ f_s

f_c คือ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $0.375f'_c$ ไม่เกิน 65 กก./ชม.²

โดย f'_c คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก มาตรฐาน เมื่ออายุ 28 วัน (กก./ชม.²)

สำหรับเหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SR24 $f_s = 0.5f_y$ ไม่เกิน 1,200 กก./ชม.²

สำหรับเหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD30 $f_s = 0.5f_y$ ไม่เกิน 1,500 กก./ชม.²

สำหรับเหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD40 f_s ไม่เกิน 1,700 กก./ชม.²

โดย f_y คือ หน่วยแรงดึงครากของเหล็กเสริม (กก./ชม.²)

2) หาขนาดชั้นบันไดและความหนาของพื้นบันไดดังสมการที่ (7)–(10)

$$S_r = H/N_r \quad (7)$$

$$N_t = N_r - 1 \quad (8)$$

$$T_h = L - N_t \quad (9)$$

$$T_{less} = F \quad (10)$$

เมื่อ S_r คือ ขนาดความสูงของลูกตั้ง(ชม.)

H คือ ความสูงระหว่างพื้นชั้นล่างถึงชานพักบันได (ชม.)

N_r คือ จำนวนของลูกตั้ง (ชั้น)

N_t คือ จำนวนลูกนอน (ชั้น)

T_h คือ ขนาดความกว้างของลูกนอน (ชม.)

T_{less} คือ ความหนาต่ำสุดของพื้นบันได (ชม.)

L คือ ความยาวของบันได(ไม่รวมชานพักบันได) (ชม.)

F คือ ค่าจากตารางที่ 1 (ชม.)

ตารางที่ 1 ความหนาที่ต่ำสุดของแผ่นพื้นบันไดที่ไม่ได้คำนวณระยะแอ่น

องค์ อาคาร	ความหนาที่ต่ำสุดที่กำหนดให้			
	ช่วง เดียว	ปลาย ต่อเนื่อง ด้านเดียว	ปลาย ต่อเนื่อง สองด้าน	ปลาย ยื่น
แผ่นพื้น	L/20	L/24	L/28	L/10

3) หาน้ำหนักบรรทุกในแนวราบ [13] ดังสมการที่ (11)

$$W_t = W_r + W_s + W_u \quad (11)$$

เมื่อ W_t คือ น้ำหนักรวมของบันได หน่วยเป็น กก./ม.²

น้ำหนักขั้นบันได $W_r = 12S_r$; กก./ม.²

น้ำหนักพื้นบันได $W_s = \frac{24(S)\sqrt{S_r^2 - Th^2}}{Th}$; กก./ม.²

W_u คือ น้ำหนักบรรทุกจร (กก./ม.²)

S_r คือ ขนาดความสูงของลูกตั้ง(ชม.)

S คือ ความหนาของพื้นบันได (ชม.)

4) ตรวจสอบความหนาของพื้นบันได ดังสมการที่ (12)–(17)

$$J = 1 - \frac{k}{3} \quad (12)$$

$$k = 1 / \left(1 + \frac{f_s}{nf_c} \right) \quad (13)$$

$$R = \frac{1}{2} f_c j k \quad (14)$$

$$M = \frac{w_t L^2}{8} \quad (15)$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์สูงสุดของบันได(กก.-ม.)

คำนวณค่าความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ

$$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} \quad (16)$$

$$d_r = S - C - \frac{Dia}{2} \quad (17)$$

เมื่อ d คือ ความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ(ชม.)

b คือ ความกว้างที่พิจารณาเท่ากับ 1 ม.

d_r คือ ความลึกประสิทธิภาพจริง(ชม.)

C คือ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (ชม.)

Dia คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม (ชม.)

ถ้าหาก d_r มากกว่า d ถือว่ามีความปลอดภัย

5) ตรวจสอบแรงเฉือน (V, V_c หน่วยเป็น กก.)

แรงเฉือน ณ หน้าตัดวิกฤติ $V = W_t \left(\frac{L}{2} - \frac{d}{100} \right)$ แรงเฉือนที่พื้นคอนกรีตรับได้ $V_c = 0.29 \sqrt{f'_c} b d$

6) หาปริมาณเหล็กเสริม

$A_s = M(100)/(f_s j d)$ เมื่อ A_s คือ ปริมาณเหล็กเสริม หน่วยเป็น ชม.²/ม.

7) กำหนดหาปริมาณของเหล็กกันยึดหด (A_{st})

กรณีใช้เหล็กเส้นกลม(SR24) $A_{st} = 0.0025bS$ กรณีใช้เหล็กเส้นข้ออ้อย(SD30) $A_{st} = 0.0020bS$ กรณีใช้เหล็กเส้นข้ออ้อย(SD40) $A_{st} = 0.0018bS$ เมื่อ A_{st} คือ ปริมาณเหล็กกันยึดหด หน่วยเป็น ชม.²/ม.

3. ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม

ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm, HCA) ได้มีการนำเสนอเป็นครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1984 [14] โดย Pearl ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะเหมือนการปีนเขาของนักปีนเขาเพื่อค้นหาเส้นทางไปถึงยอดเขาโดยเร็วที่สุด ด้วยวิธีการวางเป้าหมายเริ่มต้นเป็นยอดเขาแล้วค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด เพื่อการเดินทางไปยังยอดเขาโดยใช้เวลาที่สั้นที่สุด อัลกอริทึมนี้เป็นวิธีการหาสถานะเป้าหมายหรือสถานะที่ดีที่สุด ที่หาคำตอบเชิงฮิวริสติก(Heuristic Search) เช่นเดียวกับ เจเนติกอัลกอริทึม(Genetic Algorithm) ซึ่งกำลังนิยมใช้ในการแก้ปัญหาในด้านความเหมาะสมหลายๆ ปัญหา เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม สำหรับค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด หาคำตอบเชิงกราฟ (Graph Search Algorithm) คล้ายการไต่ขึ้นเขาและลงจากเขาในแนวตั้งตลอด

4. ขั้นตอนการทำงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยใช้วิธี HCA ด้วยการคำนวณราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก จากราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานต่ำสุด ซึ่งขั้นตอนการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมถูกพัฒนาโดยใช้

โปรแกรม Microsoft visual basic 6.0 พัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณและค้นหาคำตอบโดยการยกตัวอย่างการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน

เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย คือ คอมพิวเตอร์ และโปรแกรมถูกพัฒนากระบวนการหาคำตอบ โดยมีคุณสมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการ (Microsoft windows 10) หน่วยประมวลผลกลาง Intel(R)Core(TM)i7-7700HQ CPU @ 2.80 GHz หน่วยความจำแรม 12.0 GB (11.9 GB usable) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนากระบวนการหาคำตอบคือ Microsoft Visual Basic 6.0 โดยใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ Visual Basic

4.1 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD)
- 2) กำหนดค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต 180, 210, 240, 280, 300 และ 320 กก./ซม.²
- 3) เหล็กเสริมเอกที่ใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาด 12, 16, 20, 25 และ 28 มม. ส่วนเหล็กเส้นกลม ขนาด 6 และ 9 มม.
- 4) กำหนดค่ากำลังครากของเหล็กข้ออ้อย 3,000 และ 4,000 กก./ซม.² และ เหล็กเส้นกลม 2,400 กก./ซม.²
- 5) กำหนดความสูงของชั้นบันไดลูกตั้งไม่เกิน 20 ซม. ความกว้างของชั้นบันไดลูกนอนไม่น้อยกว่า 25 ซม. และความหนาพื้นบันไดชั้นต่ำเท่ากับความยาว/20 ซม. ชั้นสูงไม่เกิน 30 ซม.
- 6) กำหนดค่าความสูงของเสา 1.35, 1.60 และ 1.85 ม.
- 7) กำหนดค่าความกว้างของบันได 1 ม.
- 8) กำหนดค่าความยาวของบันได 3, 4 และ 5 ม.
- 9) กำหนดน้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นๆ เท่ากับ 100 กก./ม.²

10) การออกแบบบันไดพาตทางช่วงยาวท้องเรียบ

4.2 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายของการศึกษานี้ คือ สมการที่ให้ผลรวมราคาวัสดุของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งได้แก่ ค่าคอนกรีต เหล็กเสริมคอนกรีตและปริมาณแบบหล่อคอนกรีต รวมกันแล้วต้องมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (18)

$$f(x) = \min \sum (V_c C_c + W_s C_s + V_F C_F) \quad (18)$$

เมื่อ $f(x)$ คือ ราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก(บาท)

V_c คือ ปริมาตรของคอนกรีต(ม.³)

C_c คือ ราคาของคอนกรีต(บาท/ม.³)

W_s คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม(กก.)

C_s คือ ราคาของเหล็กเสริม(บาท/กก.)

V_F คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต(ม.)

C_F คือ ราคาของแบบหล่อคอนกรีต(บาท/ม.²)

4.3 ราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดใช้ราคาวัสดุเฉพาะพื้นที่และราคาของวัสดุก่อสร้าง โดยในแต่ละรายการนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่

1) ราคาคอนกรีต

ราคาคอนกรีตที่ใช้เป็นราคาคอนกรีตผสมเสร็จไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม จากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดมหาสารคาม ประจำเดือนกุมภาพันธ์ 2565[15] และค่าแรงงานตามบัญชีค่าแรงงาน/ดำเนินการสำหรับการถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างออกตามประกาศคณะกรรมการราคากลางและขึ้นทะเบียนผู้ประกอบการ เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการกำหนดราคากลางงานก่อสร้าง ณ วันที่ 19 ตุลาคม 2560 [16] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ราคาคอนกรีตผสมเสร็จและค่าแรงงาน

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอกมาตรฐาน)			
กำลังอัดประลัยคอนกรีตรูปทรงกระบอก, f'_c (กก./ซม. ²)	ราคา (บาท/ม. ³)	ค่าแรงงาน (บาท/ม. ³)	รวม (บาท/ม. ³)
180	1,960	391	2,351
210	2,000	391	2,391
240	2,040	391	2,431

ตารางที่ 2 ราคาคอนกรีตผสมเสร็จและค่าแรงงาน(ต่อ)

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอกมาตรฐาน)			
กำลังอัดประลัยคอนกรีตรูปทรงกระบอก, f'_c (กก./ชม. ²)	ราคา (บาท/ม. ³)	ค่าแรงงาน (บาท/ม. ³)	รวม (บาท/ม. ³)
280	2,120	391	2,511
300	2,160	391	2,551
320	2,200	391	2,591

หมายเหตุ 1. ราคาสินค้าเฉลี่ยวัสดุก่อสร้าง (ราคาเงินสด ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ไม่รวมค่าขนส่ง) ของจังหวัดมหาสารคาม เดือนกุมภาพันธ์ ปี 2565 [15]

2. ค่าแรงงานสำหรับโครงสร้างและส่วนประกอบอาคารชั้นเดียว [16]

2) ราคาเหล็กเสริมคอนกรีต

ราคาเหล็กเสริมคอนกรีตต่อหน่วย(กิโลกรัม) คำนวณจากราคาเหล็กเสริมคอนกรีตแต่ละประเภทตามกำลังครากของเหล็กเสริมคอนกรีต คือ 2,400 3,000 และ 4,000 กก./ชม.² และค่าแรงงานในการตัด คัด และผูกเหล็กเสริมคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3

3) ราคาแบบหล่อคอนกรีต

ราคาวัสดุหล่อคอนกรีตเป็นไม้แบบหล่อคอนกรีต ราคา 637 บาท/ม.² ราคาแรงงานติดตั้งแบบหล่อคอนกรีต คัดกรณีแบบหล่อคอนกรีตทั่วไปที่ติดตั้งน้อยกว่า 5,000 ม.² ราคา 133 บาท/ม.² รวมเป็นเงิน 770 บาท/ม.² โดยรายละเอียดของราคาไม้แบบหล่อคอนกรีตทั่วไปเฉลี่ยใช้งาน 80% ต่อ ม.² ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ราคาและค่าแรงงานในการตัด คัด และผูกเหล็กเสริมคอนกรีต

ราคาและค่าแรงงานในการตัด คัด และผูกเหล็กเสริมคอนกรีต			
ชนิดเหล็กเสริมคอนกรีต	ราคา(บาท/กก.)	ค่าแรงงาน(บาท/กก.)	รวม(บาท/กก.)
เหล็กเส้นกลม SR24	29.23	4.10	33.33
เหล็กข้ออ้อย SD30	27.89	3.30	31.19
เหล็กข้ออ้อย SD40	27.89	3.30	31.19

หมายเหตุ 1. ราคาสินค้าเฉลี่ยวัสดุก่อสร้าง (ราคาเงินสด ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ไม่รวมค่าขนส่ง) ของจังหวัดมหาสารคาม เดือนกุมภาพันธ์ ปี 2565[15]

2. ราคาเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นราคาเฉลี่ย

3. ค่าแรงงานสำหรับเหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 10 มม.[16]

4. ค่าแรงงานสำหรับ เหล็กเส้นกลม / เหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 10 มม. ถึง 16 มม.[16]

4.4 รูปแบบของการเสริมเหล็กของโปรแกรมที่พัฒนา

โดยเหล็กเสริมในบันไดจะประกอบด้วยเหล็กยึดชั้นบันได และเหล็กเสริมในพื้นบันได ซึ่งมีลักษณะคล้ายในพื้นปกติ คือ มีลักษณะวางเป็นตะแกรง โดยเหล็กเสริมเอียงจะอยู่ในทิศทางขนานกับช่วงการรับน้ำหนักระหว่างแม่บันไดที่รองรับ ส่วน

เหล็กเสริมกันยัดหัดจะใช้เพื่อป้องกันการแตกร้าวและช่วยยึดเหล็กเสริมเอียงให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ

ในกรณีของบันไดลาดทางช่วงยาวระหว่างคานแม่บันไดต่างระดับความสูง เหล็กเสริมเอียงจะเป็นเส้นอยู่ล่างสุด เพื่อให้มีความลึกประสิทธิภาพในการต้านทานโมเมนต์ดัด ส่วนเหล็กเสริมกันยัดหัดจะเป็นจุดวงกลมวางบนเหล็กเสริมเอียง

- 4) ตรวจสอบว่าสถานะใหม่ดีกว่าสถานะเดิมหรือไม่
- 5) ถ้าหากไม่ใช่ สถานะใหม่จะถูกปฏิเสธแล้วให้วนกลับไปทำใน ขั้นตอน ที่ 3
- 6) หากใช่ กำหนดสถานะใหม่เป็นสถานะปัจจุบัน
- 7) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด (3,000 รอบ) ถ้าเข้าเงื่อนไขการหยุดที่กำหนดไว้ การทำงานเมื่อครบรอบตามที่กำหนดไว้ ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดไว้ที่ 3,000 รอบ หากไม่ใช่ ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3

สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดลองนี้ กำหนดให้สถานะต่างๆ เป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

สถานะเริ่มต้น คือ กำหนดความหนาพื้นบันไดที่หนา มาก ขนาดเหล็กเสริมที่ใหญ่มากและปริมาณเหล็กเสริมจำนวนมาก

สถานะใหม่ คือ ความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม หลังจากการสุมแล้วคำนวณหาโมเมนต์ที่เกิดขึ้นและผ่านการตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรง คำนวณหาราคารวมแล้วได้ราคารวมที่ต่ำกว่าความหนาของพื้นบันไดในสถานะเดิม

สถานะเดิม คือ ความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม ก่อนการสุม

สถานะปัจจุบัน คือ ความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม หลังจากการสุมแล้วคำนวณหาโมเมนต์ที่เกิดขึ้นและผ่านการตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรง คำนวณหาราคารวมแล้วได้ราคารวมที่ต่ำที่สุดในขณะนั้น คำตอบที่เหมาะสม คือ คำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบ และมีราคาต่ำที่สุด

5. ตัวอย่างการทดลอง

งานวิจัยนี้ทดลองด้วยการระบุค่า น้ำหนักบรรทุกจร ความยาวขานพักบันได ความยาวช่วงบันไดและความสูงของบันได ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยคำนวณบันไดที่มีความกว้าง 1 ม. และความหนาของคานรองรับบันได 0.15 ม. กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นๆ เท่ากับ 100 กก./ม.² การออกแบบนี้จึงเป็นการคำนวณเพื่อหาขนาดลูกตั้ง ลูกนอน ความหนาพื้นบันได และปริมาณเหล็กเสริมที่

เหมาะสม โดยการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ด้วยการนำ HCA มาช่วยในการทำงานซึ่งกำหนดจำนวนรอบเพื่อเป็นเงื่อนไขในการหยุดการทำงานเพื่อทราบถึงจำนวนครั้งที่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของแต่ละตัวอย่าง โดยมีตัวอย่างการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างทดลองการออกแบบบันได คสล.

ตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกจร (กก./ม. ²)	ความยาวขานพักบันได (ม.)	ความยาวช่วงบันได (ม.)	ความสูงบันได (ม.)
1	300	1.00	3.00	1.35
2	400	1.50	4.00	1.60
3	500	2.00	5.00	1.85

ผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการหาคำตอบของวิธี HCA จะนำผลของคำตอบที่ได้จากการคำนวณ จำนวนรอบในการหาคำตอบทั้งหมดที่ใช้ในการหาคำตอบมาเปรียบเทียบกับวิธี CM โดยการคำนวณทั้งสองวิธีจะใช้เงื่อนไขในการออกแบบเดียวกัน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างรวมค่าแรงงานต่อราคาค่าสุดท้ายสำหรับออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม

6. ผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาจากตัวอย่างการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยทั้ง 3 ตัวอย่าง กำหนดใช้เหล็กเสริม SD30 และใช้ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีตรูปทรงกระบอก (f_c') เท่ากับ 180 กก./ซม.²

6.1 ตัวอย่างการทดลองที่ 1

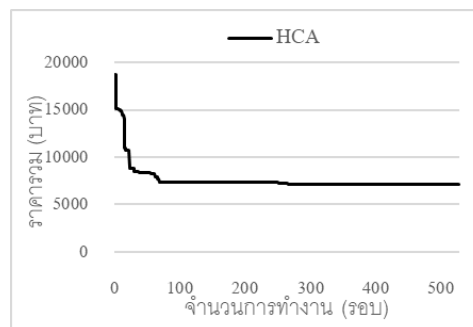
จากตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจร 300 กก./ม.² ความยาวขานพักบันได 1.00 ม. ความยาวช่วงบันได 3.00 ม. ความสูงบันได 1.35 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี HCA กับวิธี CM

รายการ	1	
	HCA	CM
พื้นหนา(ซม.)	14	15
ขนาดลูกคั่ง(ซม.)	16.88	16.88
ขนาดลูกนอน(ซม.)	28.57	28.57
เหล็กเสริมเอก	DB12 @0.15ม.	DB12 @0.125 ม.
เหล็กเสริมกันยึดหด	RB9 @0.20ม.	RB9 @0.15ม.
เหล็กเสริมชั้นบันได	RB9 @0.20ม.	RB9 @0.15ม.
เหล็กเสริมมุมชั้นบันได(ท่อน)	14-RB9	14-RB9
ราคารวม(บาท)	7,123.02	7,468.66
ร้อยละความแตกต่างราคา (%)	4.63	

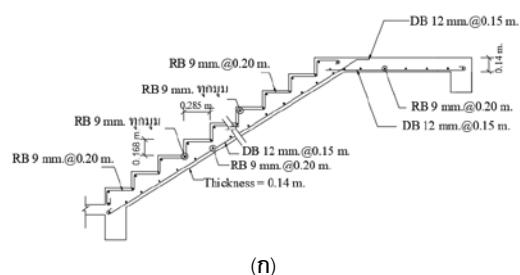
จากตารางที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธี HCA กับวิธี CM จากผลการศึกษาพบว่าบันไดที่ออกแบบด้วยวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าบันไดที่ออกแบบด้วยวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 4.63

จากรูปที่ 4 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1 ใช้จำนวนการทำงานในการค้นหาคำตอบจำนวน 266 รอบ หากพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนการทำงาน ซึ่งเป็นผลของการออกแบบที่ผ่านเงื่อนไขสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] ซึ่งจะเห็นว่าเส้นของกราฟมีแนวโน้มลดลงในทุกรอบของการทำงาน แสดงให้เห็นว่าในทุกรอบของการออกแบบจะได้หน้าตัดที่มีความปลอดภัยและความประหยัด มีการค้นหาคำตอบที่มีความปลอดภัยและประหยัดในทุกรอบของการทำงาน จนกว่าจะไม่พบหน้าตัดที่ต้องการซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงท้ายของการทำงาน ก่อนที่จะมีการหยุดการทำงานในที่สุด

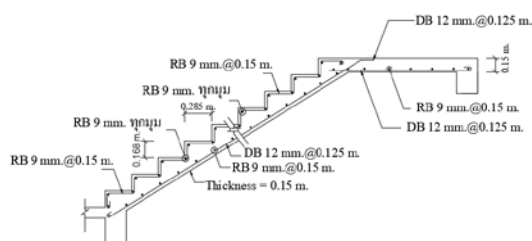


รูปที่ 4 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1

จากการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 1 มีรายละเอียดขนาดของหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 5 (ก)-(ข) ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 รายละเอียดขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับตัวอย่างที่ 1 (ก) กรณีการออกแบบด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1 (ข) กรณีการออกแบบด้วยวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 1

6.2 ตัวอย่างการทดลองที่ 2

จากตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ 2 กำหนดให้หน้าหนักบรทุกจร 400 กก./ม.² ความยาวขานพักบันได 1.50 ม. ความยาวช่วงบันได 4.00 ม. ความสูงบันได 1.60 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM ดังแสดงในตารางที่ 7

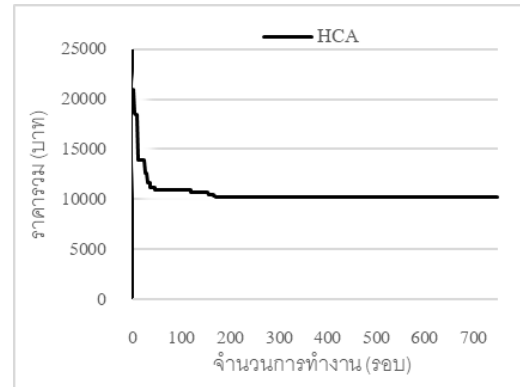
จากตารางที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบของตัวอย่างที่ 2 ด้วยวิธี HCA กับวิธี CM จากผลการศึกษาพบว่าวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 4.80

จากรูปที่ 6 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2 ใช้จำนวนการทำงานในการค้นหาค่าตอบจำนวน 710 รอบ หากพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนการทำงาน ซึ่งเป็นผลของการออกแบบที่ผ่านเงื่อนไขสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของกราฟมีความคล้ายกับตัวอย่างที่ 1 โดยเส้นของกราฟมีแนวโน้มลดลงในทุกรอบของการทำงาน แสดงให้เห็นว่าในทุกรอบของการออกแบบจะได้หน้าตัดที่มีความปลอดภัยและมีความประหยัด มีการค้นหาค่าตอบที่มีความปลอดภัยและประหยัดในทุกรอบของการทำงาน จนกว่าจะไม่พบหน้าตัดที่ต้องการซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงท้ายของการทำงานก่อนที่จะมีการหยุดการทำงานในที่สุด

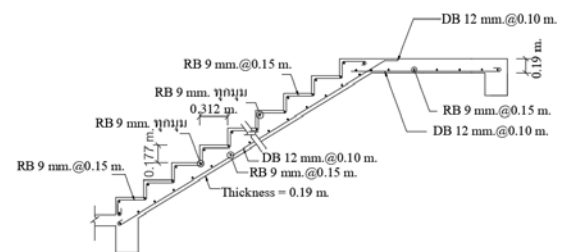
จากการออกแบบด้วยวิธี HCA และวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 2 มีรายละเอียดขนาดของหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในรูปที่ 7(ก)-(ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี HCA กับวิธี CM

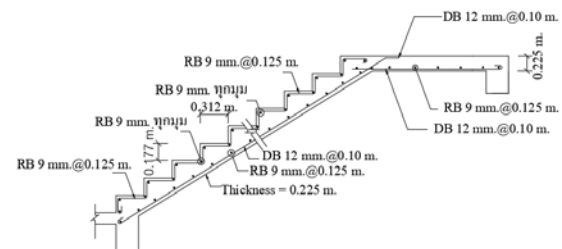
รายการ	2	
	HCA	CM
พื้นหนา(ซม.)	19	22.5
ขนาดลูกตั้ง(ซม.)	17.78	17.78
ขนาดลูกนอน(ซม.)	31.25	31.25
เหล็กเสริมเอก	DB12 @0.10ม.	DB12 @0.10ม.
เหล็กเสริมกันยัดหด	RB9 @0.15ม.	RB9 @0.125ม.
เหล็กเสริมชั้นบันได	RB9 @0.15ม.	RB9 @0.125ม.
เหล็กเสริมมุมชั้นบันได (ท่อน)	16-RB9	16-RB9
ราคารวม(บาท)	10,183.52	10,697.39
ร้อยละความแตกต่างราคา (%)	4.80	



รูปที่ 6 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 รายละเอียดขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับตัวอย่างที่ 2 (ก) กรณีการออกแบบด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2 (ข) กรณีการออกแบบด้วยวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 2

6.3 ตัวอย่างการทดลองที่ 3

จากตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ 3 กำหนดให้หนาหนึ่กับบรรทุกจร 500 กก./ม.² ความยาวขานพักบันได 2.00 ม. ความยาวช่วงบันได 5.00 ม. ความสูงบันได 1.85 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM ดังแสดงในตารางที่ 8

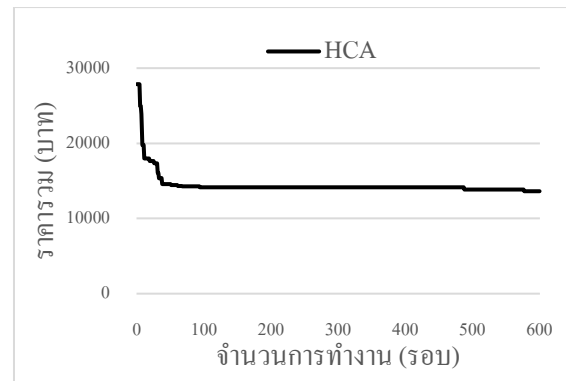
จากตารางที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบของตัวอย่างที่ 3 ด้วยวิธี HCA กับวิธี CM จากผลการศึกษา

พบว่าวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 5.00

จากรูปที่ 8 การคู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3 ใช้จำนวนการทำงานในการค้นหาคำตอบจำนวน 577 รอบ หากพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนการทำงาน ซึ่งเป็นผลของการออกแบบที่ผ่านเงื่อนไขสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของกราฟมีความคล้ายกับตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเส้นของกราฟมีแนวโน้มการลดลงในทุกรอบของการทำงาน แสดงให้เห็นว่าในทุกรอบของการออกแบบจะได้หน้าตัดที่มีความปลอดภัยและมีความประหยัด มีการค้นหาคำตอบที่มีความปลอดภัยและประหยัดในทุกรอบของการทำงาน จนกว่าจะไม่พบหน้าตัดที่ต้องการซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงท้ายของการทำงานก่อนที่จะมีการหยุดการทำงานในที่สุด

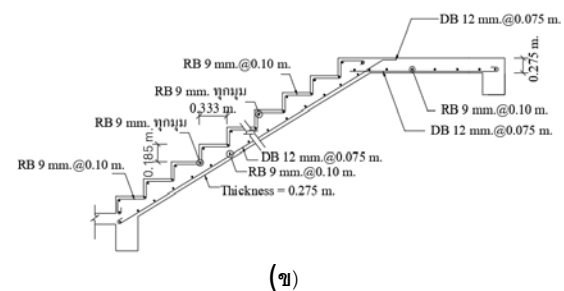
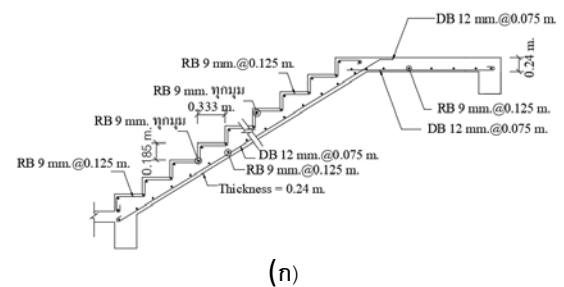
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี HCA กับวิธี CM

รายการ	3	
	HCA	CM
พื้นหนา(ซม.)	24	27.5
ขนาดลูกตั้ง(ซม.)	18.50	18.50
ขนาดลูกนอน(ซม.)	33.33	33.33
เหล็กเสริมเอก	DB12 @0.075ม.	DB12 @0.075ม.
เหล็กเสริมกันยึดหด	RB9 @0.125ม.	RB9 @0.10ม.
เหล็กเสริมชั้นบันได	RB9 @0.125ม.	RB9 @0.10ม.
เหล็กเสริมมุม ชั้นบันได(ท่อน)	18-RB9	18-RB9
ราคารวม(บาท)	13,626.26	14,343.86
ร้อยละความแตกต่าง ราคา (%)	5.00	



รูปที่ 8 การคู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3

จากการออกแบบด้วยวิธี HCA และวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 3 มีรายละเอียดขนาดของหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในรูปที่ 9(ก)-(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 9 รายละเอียดขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับตัวอย่างที่ (ก) กรณีการออกแบบด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3 (ข) กรณีการออกแบบด้วยวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 3

7. อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM โดยกำหนดเงื่อนไข การออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] เพื่อให้บันไดคอนกรีต

เสริมเหล็กมีราคาต่ำสุดแต่ยังคงมีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัยต่อการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณในทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่าบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบด้วยวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบด้วยวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 4.63, 4.80 และ 5.00 ตามลำดับ โดยคำตอบของการคำนวณด้วยวิธี HCA จะมีการหาค่าตอบที่มีราคาต่ำที่สุดแต่ยังคงแข็งแรงยังคงเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด การค้นหาค่าตอบของวิธี HCA จะเข้าสู่ค่าตอบที่มีค่าต่ำกว่าเสมอ นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้วิธี HCA ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วเป็นอัตโนมัติและไม่จำเป็นต้องพึ่งประสบการณ์หรือความเชี่ยวชาญของผู้ออกแบบ

8. สรุปผลการทดลอง

การทดลองใช้วิธี HCA สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการค้นหาค่าตอบกับวิธี CM พบว่าสามารถใช้วิธี HCA สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมได้ดีกว่า ซึ่งผลการออกแบบของวิธี HCA ได้ขนาดของหน้าตัดบันไดที่เล็กกว่า ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีราคารวมที่ต่ำกว่า คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.81 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธี HCA ให้ผลลัพธ์จากการออกแบบที่ประหยัดและมีกระบวนการออกแบบที่รวดเร็วกว่าวิธี CM ดังนั้น จึงสามารถที่จะนำวิธี HCA มาใช้ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเหมาะสม

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] V. Govindaraj and J. V. Ramasamy, "Optimum detailed design of reinforced concrete continuous

beams using Genetic Algorithms," *Computers and Structures*, vol. 84, no. 1–2, pp. 34–48, 2005, doi: 10.1016/j.compstruc.2005.09.001.

[2] J. Cheng, "Optimum design of steel truss arch bridges using a hybrid genetic algorithm," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, no. 8–9, pp. 1011–1017, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.03.007.

[3] S. Patchotichai, N. Jitrapinat and A. Lamom, "Optimum Design of Axial Loaded Reinforced Concrete Column Using Bisection Algorithm," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 28, no. 3, September 2011.9

[4] A. Tapown, A. Lamom and R. Cheerarot, "Optimal Design of Biaxial Reinforced Concrete Rectangular Column by Heuristic Algorithm," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng, Mahasarakham Univ., Mahasarakham, Thailand, 2012.

[5] S. Juisuwannathat and W. Smittakorn, "Optimal Design of Reinforced Concrete Building by Simulated Annealing Algorithm," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2014.

[6] A. Techaratanaprasert and W. Smittakorn, "Optimum Design of Reinforced Concrete Building by Harmony Search Algorithm," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2014.

[7] E. Prakobkit and W. Smittakorn, "Application of Firefly Algorithm to Optimum Design of Reinforced Concrete Structures," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2015.

[8] A. Tapown and R. Cheerarot, "Optimum Design of Reinforced Concrete Foundations by Fruit fly Optimization Algorithm," *The journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp.16–24, 2021.

[9] S. Chomchuen and A. Lamom, "Optimum Design of Prestressed Concrete Plank Girder Using Hill

- Climbling Algorithm,” *UBU Engineering Journal*, vol. 14, no. 14, pp.129–140, 2021.
- [10] M. Azizi, S. Talatahari, M. Basiri and M. B. Shishehgharkhaneh, “Optimal design of low- and high-rise building structures by Tribe- Harmony Search algorithm,” *Decision Analytics Journal*, vol. 3, 2022, Art. no. 100067, doi: 10.1016/j.dajour.2022.100067
- [11] *Building Code Requirements for Reinforced Concrete Working Stress Design Method*, EIT Standard 011007-19, The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King’s Patronage, Bangkok, Thailand, 2019
- [12] V. Chorwichian, “Reinforced Concrete Stairs,” in *Reinforced Concrete Design (Working Stress Design:WSD)*, Bangkok, Thailand: P.S. Commercial Ltd., Part., 1999, ch. 7, sec. 7.1-7.5, pp. 203–213
- [13] C. Jarujinda, “Reinforced Concrete Stairs,” in *Reinforced Concrete Design*, Bangkok, Thailand: Bunloet Printing House, 1999, ch. 4, sec. 1, pp. 69–81
- [14] J. Pearl, “Basic Heuristic-Search Procedures,” in *Heuristic: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Reding, MA, USA: Addison–Wesley Publishing Co., 1984, ch. 2, sec. 2.1, pp. 35–36
- [15] Construction material prices, Department of Trade Policy and Strategy. Ministry of Commerce. [Online]. Available http://www.indexpr.moc.go.th/PRICE_PRESENT/Select_month_regionCsi.asp?region=22022
- [16] Labor cost according to the labor/operational book value for taking off the mid-price calculation for construction, The comptroller general’s Department, , Bangkok, Thailand, 2017.

สภาวะที่เหมาะสมในการกัดผิวหน้าเรียบผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก ต่อค่าความขรุขระผิว

Suitable Condition for Face Milling of Wood-Plastic Composite Products on Surface Roughness

ธนศ รัตนวิไล^{1,*} สมศักดิ์ จีนาพงษ์¹ และ ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

คอหงส์ หาดใหญ่ สงขลา 90110

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อหยาง เมืองสงขลา สงขลา 90000

Thanate Ratanawilai^{1,*} Somsak Jeenapong¹ and Chainarong Srivabutr²

¹Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Kho Hong, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: thanate.r@psu.ac.th

Received: Oct 28, 2022; Revised: Jan 03, 2023; Accepted: Jan 19, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกัดผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกที่มีขายในเชิงพาณิชย์ โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 250 500 และ 710 รอบ/นาที อัตราป้อนกัต 125 315 และ 630 มม./นาที ความลึกในการกัด 0.50 0.75 และ 1.00 มม. และวัสดุเชิงประกอบชนิดที่มีส่วนผสมหลักระหว่าง PE PP หรือ PVC และผงไม้ จากผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC พบว่า แนวโน้มค่าความขรุขระผิวระดับต่ำสุดสำหรับวัสดุเชิงประกอบ PP เมื่อทำการปรับค่าความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที อัตราป้อนกัต 315 มม./นาที และความลึก 0.75 มม. โดยมีค่าความขรุขระผิว $1.70\ \mu\text{m}$ สำหรับวัสดุเชิงประกอบ PE เมื่อปรับค่าความเร็วรอบที่ 710 รอบ/นาที อัตราป้อนกัต 125 มม./นาที และความลึก 1.00 มม. ให้ค่าความขรุขระผิว $2.64\ \mu\text{m}$ และวัสดุเชิงประกอบ PVC เมื่อปรับค่าความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที อัตราป้อนกัต 125 มม./นาที และความลึก 0.50 มม. ให้ค่าความขรุขระผิว $1.78\ \mu\text{m}$ นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของพลาสติกจะส่งผลต่อความขรุขระผิวของผลิตภัณฑ์ โดยที่วัสดุเชิงประกอบ PP ให้ค่าความขรุขระผิวต่ำสุด รองลงมา คือ วัสดุเชิงประกอบ PVC และ PE ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก, ความขรุขระผิว, เครื่องกัดแนวตั้ง

Abstract

This research aimed to study the suitable condition of a face milling and plastic types on surface roughness of commercial wood-plastic composites (WPCs). The experiment consisted of 4 factors; spindle speed, feeding rate, depth of

cut and types of WPCs. Three levels of cutting condition were the spindle speeds at 250, 500, and 710 rpm, feeding rates at 125, 315, and 630 mm/min, and depths of cut at 0.50, 0.75, and 1.00 mm whereas 3 types of WPCs were combination of PE, PP or PVC with wood-flour. The results show that the lowest surface roughness of WPCs was 1.70, 2.64, and 1.78 μm ., obtained from the composites PP, PVC, and PE at the cutting conditions of spindle speed 500, 710, and 500 rpm, the feeding rates 315, 125, and 125 mm per minute, and the depths of cut 0.75, 1.00, and 0.50 mm, respectively. Furthermore, the surface roughness value of the composites was affected by the different type of WPCs whereas the lowest to the highest surface roughness values were given by the PP, PVC, and PE composites, respectively.

Keywords: Wood-plastic composites, Surface roughness, Vertical milling machine

1. บทนำ

ไม้เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของไม้จึงมีความจำเป็นและมีการคิดค้นวิธีการใหม่ๆอย่างต่อเนื่อง เช่น กระบวนการผลิต การนำไปใช้งาน และการบำรุงรักษา โดยเฉพาะเทคโนโลยีในการนำประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้งอย่าง “ผงขี้เลื่อยไม้” มาพัฒนาเป็นไม้ทดแทน [1],[2] ที่เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบ ไม้พลาสติก (Wood-plastic composites; WPCs) ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่นำมอดแทนไม้ในธรรมชาติได้ โดยผลิตขึ้นจากพลาสติกที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) และผงขี้เลื่อยไม้ที่ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) [3] ซึ่งนับเป็นเทคโนโลยีทางด้านวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้ โดยทั่วไปจะใช้ผงขี้เลื่อยประมาณร้อยละ 40 และผงพลาสติกรวมถึงส่วนผสมทางเคมีอื่น ๆ อีกประมาณร้อยละ 60 [4] ถือได้ว่าเป็นการนำเอาความรู้ทั้งในส่วน of ไม้และของพลาสติกมาประสานรวมกันทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ จัดเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นแทนที่วัสดุที่ใช้ก่อสร้างแบบเดิม ๆ ข้อดีของการใช้วัสดุเชิงประกอบมาเป็นวัสดุทดแทน คือ มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา อัตราการดูดซับน้ำน้อย ไม่มีเชื้อราและปราศจากจากมดและปลวก [5] วัสดุเชิงประกอบสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี เช่น การอัดขึ้นรูป การฉีดเข้าแม่พิมพ์ และการอัดรีด เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการแปรรูปวัสดุเชิงประกอบจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด [6],[7] หรือชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดอื่น [8],[9]

ทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ให้เกิดความหลากหลาย [10] ดังนั้น เพื่อที่จะลดข้อจำกัดดังกล่าว จำเป็นจะต้องเพิ่มแนวทางในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุเชิงประกอบให้แตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปทั่วไป ให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นและเป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภค โดยการนำวัสดุเชิงประกอบมาผ่านกระบวนการแปรรูปและการออกแบบผลิตภัณฑ์ การแปรรูปวัสดุเชิงประกอบให้ได้รูปทรงที่ต้องการนั้น [11] พื้นผิวสำเร็จของงานเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญที่จะช่วยให้รูปร่างของวัสดุเชิงประกอบมีความแตกต่าง สวยงาม และถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น [12] จึงเป็นที่มาของการศึกษางานวิจัยนี้ โดยทำการศึกษาปัจจัยการกัดหน้าเรียบของวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกโดยเลือกศึกษาพลาสติกต่างชนิดกัน ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride; PVC) และมีขี้เลื่อยไม้ที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเป็นสารเสริมแรง

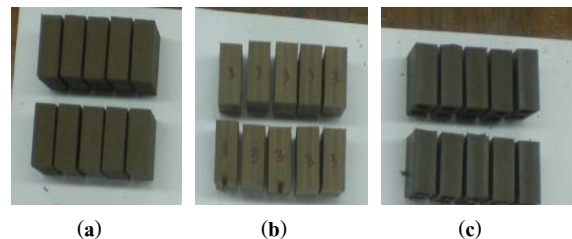
จากการสำรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กระบวนการกัดงานเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีผลต่อรูปร่างและคุณภาพผิวของชิ้นงาน โดยการใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัดในการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานจนเกิดผิวชิ้นงานหรือรูปร่างงานใหม่ [13],[14] การศึกษาปัจจัยหรือสภาวะการกัดเป็นสิ่งสำคัญ เช่น การศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถภาพการตัดไม้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราโดยใช้มีด Polycrystalline Diamond (PCD) ของกุศล พร้อมมูลและคณะ [15] โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อนและทิศ

ทางการป้อนตัดเทียบกับทิศทางเส้นไม้ที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานพบว่า ที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบ/นาที และอัตราป้อน 8 มม./นาที จะให้ผิวชิ้นงานที่ปราศจากขุยและมีความเรียบผิวดีที่สุด ในขณะที่ สรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และจักรนรินทร์ จักรทอง [16] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของงานกัดตัวอักษรบนไม้ยางพาราด้วยเครื่องกัดควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ปัจจัยที่การศึกษาคือ ทิศทางในการเดินมีดที่ทำมุมกับแนวเส้นไม้ อัตราป้อน ความเร็วรอบและความลึกในการกัด ที่ให้ค่าความขรุขระพื้นผิวที่ยอมรับได้ โดยค่าความเรียบผิวก่อนนำไปขัดในการตัดแต่งเฟอร์นิเจอร์อยู่ในช่วง 3.0–9.0 ไมโครเมตร (μm .) โดยกำหนดอัตราป้อนอยู่ในช่วง 100–750 มม./นาที ทิศทางในการเดินมีดที่ทำมุมกับแนวเส้นไม้ 0–90 องศา ความเร็วรอบอยู่ในช่วง 100–2,500 รอบ/นาที ความลึกในการกัด 1–3 มม. ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิว คือ อัตราป้อนและความเร็วรอบ โดยมีแนวโน้มว่าค่าความเรียบผิวจะลดลงเมื่ออัตราป้อนต่ำลงและความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จากการศึกษาการกลึงไม้พลาสติกนาร่องของ S. Zuzana และคณะ [17] โดยการเปรียบเทียบความขรุขระของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ 5 ชนิด สังเกตความเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Surface Roughness; R_a) กับ การเปลี่ยนแปลงของอัตราป้อนในช่วง 0.10–0.61 มม./นาที ที่ระยะป้อนลึก 0.5 มม. พบว่าอัตราป้อนที่มีค่าน้อยจะส่งผลให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในสภาพพื้นผิวละเอียดหรือหยาบสำหรับในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและสภาวะที่เหมาะสมในการกัดหน้าเรียบของวัสดุเชิงประกอบ ไม้พลาสติกที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อนกัดและความลึกในการกัด เพื่อเป็นประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมและเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการกัดหน้าเรียบวัสดุเชิงประกอบให้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังเป็นการประหยัดเวลาและได้รูปร่างของชิ้นงานที่หลากหลายอีกด้วย

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและการเตรียมตัวอย่างการทดลอง

วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกจำนวน 3 ชนิด ที่มีขายในท้องตลาด ได้แก่ 1) วัสดุเชิงประกอบ PVC ขนาด $1'' \times 2'' \times 118.11''$ 2) วัสดุเชิงประกอบ PE ขนาด $1'' \times 2'' \times 118.11''$ และ 3) วัสดุเชิงประกอบ PP ขนาด $1'' \times 6'' \times 118.11''$ นำวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิด มาตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอนให้มีขนาดความยาว 5 ซม. เพื่อเป็นชิ้นงานตัวอย่างในการนำไปกัดตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานขนาดความยาว 5 ซม. (a) PE (b) PP (c) PVC

2.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ยี่ห้อ CARIF รุ่น 260 BSA (มิลาน ประเทศอิตาลี) สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดลองกัดชิ้นงาน

2) เครื่องกัดประเภทยูนิเวอร์แซลแบบกัดแนวตั้งแกนหมุนตั้งฉากกับงาน ยี่ห้อ Cugir รุ่น FU 25 $\times$ 1,000 มม. อัตราป้อนกัด 16–800 มม./นาที ระดับความเร็ว 12 ตำแหน่ง สามารถปรับความเร็วรอบตั้งแต่ 45–2000 รอบ/นาที

3) เครื่องทดสอบความขรุขระพื้นผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 โดยใช้ Cut-off Length และ Scan Length เท่ากับ 2.5 และ 20.0 มม. ตามลำดับ ทำการวัดความขรุขระพื้นผิววัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการกัดหน้าผิวงาน ซึ่งจะบอกค่าละเอียดในหน่วยไมโครเมตร (μm) การใช้งานทุกครั้งจะสอบเทียบกับผิวทดสอบมาตรฐาน และปรับค่าให้ได้ $2.94 \mu\text{m}$ ค่ามาตรฐานในการเทียบ)

2.3 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ทำการทดลองในการกัดผิวหน้าเรียบชิ้นงาน คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนกัตและระยะป้อนลึก ทั้งหมด 3 ระดับ ประกอบด้วย ความเร็วรอบที่ระดับ 250 500 และ 710 รอบ/นาที อัตราป้อนกัตที่ระดับ 125 315 และ 630 มม./นาที และระยะป้อนลึกที่ระดับ 0.50 0.75 และ 1.00 มม. โดยตัวแปรและการกำหนดค่าเหล่านี้ได้จากการทบทวนวรรณกรรม (Literature reviews) เกี่ยวกับการกัดวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นทำการกัดผิวหน้าชิ้นงานตามการออกแบบการทดลอง เพื่อทำการศึกษาคูณภาพผิวงานโดยวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวในการกัด ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ในการกัดชิ้นงานตัวอย่าง

Factors	-1	0	+1
Spindle speed (rev/min)	250	500	710
Feed (mm/min)	125	315	630
Depth of cut (mm)	0.50	0.75	1.00

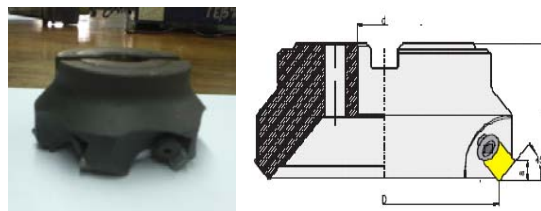


รูปที่ 2 ใบบิดคาร์ไบด์และมุมของคมตัด

สำหรับใบบิดตัดในการทดลอง ใช้ใบบิดคาร์ไบด์สำเร็จรูปที่สามารถถอดเปลี่ยนเม็ดมิดได้ ชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ยี่ห้อ Yamaloy รุ่น SEKR 1203 AFTN เกรด K20 มีความกว้าง 12.7 มม. ความหนา 3.18 มม. มุมรัศมี 14 องศา มุมคายเศษ 15 องศา และมุมหลบ 20 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้ตัวจับมิดกัตเป็นวัสดุคาร์ไบด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 110 มม. จำนวน 6 คมตัด ยี่ห้อ Index-seiki โดยการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางตัวจับมิด ดังสมการที่ (1)

$$d = v1000/n \quad (1)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบบิด (มม.) v คือ ความเร็วตัด (ม./นาที) และ n คือ ความเร็วรอบของมิดกัต (รอบ/นาที)



รูปที่ 3 ใบบิดคาร์ไบด์และมุมของคมตัด

2.4 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะในการกัดผิวหน้าที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวหรือผิวสำเร็จของวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกชนิด PE PP และ PVC ที่มีขายในท้องตลาด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง 2) การออกแบบตำแหน่งและวิธีการวัด และ 3) การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

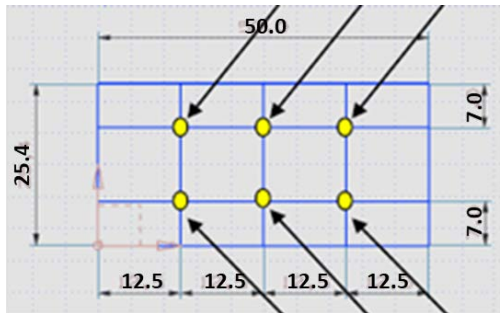
1) การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

ทำการทดลองโดยการใช้โปรแกรม Design Expert (Version 8) เพื่อกำหนดตัวแปรและสภาวะในการทดลอง ซึ่งมีปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนกัต ระยะป้อนลึก และชนิดของพลาสติก โดยออกแบบการทดลองแบบ 3^4 แฟกทอเรียล (3^4 Factorial Design Expert) จะได้สภาวะการทดลองทั้งหมด 81 สภาวะ (Run) จากนั้นทำการสุ่มเลือกมา 1 สภาวะ เพื่อทำการกัดและหาขนาดสิ่งตัวอย่าง

2) การออกแบบตำแหน่งและวิธีการวัด

การวัดค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกใช้เครื่องมือวัด ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 (คานาวะ ประเทศญี่ปุ่น) ตามการออกแบบการทดลองและทำซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไข มีความยาวของการกัดทิศทางตามเข็มนาฬิกาความยาว 5 ซม. โดยแต่ละชิ้นจะทำการวัด 6 ตำแหน่งเพื่อลดความแปรปรวนของการวัด โดยแต่ละตำแหน่งห่างกันจากขอบชิ้นงานด้านแนวยาว 12.50 มม. และจากขอบชิ้นงานด้านแนวขวาง 7 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยวัดค่า

ความขรุขระผิวที่ผ่านการกัดหน้าเรียบด้วยค่าความหยาบของผิว (R_a) เพราะเป็นค่าที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทางอุตสาหกรรมสำหรับวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก



รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งการวัดค่าความขรุขระ

3) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยมีการตั้งข้อสังเกตว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกที่มีพลาสติกเป็นส่วนผสม 3 ชนิด คือ PE PP และ PVC ตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลของผลการทดลองโดยวิเคราะห์คุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการ คือ การตรวจสอบข้อสมมุติทางด้านการกระจายแบบปกติของข้อมูล (Normal probability plot) การทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance stability test) และการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent test) นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) อีกด้วย

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการหาขนาดของสิ่งตัวอย่าง

การวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 1 เป็นการหาขนาดของสิ่งตัวอย่างใช้ค่าสถิติสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) [4],[10],[13] โดยการเก็บข้อมูลค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง ตามเงื่อนไขการทดลอง ประกอบด้วยความเร็วรอบ 250 500 และ 710 รอบต่อนาที อัตราป้อนกัด 125 315 และ 630 มม.ต่อนาที และความลึกในการกัด 0.50 0.75 และ 1.00 มม.โดยเงื่อนไขในการกัดเพื่อกำหนดขนาดสิ่งตัวอย่าง คือ ความเร็วรอบที่ 500 รอบต่อนาที อัตราป้อนกัด 315 มม.ต่อนาที และความ

ลึกในการกัด 0.75 มม. ทำการทดลองในสภาวะการกัดแปดผิวเดียวกัน จำนวน 10 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง ผลการวัดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานเพื่อหาขนาดสิ่งตัวอย่างจากการทดลองเบื้องต้น โดยใช้ Minitab Release 16 ช่วยในการคำนวณค่าทางสถิติ พบว่าจำนวนขนาดสิ่งตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบเท่ากับ 3 และ 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้น จึงเลือกใช้ขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับ 3 ตัวอย่างสำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของ PE และ PVC และขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับ 4 ตัวอย่าง สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของ PP ตามลำดับ

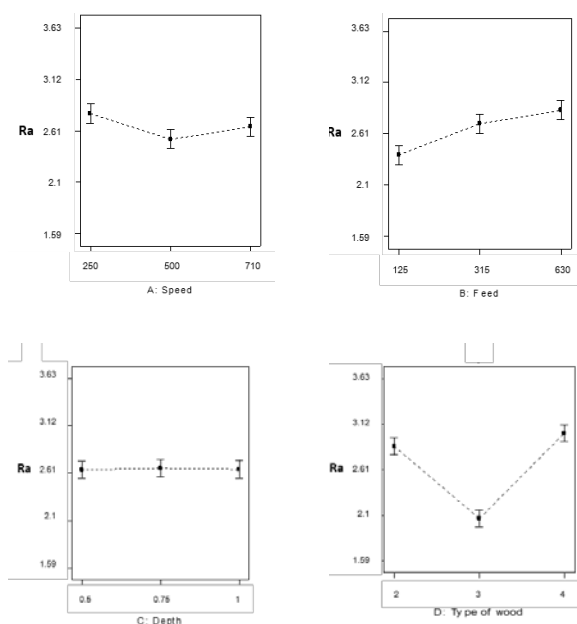
ตารางที่ 2 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบ

Composites	Sample Size	Power
PE	3	0.94615
PVC	3	0.98438
PP	4	0.95870

3.2 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อความขรุขระของผิววัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC

การวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของวัสดุเชิงประกอบ โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล [9] มีปัจจัยในการทดลอง คือ ความเร็วตัด (Speed) อัตราป้อนกัด (Feed) ความลึกในการกัด (Depth of cut) และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ (Type of wood plastic composites) จากนั้น ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยค่าทางสถิติ ซึ่งการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวและปัจจัยหลักของการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อนกัด ความลึกในการกัด และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักของการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อนกัด และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs โดยค่า P -Value เท่ากับ 0.0332 0.0001 และ 0.0001 ตามลำดับ ยกเว้นความลึกในการกัดที่มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก โดยค่า P -Value เท่ากับ 0.9774 ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 5 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5 พบว่า อิทธิพลของปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบ ยกเว้นความลึกของกระบวนการกัด [10] ดังแสดงในตารางที่ 4 การปรับเพิ่มความเร็วรอบจาก 250 รอบ/นาที เป็น 500 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวอยู่ในระดับต่ำสุด และเมื่อมีการปรับความเร็วในการกัดเพิ่มขึ้นเป็น 710 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าสูงขึ้น โดยความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที โดยตั้งข้อสังเกตว่ามีความเหมาะสมมากที่สุดในการกระบวนการกัด นอกจากนี้ เมื่อปรับเพิ่มอัตราป้อนกัดจาก 125 เป็น 630 มม./นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าสูงขึ้น ตามลำดับ สำหรับวัสดุเชิงประกอบต่างชนิดกันให้ค่าความขรุขระผิวที่ต่างกัน โดยพบว่า ค่าความขรุขระผิวที่ต่ำสุดคือ วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของ PP สำหรับความลึกในการกัดจะไม่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระของผิวของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 5 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวสำหรับการกัด WPCs

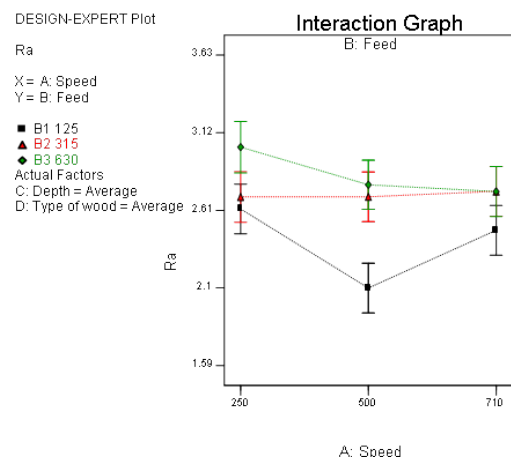
3.3 การศึกษาปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความขรุขระของผิววัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC

การวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความขรุขระของผิวของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของ PE PP และ PVC โดยมีปัจจัยในการทดลอง

คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนกัด ความลึกในการกัด และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยค่าทางสถิติ ซึ่งการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวและปัจจัยร่วมของปัจจัยทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 3

โดยพบว่า ปัจจัยร่วมที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวมีเพียงคู่เดียว คือ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ โดยค่า P -Value เท่ากับ 0.0120 นอกจากนี้ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและอัตราป้อน ความเร็วรอบและความลึกในการกัด อัตราป้อนและความลึกในการกัด อัตราป้อนและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ ความลึกในการกัดและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs โดยค่า P -Value เท่ากับ 0.1390 0.4491 0.4517 0.2281 และ 0.2769 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยผลจากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 6-11 ตามลำดับ

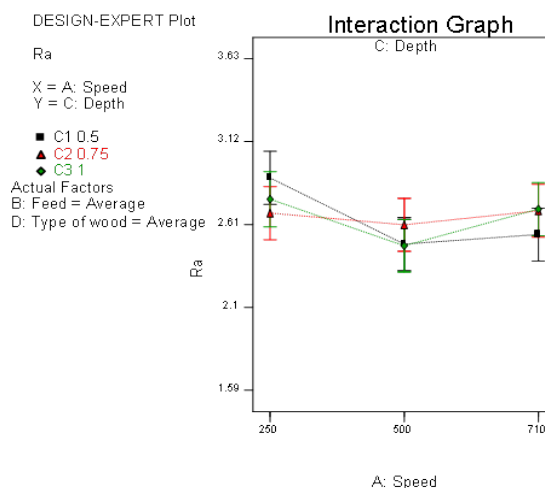
รูปที่ 6 อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและอัตราป้อนกัด โดยผลการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยร่วมดังกล่าวมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) [8],[13] ที่ค่า P -Value เท่ากับ 0.1390 ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยระดับความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที อัตราป้อน 125 มม./นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวมีค่าต่ำสุด เมื่อปรับค่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นที่ 500 และ 710 รอบ/นาที อัตราป้อนกัด 630 มม./นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าสูงสุด



รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและค่าอัตราป้อนต่อค่าความขรุขระของผิวของ WPCs

จากรูปที่ 7 แสดงปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและค่าความลึกในการกัด WPCs จากการศึกษาพบว่า อิทธิพลปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ คือ 250 500 และ 710 และความลึก 0.50 0.75 และ 1.00 มม. มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs ที่ค่า P -Value เท่ากับ 0.4491 ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ที่ระดับความเร็วรอบ 500 รอบ/นาติ และความลึก 1.00 มม. ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าต่ำสุด และเมื่อปรับค่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 500 รอบ/นาติ เป็น 710 รอบ/นาติ และความลึกทั้ง 3 ระดับ ส่งผลให้ค่าความขรุขระของผิวของ WPCs มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับความเร็วรอบ เพิ่มขึ้นจาก 250 รอบ/นาติ เป็น 500 รอบ/นาติ ส่งผลให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวมีค่าลดลง [10],[13]

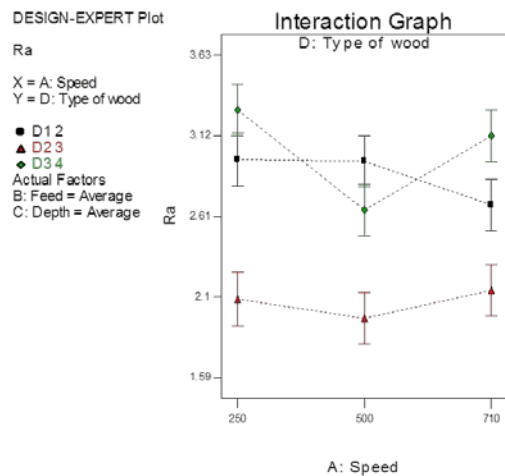


รูปที่ 7 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและ
ค่าความลึกในการกัดต่อค่าความขรุขระของผิวของ WPCs

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว

Analysis of variance table for R _a						
Source Model		Sum of squares	DF	Mean square	F-Value	P-Value
Model		22.12	32	0.69	5.86	0.0001
Speed	S	0.86	2	0.43	3.66	0.0332*
Feed	F	2.81	2	1.40	11.90	0.0001*
Depth of Cut	D	5.380E-003	2	2.690E-003	0.023	0.9774
Type of WPCs	W	13.82	2	6.91	58.64	0.0001*
Speed* Feed	SF	0.86	4	0.22	1.83	0.1390
Speed *Depth	SD	0.44	4	0.11	0.94	0.4491
Speed*Type of WPCs	SFW	1.70	4	0.42	3.61	0.0120*
Feed *Depth	FD	0.44	4	0.11	0.94	0.4517
Feed* Type of WPCs	FW	0.61	4	0.152	1.29	0.2881
Depth* Type of WPCs	DW	0.62	4	0.16	1.32	0.2769
Residual		5.66	48	0.12		
Lack of Fit		4.08	46	0.089	0.11	0.9995
Pure Error		1.58	2	0.79		
Cor Total		27.78	242			
Std. Dev. = 0.34 R-Squared = 0.7963 (79.63%) Adj R-Squared = 0.6605 (66.05%)						

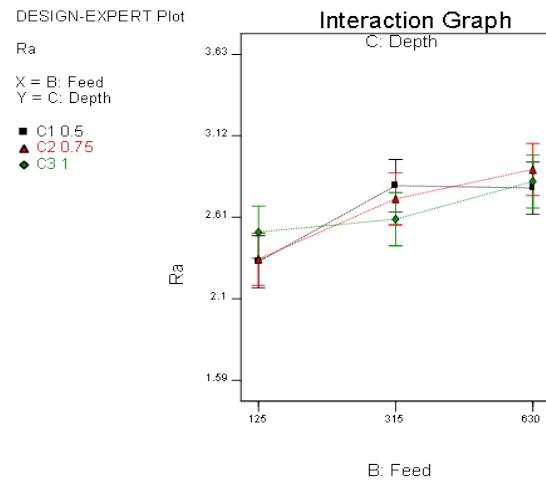
จากรูปที่ 8 แสดงปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ ผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยร่วมที่ประกอบด้วยความเร็วรอบ คือ 250 500 และ 710 รอบ/นาที่ และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs [9] โดยค่า P -Value เท่ากับ 0.0120 โดยที่ระดับความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที่ จะให้ค่าความขรุขระผิวต่ำสุด ในการกัดวัสดุที่มีส่วนประกอบของ PP รองลงมา คือ PVC และ PE ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นจาก 250 รอบ/นาที่ เป็น 710 ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบ PE และ PVC มีค่าลดลง และวัสดุเชิงประกอบ PP มีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างระหว่างความเร็วรอบและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC

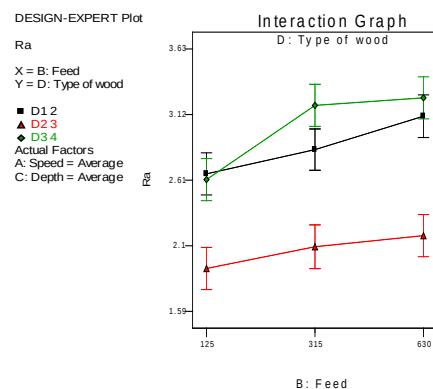
จากรูปที่ 9 แสดงปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อนกัดและความลึกในการกัด ผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยร่วมดังกล่าวมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs ที่ค่า P -Value เท่ากับ 0.4517 โดยกล่าวได้ว่า อัตราป้อนกัด 125 มม./นาที่ ความลึกในการกัดที่ 0.50 มม. ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ เมื่อปรับค่าอัตราป้อนกัดเพิ่มขึ้นที่ 315 มม./นาที่ ที่ความลึกในการกัดทั้ง 3 ระดับ ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของ WPCs มีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับเมื่อปรับค่าอัตราป้อนกัดเพิ่มขึ้นที่ 315 มม./นาที่ เป็น 630 มม./นาที่ ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมี

ค่าที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ระดับความลึกในการกัด 0.05 มม. ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิว มีค่าลดลง ตามลำดับ



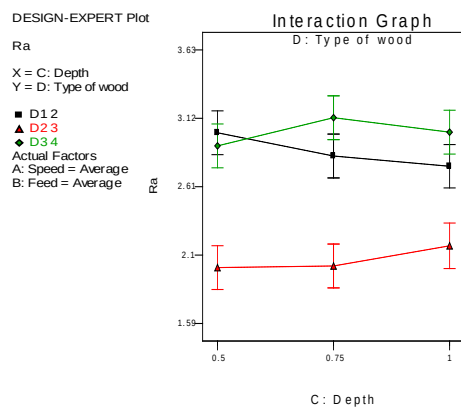
รูปที่ 9 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อนกัดและความลึกในการกัดของ WPCs

จากรูปที่ 10 แสดงปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อนกัดและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC ตามลำดับ ผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยร่วมดังกล่าวมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs ที่ค่า P -Value เท่ากับ 0.2881 พบว่า วัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิด จะให้ค่าความขรุขระผิวที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปรับอัตราป้อนกัดจาก 125 มม./นาที่ เป็น 315 และ 630 มม./นาที่ ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อนกัดและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC

จากรูปที่ 11 แสดงปัจจัยร่วมระหว่างความลึกในการกัด และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยร่วมดังกล่าวมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs ที่ค่า P -Value เท่ากับ 0.2769 โดยมีปัจจัยที่ประกอบด้วยความลึกในการกัด คือ 0.50 0.75 และ 1.00 มม. และวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC สรุปได้ว่า วัสดุเชิงประกอบ PP ที่ระดับความลึกในการกัด 0.50 มม. ให้ค่าความขรุขระผิวที่มีค่าต่ำที่สุด และเมื่อปรับค่าความลึกในการกัดเพิ่มขึ้นเป็น 0.75 และ 1.00 มม. ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งตรงกันข้ามกับวัสดุเชิงประกอบ PE ให้ค่าความขรุขระผิวลดลง เมื่อความลึกในการกัดเพิ่มขึ้น ตามลำดับ



รูปที่ 11 ผลกระทบร่วมของปัจจัยระหว่างความลึกในการกัดและชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC

3.4 อภิปรายผลงานวิจัย

จากผลการทดลองการกัดผิวหน้าของ WPCs โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อนกัด ความลึกในการกัด และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)

ด้วยโปรแกรม Design Expert (Version 8) [4],[10] จำนวน 81 เงื่อนไขและทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยแต่ละ ตัวอย่างจะทำการวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวจำนวน 6 จุด ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ชนิด มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบ ยกเว้นความลึกในการกัดในการกัดที่มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) [10] จากการเปรียบเทียบระหว่างชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC แนวโน้มค่าความขรุขระผิวของ PP อยู่ในระดับต่ำสุดคือ $1.70 \mu\text{m}$. [4],[18] ที่ระดับสภาวะความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที อัตราป้อนกัดที่ 315 มม./นาที และค่าความลึกที่ 0.75 มม. สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของ PE ที่ระดับสภาวะความเร็วรอบที่ 710 รอบ/นาที อัตราป้อนกัดที่ 125 มม./นาที และค่าความลึกที่ 1.00 มม. ให้ค่าความขรุขระผิว $2.64 \mu\text{m}$. และวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของ PVC ที่ระดับสภาวะความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที อัตราป้อนกัดที่ 125 มม./นาที และค่าความลึกที่ 0.5 มม. ให้ค่าความขรุขระผิว $1.78 \mu\text{m}$. แสดงดังตารางที่ 4 นอกจากนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว คือ ประเภทของพลาสติกที่เป็นส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิด โดยที่วัสดุเชิงประกอบ PP ให้ค่าความขรุขระผิวต่ำสุด [9],[18] รองลงมา คือ วัสดุวัสดุเชิงประกอบ PVC และ PE ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ต่างกันนี้จะขึ้นอยู่กับสองปัจจัยหลัก คือ คุณสมบัติเฉพาะตัวของพลาสติก เช่น อัตราการไหล ความหนาแน่น อุณหภูมิหลอมเหลว และความเข้ากันได้กับวัสดุเสริมแรง และวิธีการของการออกแบบการทดลอง โดยกำหนดความเร็วรอบ อัตราป้อนกัด และระยะป้อนลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่ต่างกันของพลาสติก อาทิเช่น PE อุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงกว่า PP และ PVC ดังนั้น ความเร็วรอบในการกัด PE จึงมีค่าที่สูงกว่า PP และ PVC เป็นต้น

ตารางที่ 4 การตั้งข้อสังเกตสภาวะที่เหมาะสมโดยมีค่าความขรุขระผิวที่ต่ำที่สุดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC

Composites	Spindle speed (rev/min)	Feed (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Surface Roughness (μm)	SD.
PE	710	125	1.00	2.64	0.17
PP	500	315	0.75	1.70	0.21
PVC	500	125	0.50	1.78	0.18

4. สรุปผล

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยและการหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบ และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ชนิด มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบ ยกเว้นความลึกในการกัดในการกัด สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยร่วมของการทดลอง พบว่า อิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบมากที่สุด คือ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ คือ 250 500 และ 710 รอบ/นาที และชนิดของวัสดุเชิงประกอบ PE PP และ PVC นอกจากนี้ หากต้องการเปรียบเทียบระหว่างชนิดของพลาสติกที่เป็นส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ สามารถตั้งข้อสังเกตว่า สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกัดระหว่างวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิดมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวของพลาสติกและอัตราส่วนของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งการศึกษาสภาวะการกัดที่เหมาะสมของการวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการขึ้นรูป โครงสร้าง และกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีรูปทรงที่หลากหลายและซับซ้อน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีไม้ยางพาราและการจัดการ (Rubberwood Technology and Management Research Group) และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ เครื่องจักรและสถานที่ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Chaharmahali, M. Tajvidi and S. K. Najafi, "Mechanical properties of wood plastic composite panels made from waste fiberboard and particleboard," *Polymer Composites*, vol. 10, no 3, pp. 606- 610, 2008. doi: 10.1002/pc.20434.

[2] S. Tamrakar and R. A. Lopez-Anido, "Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 10, pp. 3977–3988, 2011. doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2011.04.031.

[3] S. Sriarkarin, S. Suksard, W. Hoamuangkaew, and S. Jarusombuti, "Marketing of wood plastic composite products in Thailand," *Thai Journal of Forestry*, vol 31, no 1, pp. 46–54, 2022.

[4] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglu, "Response surface optimization and statistical analysis of composites made from calcium carbonate filler-added recycled polypropylene and rubberwood fiber," *Journal of Thermoplastic Composites Material*, vol 35, no 3, pp. 391–415, 2022, doi: 10.1177/0892705719889988.

[5] N. Ayilimis, U. Buyuksari and T. Dundar, "Waste pine cones as a source of reinforcing fillers for thermoplastic composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 117, no. 4, pp. 2324–2330, 2010, doi: 10.1002/app.32076.

[6] R. Z. Huang, B. J. Kim, S. Lee, Z. Yang and Q. L. Wu, "Co-extruded wood-plastic composites with talc-filled shells: morphology, mechanical, and thermal expansion performance," *BioResources*, vol. 8, no. 2, pp. 2283–2299, 2013, doi: 10.15376/biores. 8.2.2283-2299.

[7] S. Rimdusit, W. Smittakorn, S. Jittarom and S. Tiptipakorn, "Highly filled polypropylene rubber wood flour composites," *Engineering Journal*, vol 15, no. 2, pp. 17–30, 2011, doi: 10.4186/ej.2011.15.2.17.

[8] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, "Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design," *KKU Research Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 780–793, 2014.

[9] T. Ratanawilaia, P. Pitsuwan, S. Jirasampata and C. Homkhiew, "Influence of Milling Factors on Surface

- Finish of Wood-Plastic Composites,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 32, pp. 43–48, 2015.
- [10] C. Srivabut, S. Rawangwong, C. Homkhiew and J. Rodjananugoon, “Optimal condition on surface roughness in side milling of high-density polyethylene and rubberwood flour composites using response surface methodology,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol 39, no 1, pp. 23–34, 2022.
- [11] E. O. Olakanmi, E. A. Ogunesan, E. Vunain, R. A. Lafia-Araga, M. Doyoyo and R. Meijboom, “Mechanism of fiber/matrix bond and properties of wood polymer composites produced from alkaline-treated daniella oliveri wood flour,” *Journal of Polymer Composites*, vol. 37, no.9, pp. 2657–2672, 2016, doi: 10.1002/pc.23460
- [12] C. Srivabut, C. Homkhiew and S. Rawangwong, “Optimal composition on surface roughness of wood-plastic composites using mixture design and response surface methodology,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol 38, no 4, pp. 151–165, 2021.
- [13] J. Lamaming, R. Hashim, O. Sulaiman, T. Sugimoto, M. Sato and S. Hiziroglu, “Measurement of some properties of binderless particleboards made from young and old oil palm trunks,” *Measurement*, vol 47, pp. 813–819, 2014. doi: 10.1016/j.measurement.2013.10.007
- [14] C. Srivabut, A. T. Kamnerdwam, C. Homkhiew, S. Rawangwong and T. Ratanawilai, “Response Surface Optimization on Flexural Properties of Wood-Plastic Composites for Structure Materials Exposed to High Moisture Content,” *The Journal of Industrial Technology*, vol 18, no 1, pp. 1–20, 2022, doi: 10.14416/j.ind.tech.2022.02.001
- [15] S. Rawangwong and J. Chatthong, “The study favorable conditions for the cutting text on Para wood by computer numerical controlled milling”, in *16th IE Network Conference*, Phuket, Thailand, Oct. 24–26, 2007, pp. 121–129.
- [16] Z. Hutyrova, J. Zajac, P. Michalik, D. Mital, J. Duplak and S. Gajdos, “Study of surface roughness of machined polymer composite material,” *International Journal of Polymer Science*, vol. 1, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1155/2015/303517
- [17] C. Tasdemir, I. H. Basboga and S. Hizirogiu, “Surface Quality of wood plastic composites as function of water exposure,” *Applied Sciences*, vol. 10, pp.156–167, 2020. doi: 10.3390/app10155122
- [18] Wechsler and S. Hiziroglu, “Some of the properties of wood-plastic composites,” *Building and Environment*, vol. 42, pp.2637–2644, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.018

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความสำหรับวิศวสารลาดกระบัง

การเตรียมต้นฉบับบทความ

กองบรรณาธิการวิศวสารลาดกระบังได้แบ่งประเภทของบทความเป็น 2 ประเภท ได้แก่ บทความทางวิชาการ และบทความวิจัย และได้ให้คำนิยามดังนี้

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ ได้แก่ มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

ผู้แต่งบทความควรเขียนบทความอยู่ระหว่าง 8-14 หน้ากระดาษขนาด A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวสารลาดกระบัง ทั้งนี้บทความต้นฉบับต้องได้รับการอนุมัติยืนยันจากผู้แต่งร่วมทุกคน และไม่อยู่ในระหว่างการศึกษาหรือตีพิมพ์ในวารสารวิชาการอื่น ๆ ให้ผู้แต่งส่ง (1) บทความพร้อมกับ (2) จดหมายนำ (Cover Letter) ที่ระบุ

- ขอบเขต ของบทความว่าสอดคล้องกับขอบเขตของวารสารในหัวข้อใด
- ความสำคัญของหัวข้อบทความหรือปัญหาทางจริง
- ปัญหางานวิจัยหรือช่องว่างขององค์ความรู้
- ผลงานวิจัยที่ได้มีความแตกต่างหรือดีกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้อย่างไร
- คุณค่าของงานวิจัยที่มีต่อวงวิชาการหรือวิจัย หรือต่ออุตสาหกรรมอย่างไร

บทความจะถูกพิจารณาโดยคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่านจากหลากหลายสถาบัน และส่งต้นฉบับบทความในรูปแบบของไฟล์ .doc (Microsoft Word version 2010) และไฟล์ .pdf สามารถส่งบทความได้ในรูปแบบออนไลน์ผ่านทางเว็บไซต์ของวารสารลาดกระบัง <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej> บทความในวารสารลาดกระบังสามารถตีพิมพ์ได้ฟรี ไม่เสียค่าใช้จ่าย ทั้งในรูปแบบออนไลน์และแบบตีพิมพ์เป็นเล่มวารสาร

1. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

1.1. คำแนะนำทั่วไป

บทความต้องมีความยาวประมาณ 8-14 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน การตั้งค่าน้ำกระดาษ ให้ระยะหน้ากระดาษ (Margin) ทั้ง 4 ด้านด้วย ระยะ 1 นิ้ว หรือ 2.54 ซม. บทความมี 2 ส่วน ส่วนแรกกำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดียว และส่วนที่สองกำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26” หรือ 0.7 ซม. การลำดับหัวข้อของเนื้อเรื่องให้ใช้เลขกำกับบทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลขระบบบทสนิยกำกับหัวข้อย่อย และสามารถดาวน์โหลดรายละเอียดได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>

1.2. แบบและขนาดตัวอักษร ใช้ตัวอักษรแบบ Angsana New ขนาด 14 point ทั้งบทความทั้งบทความภาษาไทย และบทความภาษาอังกฤษ

2. การเรียงลำดับเนื้อหาบทความ สำหรับบทความภาษาไทย

2.1 ชื่อเรื่อง (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำอย่างชัดเจน

ตัวอย่างชื่อเรื่อง

ชื่อเรื่องภาษาไทยใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 20 พอยท์ ตัวหนา จัดกึ่งกลาง

Title in English use Angsana New Size 20 Point, Bold, Center, the First Alphabet in Each Word is Uppercase

2.2 ชื่อ-นามสกุลของผู้เขียนใส่ทุกคน เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุสถานที่ทำงาน สำหรับผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author) ขนาด 14 พอยท์

ตัวอย่างชื่อ-นามสกุลผู้แต่ง

ชื่อผู้แต่ง นามสกุล¹, ชื่อผู้แต่ง นามสกุล² และ ชื่อผู้แต่ง นามสกุล^{2,*}

¹ สังกัดภาควิชา, คณะ, มหาวิทยาลัย ชื่อตำบล ชื่ออำเภอ ชื่อจังหวัด รหัสไปรษณีย์

² สังกัดหน่วยงาน, บริษัท ชื่อตำบล ชื่ออำเภอ ชื่อจังหวัด รหัสไปรษณีย์

First name Lastname¹, First name Lastname² and First name Lastname^{2,*}

¹ Affiliation Department, Faculty, University, Subdistrict, City, State, Postcode, Country

² Affiliation Department, Company, Subdistrict, City, State, Postcode, Country

***Corresponding Author E-mail:** author_email@email.com

2.3 บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นเนื้อความสรุปสาระสำคัญของเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และผลสรุป มี 1 ย่อหน้า จำนวนคำประมาณไม่เกิน 300 คำ

2.4 คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้ใส่คำสำคัญ 3–5 คำ ไว้ท้ายบทคัดย่อแต่ละภาษา

2.5 เนื้อหา (Text) บทความวิจัยควรประกอบด้วย

- บทนำ (Introduction) บอกความสำคัญหรือ ที่มาของปัญหาที่นำไปสู่การศึกษา วัตถุประสงค์ และอาจรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)
- วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods) กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์และทดลองที่กระชับและชัดเจน
- ผลการทดลอง (Results) บอกผลที่พบอย่างชัดเจน สมบูรณ์ และมีรายละเอียดครบถ้วน
- อภิปรายผลและสรุป (Discussion and Conclusion) อาจเขียนรวมกับผลการทดลองได้ เป็นการประเมินการตีความและการวิเคราะห์ในแง่มุมต่างๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้อง หรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร

ต้องมีการอ้างหลักการหรือทฤษฎีมาสนับสนุน หรือหักล้างอย่างเป็นเหตุเป็นผลและ
อาจมีข้อเสนอแนะที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

2.6 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) (ถ้ามี) ระบุสั้นๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุน
วิจัย หรือได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานใด

2.7 เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลขในวงเล็บก้ามปู[1] เอกสารอ้างอิง
ท้ายบททุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงในบทความ และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลัก
วิชาการตามรูปแบบของ IEEE ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบดังต่อไปนี้

กรณีเป็นหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

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

ตัวอย่าง

- [1] R. E. Blahut, *Theory and Practice of Error Control Codes*, Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1983.
- [2] I.A. Glover and P.M. Grant, *Digital Communications*, 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2009.
- [3] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [4] Westinghouse Electric Corporation (Staff of Technology and Science, Aerospace Div.), *Integrated Electronic Systems*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1970.
- [5] T.M. Lillis and J. Swann, "Giving feedback on student writing," in *Teaching academic writing: a toolkit for higher education*, C. Coffin, Eds. London: Routledge, 2003, pp. 101-129.

กรณีเป็นหนังสือ E-Book

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher, State,
Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx. [Online]. Available: <http://www.web.com>

ตัวอย่าง

- [1] G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics,” in *Plastics, vol. 3, Polymers of Hexadromicon*, J. Peters, Ed., 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64. [Online]. Available: <http://www.bookref.com>.
- [2] *The Terahertz Wave eBook*. ZOmega Terahertz Corp., 2014. [Online]. Available: http://dl.z-thz.com/eBook/zomega_ebook_pdf_1206_sr.pdf. Accessed: May 19, 2014.
- [3] P. B. Kurland and R. Lerner, Eds., *The Founders’ Constitution*. Chicago, IL, USA: Univ. of Chicago Press, 1987. [Online]. Available: <http://press-pubs.uchicago.edu/founders/> Accessed: Feb. 28, 2010.

กรณีเป็นหนังสือแปล

รูปแบบพื้นฐาน

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

ตัวอย่าง

- [1] K. Ichiro, *Thai Economy and Railway 1885–1935*, Tokyo: Nihon Keizai Hyoronsha (in Japanese), 2000.
- [2] M. Gorkii, “Optimal design,” *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, vol. 12, pp. 111–122, 1961 (Transl.: in L. Pontryagin, Ed., *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. New York, NY, USA: Interscience, 1962, ch. 2, sec. 3, pp. 127–135).

กรณีเป็นส่วนหนึ่งของหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] T. Ogura, “Electronic government and surveillance-oriented society,” in *Theorizing Surveillance: The Panopticon and Beyond*. Cullompton, U.K.: Willan, 2006, ch. 13, pp. 270–295.
- [2] L. Li, J. Yang, and C. Li, “Super-resolution restoration and image reconstruction for passive millimeter wave imaging,” in *Image Restoration—Recent Advances and Applications*, A. Histace, Ed., Rijeka, Croatia: InTech, 2012, pp. 25–45.
- [3] หนังสือ With Editor
- [4] C. Bennett, “What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post 9/11,” in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.

กรณีหนังสือที่มีบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, pp. xxx–xxx.

X. Editor, Ed. *Title of Published Book*. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year.

ตัวอย่าง

- [1] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed., New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55–70.
- [2] C. Bennett, "What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post9/11," in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.
- [3] W. R. Leonard and M. H. Crawford, Eds. *Human Biology of Pastoral Populations*. New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2002.

กรณีเป็นหนังสือมี Series

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, X. Editor, Ed., xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Taflov, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* in Computational Electrodynamics II, vol. 3, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 1996.
- [2] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, Eds., San Francisco, CA, USA: Academic, 1977, pp. 47–160.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," presented at the Abbreviated Name of Conf., City of Conf., Abbrev. State, Country, Month and day(s), year, Paper number.

ตัวอย่าง

- [1] J. G. Kreifeldt, "An analysis of surface-detected EMG as an amplitude-modulated noise," presented at the 1989 Int. Conf. Medicine and Biological Engineering, Chicago, IL, USA, Nov. 9–12, 1989.

- [2] G. W. Juette and L. E. Zeffanella, "Radio noise currents on short sections on bundle conductors," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Dallas, TX, USA, Jun. 22–27, 1990, Paper 90 SM 690-0 PWRS.
- [3] J. Arrillaga and B. Giessner, "Limitation of short-circuit levels by means of HVDC links," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles, CA, USA, Jul. 12–17, 1990, Paper 70 CP 637.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่กำลังจะตีพิมพ์ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), (Month and day(s) if provided) year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] W. D. Doyle, "Magnetization reversal in films with biaxial anisotropy," in *1987 Proc. INTERMAG Conf.*, pp. 2.2- 1–2.2-6.
- [2] C. T. Meadow and D. W. Waugh, "Computer assisted interrogation," in *1991 Fall Joint Computer Conf., Proc. AFIPS Conf.*, vol. 29. Washington, DC, USA: Spartan, 1991, pp. 381–394.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่มีเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), year, pp. xxx–xxx, doi: xxx.

ตัวอย่าง

- [1] J. Zhao, G. Sun, G. H. Loh, and Y. Xie, "Energy-efficient GPU design with reconfigurable in-package graphics II. Style—7 memory," in *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. Low Power Electron. Design (ISLPED)*, Jul. 2012, pp. 403–408, doi: 10.1145/2333660.2333752.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมสถานที่

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City, State, Country, year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] L. S. Carmichael, N. Ghani, P. K. Rajan, K. O'Donoghue, and R. Holt, "Characterization and comparison of modern layer-2 Ethernet survivability protocols," in *Proc. 37th Southeastern Symp. Syst. Theory (SSST 2005)*, Tuskegee, AL, USA, Mar. 20–22, 2005, pp. 124–129

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมบรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, X. Editor, Ed. (location of conference is optional), year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมหัวข้อต่อเนื่อง ฉบับ และ บรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.* in Volume Title, in Series Title, ed., year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author. (Date). Title. Presented at Abbreviated Conf. title. [Type of Medium]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] V. Chandrasekaran, S. Sanghavi, P. A. Parrilo, and A. S. Willsky. (2009). Sparse and low-rank matrix decompositions. Presented at IFAC 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016388632>

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date, doi: xxx.

Title, Source, Date, doi: URL.

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: 10.3886/ICPSR30122.v2.
- [2] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.3886/ICPSR30122.v2>.

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงผ่านเว็บไซต์

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013. [Online]. Available: <http://www.icpsr.umich.edu/icpsrweb/SAMHDA/studies/30122/version/2>

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(รูปเล่ม)

รูปแบบพื้นฐาน

Name of Manual/Handbook, x ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] *Transmission Systems for Communications*, 3rd ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, USA, 1985, pp. 44-60.

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(ออนไลน์)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author (or Abbrev. Name of Co., City of Co. Abbrev. State, Country). Name of Manual/Handbook, x ed. (year). Accessed: Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] L. Breiman. *Manual on Setting Up, Using, and Understanding Random Forests v4.0*. (2003). Accessed: Apr. 16, 2014. [Online]. Available: http://oz.berkeley.edu/users/breiman/Using_random_forests_v4.0.pdf
- [2] M. Kuhn. *The Caret Package*. (2012). [Online]. Available: <http://cranrproject.org/web/packages/caret/caret.pdf>

- [3] *Antenna Products*. (2011). Antcom. Accessed: Feb. 12, 2014. [Online]. Available: <http://www.antcom.com/documents/catalogs/L1L2GPSAntennas.pdf>

กรณีเป็นรายงานรูปเล่ม

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of report," Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, Rep. xxx, year.

ตัวอย่าง

- [1] K. E. Elliott and C. M. Greene, "A local adaptive protocol," Argonne National Laboratory, Argonne, France, Tech. Report. 916-1010-BB, 7 Apr. 2007.
- [2] J. H. Davis and J. R. Cogdell, "Calibration program for the 16-foot antenna," Elect. Eng. Res. Lab., Univ. Texas, Austin, Tech. Memo. NGL-006-69-3, Nov. 15, 1987.

กรณีเป็นรายงานออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of report," Company, City, State, Country, Rep. no., (optional: vol./issue), Date. Accessed: Date. [Online]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] Bureau of Meteorology, "Bureau of Meteorology: Measuring Rainfall in Australia," 2009. [Online]. Available: <http://www.bom.gov.au/climate/cdo/about/definitionsrain.shtml#meanrainfall>

กรณีเป็นวิทยานิพนธ์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง

- [1] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, USA, 1993.
- [2] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

กรณีเป็นวิทยานิพนธ์ออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, Country, year. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] D. Schwartz, "Development of a computationally efficient full human body finite element model," M.S. thesis, Virginia Tech – Wake Forest Univ. School of Biomed. Eng. Sci., Winston-Salem, NC, USA, 2015. [Online]. Available: https://wakespace.lib.wfu.edu/bitstream/handle/10339/57119/Schwartz_wfu_0248M_10697.pdf

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการ

รูปแบบพื้นฐาน

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

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

ตัวอย่าง

- [1] M. F. Elias, "The Relation of Drive to Finger-Withdrawal Conditioning," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 70, no. 2, p. 114, 1965.
- [2] J. Attapangittaya, "Social studies in gibberish," *Quarterly Review of Doublespeak*, vol. 20, no. 1, pp. 9-10, 2003.
- [3] J. Fallows, "Networking technology," *Atlantic Monthly*, Jul., pp. 34-36, 2007.
- [4] B. Metcalfe, "The numbers show how slowly the Internet runs today," *Infoworld*, 30 Sep., p. 34, 2006.
- [5] E. Aynoi, N. Nanthakusol, R. Jeenawong, C. Phongcharoenpanich and S. Kawdungta, "Vertical Beam Adjustable Antenna for Internet of Things Applications," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 38, No. 2, pp. 7-12, 2021.
- [6] T. Brunswiler et al., "Formulation of percolating thermal underfills using hierarchical self-assembly of microparticles and nanoparticles by centrifugal forces and capillary bridging," *J. Microelectron. Electron. Packag.*, vol. 9, no. 4, pp. 149-159, 2012, doi: 10.4071/imaps.357.

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการที่มีรหัสบทความ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, Abbrev. month, year, Art. no. xxx.

J. K. Author, "Name of paper," (in Language), *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, Abbrev. month, year, Art. no. xxx.

ตัวอย่าง

- [1] L. Kuang et al., "A numerical method for analyzing electromagnetic scattering properties of a moving conducting object," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2014, 2014, Art. no. 386315, doi: 10.1155/2014/386315.
- [2] E. P. Wigner, "On a modification of the Rayleigh-Schrodinger perturbation theory," (in German), *Math. Naturwiss. Anz. Ungar. Akad. Wiss.*, vol. 53, p. 475, 1935.

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year. Accessed: Month, Day, Year, doi: 10.1109.XXX.123456. [Online]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] W. P. Risk, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Fiber-optic frequency shifter using a surface acoustic wave incident at an oblique angle," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 115-117, Feb. 1986. [Online]. Available: <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-11-2-115>
- [2] P. Kopyt et al., "Electric properties of graphene-based conductive layers from DC up to terahertz range," *IEEE THz Sci. Technol.*, to be published, doi: 10.1109/TTHZ.2016.2544142.

กรณีเป็นสิทธิบัตร

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

J. K. Author, "Title of patent," Country Patent xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง

- [1] K. Kimura and A. Lipeles, "Fuzzy controller component," U. S. Patent 14860040, Dec, 14, 2006.

กรณีเป็นการสืบค้นจากเว็บไซต์

รูปแบบพื้นฐาน

First Name Initial(s) Last Name. "Page Title." Website Title. Web Address (retrieved Date Accessed).

ตัวอย่าง

- [1] J. Gerald, "Sega Ends Production of Dreamcast," vnunet.com. <http://nli.vnunet.com/news/1116995>. (Accessed Sept.12, 2007).
- [2] J. Smith and J. Doe. "Obama inaugurated as President." CNN.com. http://www.cnn.com/POLITICS/01/21/obama_inaugurated/index.html (Accessed Feb. 1, 2009).

2.8 ภาคผนวก (ถ้ามี)

ภาคผนวกเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาที่ใช้สำหรับการรวบรวมข้อมูล หรือผลการศึกษารอง ที่จะช่วยรับรองหลักการ หรือผลการศึกษาหลัก ควรมีการอ้างอิงภายในเนื้อหามายังภาคผนวก เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ง่าย ผู้แต่งสามารถแบ่งภาคผนวกออกเป็นหลาย ๆ ส่วนได้ เช่น ภาคผนวก 1 แสดงถึงการรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจ ภาคผนวก 2 แสดง การรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐและเอกชน เป็นต้น

2.9 ตารางและรูป และสมการ

การแทรกตารางและรูป และสมการ ต้องมีความคมชัดไม่น้อยกว่า 300 dpi ให้แทรกไว้ในเนื้อหาบทความ มีคำอธิบายประกอบสั้นๆ ที่สามารถสื่อความหมายได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ

กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง

กรณีที่เป็นรูปให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า“รูปที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูป กรณีที่มีรูปหลายรูปที่จะแสดงในครั้งเดียว ให้แบ่งรูปภาพด้วยตัวอักษร (ก), (ข), (ค) สำหรับบทความภาษาไทย และ ตัวอักษร (a), (b), (c) สำหรับบทความภาษาอังกฤษ

กรณีเป็นการแทรกสมการ ให้ระบุลำดับที่ของสมการไว้ทางด้านขวาของสมการภายในวงเล็บ เช่น (1) และการอ้างอิงในเนื้อหา ให้ใช้คำว่า สมการที่ (1)

3. เกณฑ์การพิจารณาบทความ

เกณฑ์การพิจารณาบทความสำหรับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังมีดังนี้ เนื้อหาของบทความมีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ เนื้อหา มีความสมบูรณ์ และ

โครงสร้างภาษาที่ใช้มีความชัดเจน ถูกต้องตามหลักทางวิชาการ ทั้งสมมุติฐาน / วัตถุประสงค์ การนำเสนอมีความชัดเจนกระชับ และการจัดรูปแบบของบทความ การอภิปรายผล และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ

บทความจะต้องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชานั้นๆ อย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งกองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และสงวนสิทธิ์ในการตัดสินใจพิมพ์หรือไม่ก็ได้ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยส่งเป็นไฟล์งาน .pdf และ .doc เป็น Word 2010

4. วิธีการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารลาดกระบัง

บทความที่ส่ง เปิดรับทั้งจากบุคคลภายใน และภายนอกสถาบันฯ โดยบทความนั้น ต้องมีความยาวไม่เกิน 14 หน้า 2 คอลัมน์ ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 15 หน้า และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ผ่านทางเว็บไซต์ของวารสารลาดกระบังได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

ผู้ประสานงานและสถานที่ติดต่อ:

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

งานวิจัยและนวัตกรรม (ส่วนวารสารลาดกระบัง)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร 6 ชั้น (ตึก A) ชั้น 2 เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

หมายเลขติดต่อ :

โทรศัพท์(เบอร์กลาง) 02-329-8301 ต่อ 207

โทรศัพท์สายตรง/โทรสาร : 02-329-8301 ต่อ 207

โทรศัพท์มือถือ 086-106-4414

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ และ E-mail:)

1. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

2. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

3. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ (ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้)

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

เบอร์โทรศัพท์.....E-mail.....

ข้าพเจ้าได้แนบบทความที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ตามคำแนะนำรูปแบบการเขียนบทความมาพร้อมนี้ และรับรองว่า

☐ ได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความครั้งนี้จากผู้ร่วมเขียนบทความแล้ว (ถ้ามี) และไม่มี ความขัดแย้งระหว่างผู้ร่วมเขียนบทความ

☐ ข้าพเจ้า และผู้ร่วมเขียนบทความ (ถ้ามี) จะรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี

☐ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ไม่เคยตีพิมพ์ หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น ข้าพเจ้าได้แนบบทความ ซึ่งข้อความหรือผลงานในบทความนี้ ได้คัดลอกหรือดัดแปลงมาจากเอกสารหรือรายงานอื่น หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ใช่ คัดลอกหรือดัดแปลงมาจาก.....

และถ้าใช่ได้มีการอ้างอิงถึงเอกสารหรือรายงานดังกล่าวในบทความหรือไม่

☐ อ้างอิง ☐ ไม่อ้างอิง เพราะ.....

บทความนี้ได้รับเงินสนับสนุนการทำงานงานวิจัยจากหน่วยงานใด หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ได้รับการสนับสนุน จากแหล่งทุน.....เลขที่สัญญา.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าคำตอบข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

(ลงชื่อ).....(ผู้ส่งบทความ)

เอกสารประกอบการส่งบทความ

1. แบบฟอร์มการส่งบทความนี้ พร้อมระบุรายชื่อนามผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 3 ท่าน

2. บทความต้นฉบับจำนวน 1 ชุด (Ms Word)

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งสามารถประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 3 ท่าน โดยระบุชื่อ-นามสกุล ตำแหน่งทางวิชาการ, E-mail และเบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้)

1. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....
สถานที่ทำงาน.....
2. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....
สถานที่ทำงาน.....
3. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....
สถานที่ทำงาน.....

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMUTL).

The objectives are to:

1. publish high quality research papers in the field of engineering and technology at national and international levels
2. disseminate research works and development in the field of engineering and technology
3. be a medium of exchanging research works and new body of knowledge in the field of engineering and technology among students, researchers, lecturers, and interested persons
4. be an archive of research reports and articles that are interesting and valuable in the field of engineering and technology.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Manuscripts can be written in either Thai or English, complying with the journal format, which are ready to be submitted in camera ready form. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts using Microsoft Word for windows. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

1. Introduction
2. Theory
3. Construction and experimental procedures
4. Experimental results and discussions
5. Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, vol.30, no.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltes, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol.39, no.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

Submission:

Manuscripts from inside and outside King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang can be submitted to the journal. The first page of the manuscript contains the authors' names and complete affiliations. Please duplicate the first page of the manuscript with the names and affiliations made anonymous. The manuscript length is between 8-14 pages of A4. The manuscript that exceeds the length limitation may not be considered for publication depending on the editorial judgment. Please also clearly fill out name-surname, address, phone number, and e-mail address in the submission form. Authors can submit their manuscripts online via the journal system at the url: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>.

Published by:

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel: (662) 329-8301 Ext. 207

Fax: (662) 329-8301 Ext. 207

Advisors:

Dean School of Engineering

Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai

Editor-in-chief:

Prof.Dr.Uma Seeboonruang

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Jakrapong Pongpeng

Assistant Editor:

Dr.Pinit Tanachaichoksirikun

Section Editor:

Prof.Dr.Pongjet Promvonge

Prof.Dr.Pornchai Supnithi

Assoc.Prof.Dr.Jaruwat Charoensuk

Assoc.Prof.Dr.norasage Pattanadet

Assoc.Prof.Dr.Ravipat Lapcharoensuk

Asst.Prof.Dr. kittiwat Sirikasemsuk

Editorial Staff:

Miss.Chanunchida Nobnom

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork

Mr.Virun Chulkaivalsucharit

Proofreading and Photo Books

Mr.Thanongsak Chaichuensaen

Cover Design



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 40 Number 1

March 2023

Research Papers

1. Potential use of Recycled Plastic Bags in Rotational Molding Process 1
J. Preedawat S. Mathurosemontria E. Jansri and N. O-Charoen
2. Applying Lean Concept and Software Packages to Support Critical Issue Monitoring Process in Office 10
P. Kittipanya-ngam A. Chanthavutti and K. Sirikasemsuk
3. Application of Teaching-learning-based optimization for design of composite floor system 27
S. Ansanan A. Tapao and R. Cheerarot
4. Multi-Product-Group Production Planning and Multi-Skill Labor Assignment by Integer Linear Programming Model: A Case Study of an Automotive Electrical Cable Manufacturer 40
W. Nunkaew M. Kimaporn and C. Singkum
5. Removal Performance of Phosphate and Natural Organic Matter Using Nanofiltration Membrane 57
A. Onsarn S. Mattaraj W. Dechapanya K. Ratanapongleka T. Rattanaweeran
And S. Sanongraj
6. Solvent Selection for Mitragynine Extraction by Hansen Solubility Parameter 72
S. Ditthapornset N. Lerkkasemsan and S. Areerat
7. Forecasting Monthly Export Volume of Frozen White Shrimp with Hybrid Model of Holt and Support Vector Regression Emphasizing on Systematic Error Reduction 85
T. Sujjaviriyasup
8. Hybrid Coronavirus Herd Immunity Optimizer with Whale Optimization Algorithm for Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows 98
S. Yodwangjai and K. Malampong
9. Study on Thermal Performance Enhancement in Rectangular Duct Heat Exchanger Installed with Staggered Baffle 115
S. Skullong S. Suwannapan and P. Hoonpong
10. An Improvement of Tubular-Ice Making Machine Coefficient of Performance with a Commercial Water Chiller 126
P. Yartprom and A. Chinsuwan
11. Optimum Design of Reinforced Concrete Stairs Using Hill Climbing Algorithm 139
K. Bannasarn and A. Lamom
12. Suitable Condition for Face Milling of Wood-Plastic Composite Products on Surface Roughness 153
T. Ratanawilai S. Jeenapong and C. Srivabut