



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 39 ฉบับที่ 4

ธันวาคม 2565

บทความวิชาการ

1. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเสียชีวิตการจราจรทางถนนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร: กรณีการเปรียบเทียบสถานการณ์ในช่วงก่อนและหลังการเกิดการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019
พุทธิชา พรชัยพานิช และ จารุวิสิทธิ์ ปราบณศักดิ์ 1

บทความวิจัย

2. ผลของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสจากก้านกะหล่ำดอกต่อการกำจัดไดโคพอล
วรรณิกา ชัยประสพผล โสภิตา ดวงจันทร์ สุพัฒน์พงษ์ มัตราช วิภาดา เดชะปัญญา
เทียมมะณีย์ รัตนวีระพันธ์ สมภาพ สอนงราชฤทธิ์ และ กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา 13
3. อิทธิพลของพารามิเตอร์ในการกักต่อน้ำความชื้นของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้โดย
ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออฟติมอล
ชัยณรงค์ ศรีระบุตร สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และ ชาตรี หอมเขียว 22
4. การอภิปรายวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการเงินของผู้มีส่วนได้เสียของสัญญา PPP O&M ของโครงการ
ทางหลวงระหว่างเมืองของประเทศไทย
นนทพัฒน์ ปิ่นตบแต่ง และ นคร กกแก้ว 36
5. วงจรแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันแบบประหยัดความแม่นยำสูง
สมปอง วิเศษพานิชกิจ 52
6. การปรับปรุงสถานีการประกอบด้วยวงจรพีดีซีเอและทีมข้ามสายงาน
บรรหาญ ธิลา และ สุธิดา ชีโนดม 63
7. การส่งเสริมประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งซองโดยการสอดช่องที่กลางของผลิต
ภูริช ไวยโกชน และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ 75
8. การคัดเลือกรูปแบบการปรับปรุงทางแยกที่เหมาะสมด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพในแบบจำลอง
การจราจรร่วมกับ Analytical Hierarchical Process (AHP)
พชร ศรีสุโพธิ์ วุฒิไกร ไชยปัญญา ธนพล พรหมรักษา และ ปฎิภาณ แก้ววิเชียร 86
9. ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยเมชเปลี่ยนรูปรอบผนัง ในการวิเคราะห์ของไหลผ่านวัตถุฐาน
รูปทรงกระบอกขณะหมุนที่สภาวะเรย์โนลด์สูง
สิทธิชัย รัชชโยธิน 103
10. การเปรียบเทียบผังโรงงานโดยใช้วิธี CORELAP, ALDEP และ SLP: กรณีศึกษาโรงงานผลิต
แผงวงจรพิมพ์
พิชญวดี กิตติปัญญางาม ศิริลักษณ์ สิทธิบุรณ์ และ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข 121
11. การประเมินความแม่นยำการประมาณการระยะด้วยวิธี Multiple Linear Regression และสมการลด
รูปแบบง่ายของ Penman
จิรเดช เศรษฐกัมพู และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร 138
12. การออกแบบและพัฒนาไบโพดกวนผสมสำหรับของไหลที่มีความหนืดด้วยองค์ความรู้จากสิทธิบัตรการ
ออกแบบผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล
วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล 149

“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 หากมิใช่ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ 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. Choeysuan 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.นเรศรฐ พัฒนาเดช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาทร ลาภเจริญสุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิตา 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

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเสียชีวิตการจราจรทางถนนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร:
กรณีการเปรียบเทียบสถานการณ์ในช่วงก่อนและหลังการเกิดการระบาดของโรคติดเชื้อ
ไวรัสโคโรนา 2019

**Factors Influencing Number of Deaths Due to Road Crashes in Bangkok:
A Comparison between the Situations before and after the Outbreak of
Coronavirus Disease 2019**

พุทธิชา พรชัยพานิช^{1,*} และ จารุวิศว์ ปราบนศักดิ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง

ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Putticha Phonchaipanich^{*} and Jaruwit Prabnasak

¹Department of Civil Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10250, Thailand

^{*}Corresponding Author E-mail: 64601102@kmitl.ac.th

Received: Apr 14, 2022; **Revised:** Jul 26, 2022; **Accepted:** Aug 22, 2022

บทคัดย่อ

จากการศึกษาข้อมูลสถิติจำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในพื้นที่กรุงเทพมหานครย้อนหลัง 11 ปี พบประเด็นที่มีความน่าสนใจโดยไม่พบอัตราการเสียชีวิตที่ลดลงโดยชัดเจนแม้ในช่วงที่มีการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ที่ส่งผลให้การเดินทางในกรุงเทพมหานครลดลงอย่างมีนัยสำคัญในหลายช่วงเวลาที่มีการประกาศมาตรการควบคุมโรค การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบและปัจจัยอิทธิพลที่มีต่อจำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพมหานคร โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรค โดยอาศัยข้อมูลการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนจากระบบบูรณาการข้อมูลการตายจากอุบัติเหตุทางถนน กระทรวงสาธารณสุข สำหรับเครื่องมือการศึกษาที่สำคัญประกอบด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์สถิติ การหาความสัมพันธ์และสหสัมพันธ์พหุคูณ และการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่าแม้ในช่วงที่มีการกำหนดมาตรการควบคุมการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 อย่างเคร่งครัดที่ส่งผลให้การเดินทางของประชากรในกรุงเทพมหานครมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน รูปแบบและจำนวนของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนและปัจจัยอิทธิพล กลับไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับช่วงก่อนการเกิดโรคระบาด โดยปัจจัยประชากรศาสตร์ พื้นที่ และสิ่งแวดล้อม ยังคงมีอิทธิพลเหนือจำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: อุบัติเหตุทางถนน, การเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน, การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา, กรุงเทพมหานคร

Abstract

From a statistical study on the number of road traffic deaths in Bangkok over the past eleven years, there was no significant reduction in the mortality rate even during the outbreak of coronavirus disease in 2019 that has significantly reduced mobility. The

purpose of this study is to analyze the factors and influencing factors of road traffic deaths in Bangkok. The study was divided into two periods: the period before and after the outbreak and the study data was based on road traffic deaths from the Ministry of Public Health's integrated road accident mortality data system. Important research tools include statistical analysis, relationship and multiple regression analysis, and hypothesis testing. From the study, we found that even during the period of strict control measures for the epidemic diseases, the mobility in Bangkok tends to be obvious downward trend. Pattern and number of road traffic deaths failed to find a significant difference in mean compared to the pre-epidemic period. Demographic, spatial, and environmental factors still clearly dominate the number of road traffic deaths.

Keywords: Road crashes, Road traffic deaths, Coronavirus outbreak, Bangkok

1. บทนำ

อุบัติเหตุทางถนนถือเป็นปัญหาสำคัญและสร้างความสูญเสียทั้งในด้านเศรษฐกิจและสังคมให้กับประเทศไทยมาเป็นเวลานาน โดยในปี 2560 ประเทศไทยมีอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนสูงเป็นอันดับที่ 9 ของโลก และเป็นอันดับ 1 ของเอเชียและภูมิภาคอาเซียน โดยมีอัตราเฉลี่ยผู้เสียชีวิต 32.7 คนต่อประชากร 100,000 คน [1] ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจคิดเป็นมูลค่าความสูญเสียจากอุบัติเหตุเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 545,435 ล้านบาทต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 6 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ [2]

กรุงเทพมหานคร เป็นเมืองหลวง เป็นศูนย์กลางทางด้านเศรษฐกิจ และเป็นชุมชนเมืองที่มีขนาดใหญ่และมีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นที่สุดของประเทศไทย อย่างไรก็ตามจากฐานข้อมูลอุบัติเหตุ [3] แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า กรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ซึ่งประสบปัญหาในเรื่องอุบัติเหตุทางถนนรุนแรงที่สุดในประเทศไทย และแม้ว่าที่ผ่านมาภาครัฐจะได้มีการกำหนดนโยบายและแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ มาประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่อง แต่กลับพบว่าปัญหาจากอุบัติเหตุทางถนนและการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนกลับไม่ลดลงอย่างชัดเจน ในประเด็นนี้เองจึงเป็นคำถามวิจัยประเด็นแรกของการศึกษานี้ โดยในการศึกษานี้มีความมุ่งหวังที่จะศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่มีความรุนแรงจนถึงขั้นมีผู้เสียชีวิตในพื้นที่กรุงเทพมหานคร เพื่อให้สามารถอธิบายถึงต้นตอของปัญหาได้

นอกจากประเด็นคำถามวิจัยที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบอีกหนึ่งประเด็นที่น่าสนใจ ได้แก่

ผลกระทบจากการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ต่ออัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน ซึ่งเป็นที่ทราบทั่วกันตั้งแต่ต้นปี 2563 เป็นต้นมา ได้เกิดการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศในหลากหลายมิติ ไม่ว่าจะเป็นด้านเศรษฐกิจ สังคม การใช้ชีวิต และรวมถึงพฤติกรรมและปริมาณการเดินทางของประชาชน ดังจะเห็นได้จากสถิติปริมาณการเดินทางที่รายงานโดยกระทรวงคมนาคม [4] ซึ่งพบว่าการเดินทางของประชาชนทางถนนในปี 2563 กับปี 2564 ซึ่งอยู่ในช่วงของการระบาดของโรค ลดลงถึงร้อยละ 49.6 และ 71.2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปี 2562 ซึ่งเป็นปีก่อนการระบาดของโรค นอกจากนี้รายงานข้อมูลการเดินทางของบุคคลในชุมชน [5] ได้เผยให้เห็นว่าแนวโน้มการเดินทางไปยังสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ สถานที่ทำงาน และสถานี่ขนส่งเมื่อเทียบกับเกณฑ์พื้นฐานลดลงร้อยละ 12, 15 และ 38 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการลดลงอย่างชัดเจน และโดยเฉพาะในพื้นที่กรุงเทพมหานครซึ่งเป็นเขตการระบาดหลักของโรค [6] และได้มีการประกาศมาตรการควบคุมโรคอย่างเข้มข้นสูงสุด อย่างต่อเนื่องและยาวนานกว่าพื้นที่อื่นของประเทศจึงทำให้ปริมาณการเดินทางของประชาชนในพื้นที่กรุงเทพมหานครลดลงอย่างมีชัดเจน ซึ่งโดยข้อสันนิษฐานในเบื้องต้นการที่ปริมาณการเดินทางทางถนนที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญควรจะส่งผลให้อัตราการเกิดอุบัติเหตุทางถนนและการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนลดลงอย่างสังเกตได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามจากการทบทวนข้อมูลการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน [3] กลับพบว่าอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนไม่ลดลงอย่างชัดเจนนักแม้จะอยู่ในช่วงที่เกิดการระบาดของโรคที่รุนแรงและมีการจำกัดการเดินทางในพื้นที่ที่ศึกษาก็ตาม จึงเป็นอีกหนึ่งประเด็นคำถามวิจัยของการศึกษานี้ โดยผู้ศึกษามุ่งหวังที่จะ

ศึกษาวิเคราะห์สถานการณ์และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่มีการเสียชีวิตเกิดขึ้น ในช่วงการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับช่วงก่อนการเกิดการระบาดของโรค

จากประเด็นและคำถามวิจัยที่กล่าวไปแล้วข้างต้น การศึกษาในครั้งนี้จึงประกอบไปด้วยวัตถุประสงค์ของการศึกษาทั้งสิ้น 3 ข้อ ได้แก่ 1) เพื่อศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยพื้นฐานการเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่มีผู้เสียชีวิตในพื้นที่กรุงเทพมหานครในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 2) เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างปัจจัยพื้นฐานและอัตราการเสียชีวิตในพื้นที่กรุงเทพมหานครในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และ 3) เปรียบเทียบความเหมือนหรือแตกต่างของการเกิดเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในพื้นที่กรุงเทพมหานครด้วยเทคนิคการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

โดยในการศึกษาค้นคว้าอ้างอิงข้อมูลการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนจากฐานข้อมูลการบูรณาการข้อมูลผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน สำนักโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข [3] ซึ่งถือว่าเป็นฐานข้อมูลผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนที่เป็นทางการ และมีความครบถ้วนสมบูรณ์ และมีความน่าเชื่อถือที่สุดในปัจจุบัน [7]

2. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยส่วนที่ 1 เป็นวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาเพื่อบรรยายลักษณะของกลุ่มข้อมูลผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพมหานคร เช่น เพศ อายุ ประเภทยานพาหนะ ตำแหน่งของการเกิดอุบัติเหตุ รวมถึงแนวโน้มจำนวนการเสียชีวิตในแต่ละปี ระหว่างปี 2554-2564 โดยแยกเป็นช่วงก่อนและหลังการเกิดการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบความสัมพันธ์และสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานและอัตราการเสียชีวิตด้วยเครื่องมือทางสถิติ ได้แก่ การหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยแยกเป็นช่วงก่อนและหลังการเกิดการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัส

โคโรนา 2019 ในขณะที่ส่วนที่ 3 เป็นวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลผู้เสียชีวิตก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 โดยใช้การวิเคราะห์เชิงทัศนียภาพแผนที่สถิติ (Statistics Map) และการทดสอบสมมติฐานด้วยเครื่องมือทางสถิติเชิงอ้างอิง ได้แก่ การทดสอบค่าที (T-Test) เพื่อเปรียบเทียบความเหมือนหรือแตกต่างของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในพื้นที่กรุงเทพมหานครด้วยเทคนิคการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

3. ข้อมูลและพื้นที่การศึกษา

กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงและเป็นชุมชนเมืองที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย เป็นศูนย์กลางของการปกครอง เศรษฐกิจ การศึกษา การคมนาคมขนส่งเฉพาะกรุงเทพมหานคร (ไม่รวมจังหวัดปริมณฑลที่มีชุมชนเมืองต่อเนื่องกับกรุงเทพมหานคร) มีขนาดพื้นที่รวมกว่า 1,568 ตารางกิโลเมตร และตามข้อมูลทะเบียนราษฎรปัจจุบันพบว่ามีประชากรอาศัยอยู่ทั้งสิ้น 5,527,994 คน แบ่งเขตการปกครองระดับพื้นที่ออกเป็น 50 เขต โดยในจำนวนนี้ถูกแบ่งตามกายภาพของชุมชนเมืองเป็น 3 ชั้น ได้แก่ 1) เขตปกครองชั้นใน ประกอบด้วย 21 เขต เป็นบริเวณย่านศูนย์กลางเมือง มีกิจกรรมทางเศรษฐกิจและสังคมที่หลากหลาย รวมถึงเป็นศูนย์กลางการคมนาคมในรูปแบบต่างๆ ที่ดินส่วนใหญ่เป็นที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม หน่วยงานราชการ และสถาบันการศึกษา 2) เขตปกครองชั้นกลาง ประกอบด้วย 18 เขต เป็นพื้นที่เขตที่รองรับการขยายตัวจากเขตชั้นใน เป็นจุดเชื่อมต่อของระบบคมนาคมขนส่งต่างๆ ในฝั่งตะวันตกส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและพาณิชยกรรมดั้งเดิม ส่วนฝั่งตะวันออกจะเป็นการใช้พื้นที่ในลักษณะประเภทอุตสาหกรรมและคมนาคมขนส่งทางอากาศ และ 3) เขตปกครองชั้นนอกหรือชานเมือง ประกอบด้วย 11 เขต โดยมักเป็นเขตที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ประชากรอยู่อาศัยเบาบาง พื้นที่เชื่อมต่อกับจังหวัดรอบกรุงเทพฯ มีการใช้ประโยชน์ที่ดินในลักษณะของพื้นที่เพื่อการเกษตรกรรม อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และพื้นที่ว่าง ประสมประสาน

ฐานข้อมูลผู้เสียชีวิตอุบัติเหตุทางถนนที่นำมาใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้ได้แก่ฐานข้อมูลการบูรณาการข้อมูลอุบัติเหตุ

ที่จัดทำโดยสำนักโรคไม่ติดต่อ กระทรวงสาธารณสุข [3] โดยฐานข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นการรวบรวมฐานข้อมูลอุบัติเหตุทางถนนมาทั้งหมด 8 แหล่งข้อมูล จากนั้นนำมาพิจารณาคุณภาพและคัดเลือกฐานข้อมูลที่ครอบคลุมทั่วประเทศ มีรายละเอียดที่ระบุได้ถึงระดับบุคคล และมีคุณลักษณะที่สำคัญเกี่ยวกับอุบัติเหตุจราจร ซึ่งฐานข้อมูลที่ถูกคัดเลือกออกมาประกอบด้วย ฐานข้อมูลใบมรณบัตร ระบบ POLIS และระบบ E-Claim โดยรายการข้อมูลภายในฐานข้อมูลประกอบด้วย วันและเวลาของการเสียชีวิต อายุผู้เสียชีวิต เพศผู้เสียชีวิต ภูมิลำเนาของผู้เสียชีวิต พื้นที่และเขตการปกครองที่เกิดอุบัติเหตุ ประเภทยานพาหนะที่เกิดอุบัติเหตุ และพิกัดทางภูมิศาสตร์ของตำแหน่งที่เกิดอุบัติเหตุ

นอกจากนี้การศึกษายังได้อ้างอิงข้อมูลอื่นๆ เพื่อประกอบการศึกษาวิเคราะห์ อาทิ ข้อมูลสถิติด้านสังคม ด้านโครงสร้างพื้นฐาน และด้านเศรษฐกิจ โดยรวบรวมและอ้างอิงมาจากฐานข้อมูลอย่างเป็นทางการของราชการ เช่น สถิติกรุงเทพมหานครปี 2554-2563 [8] และข้อมูลของสำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร [9] เป็นต้น

4. ผลการศึกษา

ในส่วนของผลการศึกษาจะแสดงถึงปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลต่อจำนวนผู้เสียชีวิต ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานและอัตราการเสียชีวิต และการทดสอบสมมติฐานของความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราและลักษณะการเกิดอุบัติเหตุที่มีผู้เสียชีวิตในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ดังนี้

4.1. ปัจจัยพื้นฐานของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพ

ผลการศึกษาการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพมหานครตั้งแต่ปี 2554-2564 จำนวน 11 ปี พบว่าผู้เสียชีวิตเป็นเพศชายมีจำนวนสูงกว่าเพศหญิง 4.5 เท่าโดยผู้เสียชีวิตเป็นเพศชายร้อยละ 82 ขณะที่เพศหญิงร้อยละ 18 ดังแสดงในตารางที่ 1 ช่วงอายุที่มีผู้เสียชีวิตสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 16-20 ปี และ 21-25 ปี ซึ่งมีสัดส่วนใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 15 ต่อช่วงอายุดังแสดงในตารางที่ 2 การแบ่งช่วงอายุแบบช่วงอายุละ 5 ปี จะช่วยให้การระบุถึงปัจจัยที่เสี่ยงต่อ

การเกิดอุบัติเหตุทางถนนได้อย่างตรงประเด็นมากยิ่งขึ้นสำหรับคำอธิบายที่มีความเป็นไปได้สูงสุดคือช่วงอายุระหว่าง 16-20 ปี เป็นช่วงอายุช่วงวัยเรียนหรือวัยรุ่นตอนปลาย และช่วงอายุระหว่าง 21-25 ปี เป็นวัยช่วงต้นการทำงานหรือช่วงเข้าสู่ภาวะการเป็นผู้ใหญ่ ซึ่งทั้งสองช่วงอายุเป็นช่วงที่บุคคลส่วนใหญ่โดยเฉพาะเพศชายจะมีกิจกรรมทางสังคมที่มีความเสี่ยงค่อนข้างสูง ประกอบกับลักษณะนิสัยที่อยู่ในช่วงที่มีความหุนหันองขาดความระมัดระวัง และยังมีประสบการณ์ในการใช้รถใช้ถนนไม่มากนัก [10],[11]

ในส่วนของปัจจัยด้านยานพาหนะ พบว่ายานพาหนะที่ประสบอุบัติเหตุจนเป็นเหตุให้มีผู้เสียชีวิตมากที่สุดคือรถจักรยานยนต์ โดยมีจำนวนสูงถึงร้อยละ 91 สอดคล้องกับข้อมูลการถือครองยานพาหนะส่วนบุคคลของประชากรในพื้นที่ศึกษาซึ่งจักรยานยนต์เป็นยานพาหนะที่มีการถือครองและจดทะเบียนใหม่สูงกว่ารถยนต์และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตรงกันข้ามกับรถยนต์ที่มีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 1 [12] อีกทั้งยังสอดคล้องกับลักษณะจำเพาะทางกายภาพและข้อจำกัดของจักรยานยนต์ที่ส่งผลให้มีระดับความปลอดภัยต่ำกว่ายานพาหนะประเภทอื่น [13]

จากข้อมูลเขตปกครองและจำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนซึ่งแสดงในตารางที่ 3 พบว่าเขตปกครองที่พบจำนวนผู้เสียชีวิตสูงสุด 5 อันดับแรก ได้แก่ ลาดกระบ้ง บางขุนเทียน หนองจอก มีนบุรี และประเวศ ซึ่งทั้ง 5 เขตที่กล่าวมาเป็นพื้นที่เขตชานนอกหรือชานเมือง และมีพื้นที่ขนาดใหญ่ ประชาชนหนาแน่นน้อยกว่าในเขตเมือง ในประเด็นนี้อาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการใช้ความเร็วสูงในการขับขึ้นโครงข่ายถนน และรวมถึงระบบไฟฟ้าส่องสว่างบนโครงข่ายถนนสายรองต่างๆ ในทางกลับกันเขตปกครองที่มีจำนวนผู้เสียชีวิตน้อยสุด 5 อันดับ ได้แก่ สัมพันธวงศ์ บางรัก สาทร ป้อมปราบศัตรูพ่าย และพระนคร ซึ่งทั้ง 5 เขตนี้เป็นพื้นที่เขตชั้นในที่มีความหนาแน่นของประชากรต่อพื้นที่ในระดับสูง มีอัตราความหนาแน่นของการจราจรบนโครงข่ายถนนที่สูงส่งผลให้การขับขึ้นยานพาหนะไม่สามารถใช้ความเร็วได้มากนัก รวมถึงปัจจัยด้านแสงสว่างบนโครงข่ายถนนในยามค่ำคืนและการมีระบบขนส่งมวลชนที่ครอบคลุมช่วยลดโอกาสของการใช้ยานพาหนะส่วนบุคคลได้ ผลการ

วิเคราะห์นี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จำแนกตามความหนาแน่นประชากรต่อพื้นที่ซึ่งแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าร้อยละของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนสูงสุดในเขตที่มีประชากรหนาแน่นน้อยที่สุดโดยอยู่ที่ ร้อยละ 45.14 ตามมาด้วยเขตที่มีประชากรหนาแน่นปานกลางไปถึงมาก ร้อยละ 25.43, 23.86 และ 5.57 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สัดส่วนจำนวนผู้เสียชีวิตปี 2554-2564 ในกรุงเทพมหานครจำแนกตามเพศ

เพศ	ร้อยละ
ชาย	82.2
หญิง	17.8
รวม	100

ตารางที่ 2 สัดส่วนผู้เสียชีวิตปี 2554-2564 ในกรุงเทพมหานครจำแนกตามช่วงอายุ

อายุ	ร้อยละ
อายุ 0-5 ปี	2.0
อายุ 6-10 ปี	0.4
อายุ 11-15 ปี	3.5
อายุ 16-20 ปี	14.6
อายุ 21-25 ปี	15.3
อายุ 26-30 ปี	11.0
อายุ 31-35 ปี	9.1
อายุ 36-40 ปี	8.1
อายุ 41-45 ปี	6.8
อายุ 46-50 ปี	7.2
อายุ 51-55 ปี	6.0
อายุ 56-60 ปี	5.3
อายุ 61-65 ปี	3.7
อายุ 66-70 ปี	2.7
อายุ 71-75 ปี	2.1
อายุ 76-80 ปี	1.3
อายุ 81-85 ปี	0.8
อายุ 86-90 ปี	0.3
อายุ 91-95 ปี	0.1

ตารางที่ 2 สัดส่วนผู้เสียชีวิตปี 2554-2564 ในกรุงเทพมหานครจำแนกตามช่วงอายุ (ต่อ)

อายุ	ร้อยละ
อายุ 96-100 ปี	0.01
รวม	100

ตารางที่ 3 สัดส่วนของผู้เสียชีวิตรวมระหว่างปี 2554-2564 จำแนกเป็นรายเขตพื้นที่

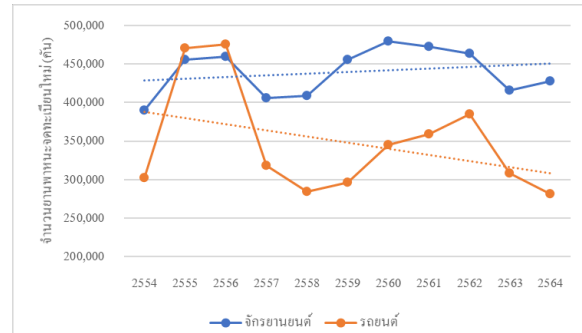
เขตการปกครอง	ร้อยละ
สัมพันธวงศ์	0.12
บางรัก	0.48
สาทร	0.53
ป้อมปราบศัตรูพ่าย	0.55
พระนคร	0.75
บางคอแหลม	0.75
บางกอกใหญ่	0.77
วัฒนา	0.78
หลักสี่	0.96
ปทุมวัน	1.04
บางพลัด	1.06
พญาไท	1.11
ทุ่งครุ	1.11
คลองสาน	1.16
วังทองหลาง	1.33
ดินแดง	1.36
พระโขนง	1.43
ราชเทวี	1.48
บางกอกน้อย	1.50
ภาษีเจริญ	1.52
สะพานสูง	1.55
คูสิต	1.60
ห้วยขวาง	1.67
บึงกุ่ม	1.76
บางซื่อ	1.86
ราษฎร์บูรณะ	1.89
สวนหลวง	2.08

ตารางที่ 3 สัดส่วนของผู้เสียชีวิตรวมระหว่างปี 2554-2564
จำแนกเป็นรายเขตพื้นที่ (ต่อ)

เขตการปกครอง	ร้อยละ
คันนายาว	2.10
ทวีวัฒนา	2.17
ยานนาวา	2.20
หนองแขม	2.20
จอมทอง	2.20
ธนบุรี	2.25
บางนา	2.39
ดอนเมือง	2.46
ลาดพร้าว	2.54
บางกะปิ	2.58
คลองจั่น	2.68
คลองเตย	2.68
คลองสามวา	2.69
บางแค	2.73
จตุจักร	2.80
บางเขน	2.85
บางบอน	2.97
สายไหม	3.07
ประเวศ	3.77
มีนบุรี	3.84
หนองจอก	4.03
บางขุนเทียน	5.25
ลาดกระบัง	5.37
รวม	100

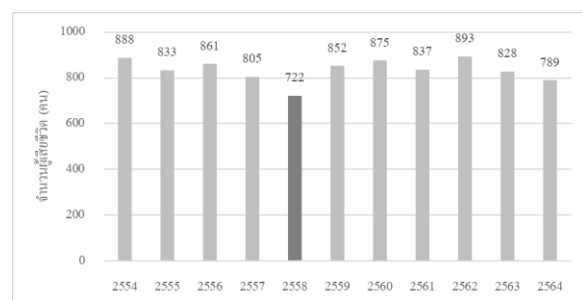
ตารางที่ 4 สัดส่วนผู้เสียชีวิตปี 2554-2564 ในกรุงเทพมหานคร
จำแนกตามความหนาแน่นประชากรต่อพื้นที่

ความแน่น (คน/ตร.กม.)	ร้อยละ
0-5000	45.14
5001-10000	25.43
10001-15000	23.86
15000 ขึ้นไป	5.57
รวม	100



รูปที่ 1 จำนวนยานพาหนะจดทะเบียนใหม่ใน
กรุงเทพมหานครปี 2554-2564

นอกจากนี้จากสถิติจำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนรายปีในเขตกรุงเทพมหานคร ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ามีแนวโน้มหรือรูปแบบการปรับตัวที่ไม่ชัดเจนนัก กล่าวคือระหว่างปี 2554 ถึง 2558 มีแนวโน้มลดลง และในปี 2558 มีจำนวนการเสียชีวิตต่ำที่สุดในรอบ 11 ปีที่ผ่านมา โดยลดลงจากค่าเฉลี่ยร้อยละ 13.5 แต่หลังจากปี 2559 เป็นต้นมา จำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนกลับปรับตัวสูงขึ้นและมีแนวโน้มการปรับตัวไม่ชัดเจนจนกระทั่งในปี 2563 และ 2564 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการระบาดของโรคติดเชื้อโคโรนาไวรัส 2019 พบแนวโน้มการลดลงของจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนอีกครั้ง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สูงกว่าปี 2558



รูปที่ 2 จำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนใน
กรุงเทพมหานครปี 2554-2564

4.2.ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานและอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานและอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 3 ส่วน ดังนี้

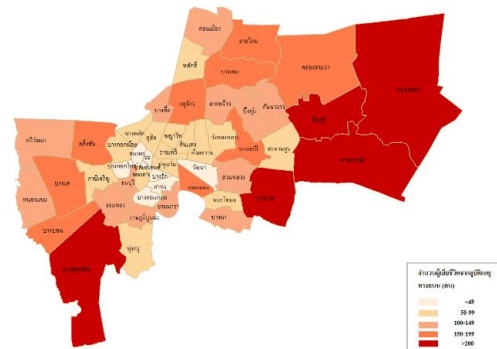
1) ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานเชิงพื้นที่และจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนจากการวิเคราะห์โดยกระบวนการเชิงพื้นที่

ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนและปัจจัยเชิงพื้นที่ด้วยแผนที่สถิติ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเขตการปกครองชั้นนอกที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่จะมีจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในระดับสูง และจะเริ่มลดลงเมื่อเข้าไปยังเขตปกครองชั้นกลางและชั้นในตามลำดับ โดยในประเด็นนี้อธิบายได้ด้วยจำนวนประชากร ที่อยู่อาศัย ปัจจัยลักษณะและพฤติกรรมการเดินทาง กระแสจราจร การใช้ความเร็วบนโครงข่ายถนน และสภาพของถนนและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากประชากรที่อยู่บริเวณเขตการปกครองชั้นนอกหรือชานเมืองเป็นผู้มีรายได้น้อยถึงปานกลาง และไม่สามารถเข้าถึงการขนส่งมวลชนได้อย่างครอบคลุม รวมถึงจำนวนรถโดยสารประจำทางที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของประชาชนในเขตชานเมือง ประชาชนส่วนใหญ่ที่รายได้น้อยถึงปานกลางจึงเลือกใช้รถยนต์ส่วนบุคคลซึ่งได้แก่ รถจักรยานยนต์ในการขับขี่สัญจร จึงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุบนถนนได้มากกว่าในเขตการปกครองชั้นใน ที่ซึ่งประกอบไปด้วยระบบมวลชนที่หลากหลายและครอบคลุมทุกบริเวณ [14]

2) สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างปัจจัยพื้นฐานและจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน

เมื่อวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างจำนวนผู้เสียชีวิตและปัจจัยพื้นฐานรายเขตพื้นที่ของทั้ง 50 เขตการปกครองในกรุงเทพมหานคร ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าทั้ง 10 ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์มีนัยสำคัญทางสถิติของสหสัมพันธ์ในระดับที่สูง (ค่า $p\text{-value} < 0.05$) ซึ่งหมายความว่าทุกปัจจัยมีความสัมพันธ์กับจำนวนผู้เสียชีวิต และเมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยจะพบว่าปัจจัยด้านจำนวนประชากร พื้นที่ จำนวนนักเรียน และจำนวนตลาด มีความสัมพันธ์กับจำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในระดับสูง (ค่า Correlation .70–.90) [15] โดยที่จำนวนประชากรหมายถึงประชากรตามทะเบียนราษฎร์ พื้นที่หมายถึงพื้นที่รวมพื้นที่ดินและแหล่งน้ำที่สำรวจและรังวัดโดย กองสำรวจ

และแผนที่ สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร จำนวนนักเรียนหมายถึงจำนวนนักเรียนตั้งแต่ระดับชั้นอนุบาลถึงมัธยมศึกษา และจำนวนตลาด หมายถึงตลาดตามมาตรฐานประเภทที่ 1 2 และ 3 ที่รวบรวมโดยกองสุขาภิบาลอาหาร สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สะท้อนถึงวิถีชีวิตและโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุทางถนนในชุมชน โดยเฉพาะในกลุ่มผู้มีอายุน้อยได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3 แผนที่สถิติจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพ

ตารางที่ 5 สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานและจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในแต่ละเขต

ปัจจัยพื้นฐานของแต่ละเขตพื้นที่	สหสัมพันธ์ต่อจำนวนผู้เสียชีวิต	Sig. (2-tailed)
ประชากร	.755	.000
ชุมชน	.531	.000
ครัวเรือน	.622	.000
พื้นที่	.684	.000
ความยาวถนน	.532	.000
โรงเรียน	.581	.000
ที่พักอาศัย	.636	.000
โรงงาน	.540	.000
นักเรียน	.791	.000
ตลาด	.782	.000

3) การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Linear Regression)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยเทคนิคแบบจำลองการถดถอยพหุคูณ

(Multiple Linear Regression) ในช่วงก่อนการเกิดการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (ข้อมูลปี 2554 ถึง 2562) โดยตัวแปรตาม ได้แก่ จำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน และตัวแปรอิสระของแต่ละเขตการปกครอง เพื่อพยายามอธิบายเพิ่มเติมถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในช่วงสถานการณ์ปกติ (ก่อนการเกิดโรคระบาด)

จากการศึกษาพบว่าสามารถสร้างสมการเชิงเส้นพหุคูณที่ให้ค่าความสอดคล้องกับข้อมูล (Model Fit) ในระดับที่ยอมรับได้ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยแบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วย 4 ตัวแปรอิสระ ได้แก่ จำนวนประชากร พื้นที่ จำนวนนักเรียน และจำนวนตลาด ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมจากสถิติกรุงเทพมหานคร [13] โดยให้ค่า R-Square ของแบบจำลองที่ 0.755 และเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีความสอดคล้องและสามารถอธิบายพฤติกรรมและสิ่งที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวมีเพียงจำนวนตลาดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งยังแสดงถึงความแปรปรวนและการกระจายตัวของชุดข้อมูลที่มีค่อนข้างสูง

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน

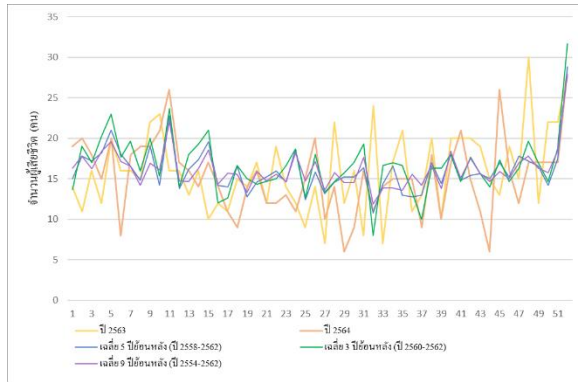
ตัวแปร	B	SE	Beta	t	Sig.
ประชากร (10,000 คน)	.417	.211	.269	1.671	.055
พื้นที่	.031	.020	.192	1.578	.121
นักเรียน (1,000 คน)	.195	.296	.124	.658	.514
ตลาด	.445	.113	.416	3.941	.000
ค่าคงที่	1.074	1.542		.697	.490

4.3. การทดสอบสมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดอุบัติเหตุและลักษณะการเกิดอุบัติเหตุที่มีผู้เสียชีวิตในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

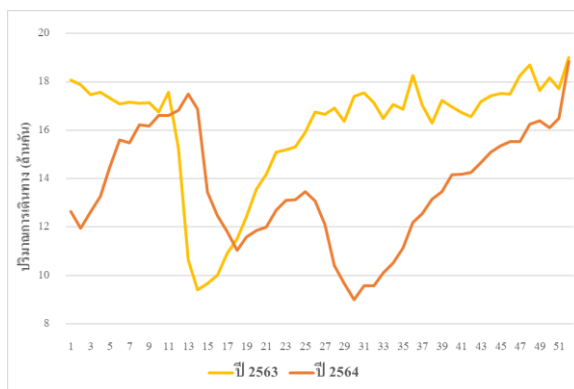
เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราและลักษณะการเกิดอุบัติเหตุที่มีผู้เสียชีวิตในพื้นที่กรุงเทพมหานครในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ชุด

ข้อมูลจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนรายสัปดาห์ในช่วงก่อนการเกิดการระบาด 3 ปี 5 ปี และ 9 ปีซ้อนหลัง ถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับชุดข้อมูลของปี 2563 และ 2564 (ช่วงหลังเกิดการระบาด) ด้วยแผนภูมิดังแสดงในรูปที่ 4 โดยจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้เสียชีวิตต่อสัปดาห์ในช่วงก่อนการเกิดการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เทียบ 3 ปีซ้อนหลังตั้งแต่ปี 2560–2562 (เส้นสีเขียว) 5 ปีซ้อนหลังตั้งแต่ปี 2558–2562 (เส้นสีน้ำเงิน) 9 ปีซ้อนหลังตั้งแต่ปี 2554–2562 (เส้นสีม่วง) และ 2 ปีที่มีการระบาดของโรค (เส้นสีส้มแทนข้อมูลในปี 2563 และ เส้นสีแดงแทนข้อมูลในปี 2564) มีลักษณะที่มีความแปรปรวนค่อนข้างสูงและไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนนัก ยกเว้นเพียง 2 ช่วงเวลาของปีที่ลักษณะของเส้นกราฟแสดงไปในลักษณะเดียวกัน ได้แก่ ในช่วงเดือนมีนาคม (สัปดาห์ที่ 11) ซึ่งเป็นช่วงที่โรงเรียนและมหาวิทยาลัยสิ้นสุดภาคการศึกษาสุดท้ายของปีการศึกษา และช่วงปลายเดือนธันวาคม (สัปดาห์ที่ 52) ซึ่งเป็นช่วงเทศกาลปีใหม่ จำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนจะสูงขึ้น ทั้งในช่วงก่อนและหลังการเกิดโรคระบาด

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาแนวโน้มในภาพรวมอาจกล่าวได้ว่า นอกจาก 2 ช่วงเวลาของปีข้างต้น ในช่วงเวลาที่เหลือนั้น จำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพมหานครตลอดทั้งปีก่อนข้างคองที่และไม่พบความสัมพันธ์กับฤดูกาลหรือเทศกาลอย่างชัดเจนนัก ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเทียบเคียงกับปริมาณการเดินทางทางถนนในกรุงเทพมหานครในช่วงที่มีการระบาดของโรคค่อนข้างรุนแรงและมีมาตรการในการควบคุมการเดินทางภายในพื้นที่อย่างเคร่งครัด จนส่งผลให้ปริมาณการเดินทางทางถนนลดลงถึงกว่าร้อยละ 30 ถึง 40 ของปริมาณการเดินทางปกติ (อ้างอิงจากข้อมูลของกระทรวงคมนาคม ดังแสดงในรูปที่ 5) อัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนยังคงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงอาจกล่าวในเบื้องต้นได้ว่าไม่พบความสัมพันธ์อย่างชัดเจนระหว่างปริมาณการเดินทางทางถนนและจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพมหานครแม้ในช่วงที่มีมาตรการควบคุมการเดินทางและมีการลดลงของปริมาณการเดินทางอย่างมีนัยสำคัญก็ตาม



รูปที่ 4 เปรียบเทียบจำนวนผู้เสียชีวิต 52 สัปดาห์ก่อนและหลังการระบาดโควิด-19



รูปที่ 5 ปริมาณการเดินทางทางถนนในกรุงเทพมหานครปี 2563 และ 2564

เพื่อทดสอบข้อสมมติฐานที่ว่าจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพมหานครมีรูปแบบที่ค่อนข้างคงที่และไม่ได้ได้รับอิทธิพลจากการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มากนัก ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้ทำการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างระหว่างข้อมูล 2 กลุ่มด้วยวิธีวิเคราะห์ค่าสถิติแบบที (Paired Sample T-Test) โดยเปรียบเทียบกลุ่มข้อมูลจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 โดยในช่วงของการระบาดนั้นแยกการวิเคราะห์เป็น 2 การวิเคราะห์ ได้แก่ 1) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในช่วงก่อนการเกิดการระบาดของโรค เทียบกับกลุ่มข้อมูลในปี 2563 และ 2) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในช่วงก่อนการเกิดการระบาดของโรค เทียบกับกลุ่มข้อมูลในปี 2564 เนื่องจากรูปแบบ ความรุนแรง และบริบทของ

การระบาดรวมถึงมาตรการป้องกันและรับมือกับโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ทั้ง 2 ปีมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการแบ่งการวิเคราะห์แยกกันเพื่อให้เห็นถึงบริบทและลักษณะที่มีความเฉพาะตัวของการะบาดของในแต่ละปี โดยผลแสดงในตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่า T-Test ของชุดข้อมูลก่อนการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา และชุดข้อมูลในปี 2563

ช่วงเวลาการศึกษา	จำนวนผู้เสียชีวิต				
	N	$\bar{x}$	S.D.	t	Sig.
เฉลี่ย 2554–2562	52	16.27	2.45	.516	.608
2563	52	15.92	5.04		

ตารางที่ 8 ค่า T-Test ของชุดข้อมูลก่อนการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา และชุดข้อมูลในปี 2564

ช่วงเวลาการศึกษา	จำนวนผู้เสียชีวิต				
	N	$\bar{x}$	S.D.	t	Sig.
เฉลี่ย 2554–2562	52	16.27	2.45	1.780	.081
2564	52	15.31	4.70		

จากตารางที่ 6 และ 7 จะเห็นได้ว่าค่านัยสำคัญทางสถิติหรือ Sig. สำหรับข้อมูลปี 2563 และ 2564 เทียบกับกลุ่มอ้างอิงได้แก่ค่าเฉลี่ยจำนวนการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนรายเขตในช่วงก่อนการเกิดโรคระบาด อยู่ที่ 0.608 และ 0.081 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงอาจกล่าวได้ว่าไม่พบนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มตัวอย่างในทั้ง 2 กรณี กล่าวคือ ไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในช่วงก่อนและหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในพื้นที่กรุงเทพมหานครทั้งในช่วงก่อนและหลังการเกิดโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 พบว่าจำนวนผู้เสียชีวิตส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับเพศชาย และช่วงอายุระหว่าง 16–25 ปี โดยเกิดขึ้นกับรถจักรยานยนต์เป็นส่วน

ใหญ่ ซึ่งในประเด็นของเพศและอายุนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะของกิจกรรมทางสังคมและการใช้ชีวิตของวัยรุ่นชายที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุมากกว่าบุคคลในเพศและช่วงวัยอื่นๆ [9] ขณะที่จักรยานยนต์เป็นยานพาหนะส่วนบุคคลที่มีโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุที่มีความรุนแรงได้สูงกว่ายานพาหนะส่วนบุคคลประเภทอื่น [7] แต่ด้วยค่าใช้จ่ายในการถือครองที่ต่ำกว่าและสามารถเข้าถึงได้ง่ายกว่า จึงเป็นที่นิยมของกลุ่มนักเรียนนักศึกษาและวัยทำงานเริ่มต้น จึงอาจกล่าวได้ว่าปัจจัยด้านอายุ เพศ และจักรยานยนต์ มีความเกี่ยวเนื่องและเกี่ยวพันกัน

นอกจากนี้จากศึกษาพบว่า การเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เขตชานเมืองหรือเขตชั้นนอกสูงกว่าพื้นที่ชั้นในของกรุงเทพมหานคร ในประเด็นนี้สามารถอธิบายได้ด้วย 2 ประเด็น ได้แก่ 1) พื้นที่ชานเมืองเป็นบริเวณที่โครงข่ายถนนและสภาพการจราจรเอื้อให้ผู้ขับขี่รถยนต์สามารถใช้ความเร็วในการขับขี่ได้มากกว่าโครงข่ายถนนในเมืองจึงก่อให้เกิดอุบัติเหตุที่มีความรุนแรงได้มากกว่า ประกอบกับโครงข่ายถนนบางพื้นที่มีสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการขับขี่ยานพาหนะ เช่น มีสภาพผิวจราจรที่ชำรุด หรือ ระบบไฟฟ้าส่องสว่างไม่เพียงพอ ซึ่งอาจเป็นอีกหนึ่งสาเหตุสำคัญของอุบัติเหตุทางถนนโดยเฉพาะในยามค่ำคืน และ 2) จากข้อมูลประชากรรายพื้นที่ของกรุงเทพมหานครพบว่าลักษณะโครงสร้างครัวเรือนของประชากรในพื้นที่ชานเมืองและเขตเมืองชั้นนอกนั้นมีลักษณะเป็นครอบครัวขนาดกลางซึ่งมักมีประชากรในวัยเรียนและวัยเริ่มต้นการทำงานจำนวนมากกว่าพื้นที่ชั้นใน ประกอบกับมีรายได้ครัวเรือนต่อประชากรที่ต่ำกว่าพื้นที่ชั้นในจึงเกื้อหนุนให้เกิดการใช้จักรยานยนต์ในระดับที่สูงกว่า ซึ่งคำอธิบายดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่จำนวนการเสียชีวิตมีความสัมพันธ์กับจำนวนนักเรียนและตลาดในแต่ละเขตพื้นที่โดยให้ค่าสหสัมพันธ์ในระดับที่สูง นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยการถดถอยเชิงพหุคูณพบว่า สมการถดถอยที่สร้างขึ้นสามารถทำนายความสัมพันธ์ได้ในลักษณะที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ที่กล่าวมา สามารถสรุปกลุ่มประชากรที่เป็นกลุ่มเสี่ยงและ

พื้นที่เสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่มีความรุนแรงจนมีผู้เสียชีวิตภายในกรุงเทพมหานครได้ค่อนข้างชัดเจน ซึ่งสามารถนำไปสู่การกำหนดนโยบายหรือมาตรการในการลดการเกิดอุบัติเหตุในส่วนนี้ได้

อย่างไรก็ดี อีกหนึ่งคำถามวิจัยที่สำคัญของการศึกษาค้างนี้ ได้แก่ ผลกระทบจากการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ต่อจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนและคุณลักษณะของอุบัติเหตุทางถนนที่มีผู้เสียชีวิตเกิดขึ้นกลับพบว่า แม้การระบาดของโรคมีผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณการเดินทาง [10] แต่กลับไม่พบความสัมพันธ์หรืออิทธิพลต่อการลดลงของการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในพื้นที่กรุงเทพมหานครอย่างชัดเจนหรือมีนัยสำคัญทางสถิติแต่อย่างใด กล่าวคืออัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในกรุงเทพมหานครยังคงอยู่ในระดับที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแม้การเดินทางในชุมชนจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากการระบาดของโรคและมาตรการควบคุมโรคของรัฐก็ตาม

ยิ่งไปกว่านั้น ปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีความสัมพันธ์ทางสถิติกับการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน ยังคงเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับช่วงก่อนการเกิดการระบาดของโรค กล่าวคือ ผู้เสียชีวิตส่วนใหญ่เป็นเพศชาย ช่วงอายุระหว่าง 16–25 ปี ใช้จักรยานยนต์เป็นยานพาหนะที่เกิดเหตุ และพื้นที่เกิดเหตุส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ชานเมืองและเขตเมืองชั้นนอก และที่น่าสนใจกว่านั้นคือแม้ในบางช่วงเวลาที่เกิดการระบาดของโรคที่รุนแรงและรัฐมีการกำหนดมาตรการควบคุมการระบาดของโรคอย่างเข้มข้นซึ่งรวมถึงการขอความร่วมมือลดการเดินทางในช่วงเวลาพักกลางวันในพื้นที่กรุงเทพมหานคร การเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มประชากรที่เป็นกลุ่มเสี่ยงนั้นมีความไวต่อการมาตรการของรัฐที่ค่อนข้างต่ำ

ข้อค้นพบและความเข้าใจในกลไกของการเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่มีความรุนแรงในกรุงเทพมหานครจากการศึกษาค้างนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำหนดแนวทางการจัดทำนโยบายและยุทธศาสตร์เพื่อการแก้ปัญหาอุบัติเหตุ

ทางถนนในกรุงเทพมหานครในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การกำหนดนโยบายและยุทธศาสตร์ที่มุ่งเป้าไปยัง กลุ่มเป้าหมายที่มีความเฉพาะเจาะจง เช่น กลุ่มประชากร เพศชายช่วงอายุระหว่าง 16-25 ปี กลุ่มผู้ใช้รถจักรยานยนต์ และกลุ่มผู้อยู่อาศัยในพื้นที่ชานเมือง ซึ่งพบว่าประชากรในกลุ่มนี้มีความรู้และการปรับตัวต่อมาตรการของรัฐที่ค่อนข้างต่ำกว่าประชากรในกลุ่มอื่นๆ

แม้ว่าผลสรุปของการศึกษานี้จะค่อนข้างมีความชัดเจนในทางสถิติ อย่างไรก็ตามการศึกษายังมีขอบเขตและข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่พื้นที่ศึกษาซึ่งถูกจำกัดเพียงพื้นที่ของ กรุงเทพมหานครเท่านั้น ขณะที่ในความเป็นจริงแล้ว กรุงเทพมหานครเป็นชุมชนขนาดใหญ่และพื้นที่ที่ชุมชนต่อเนื่องกับจังหวัดปริมณฑลโดยรอบ รวมถึงการศึกษาในครั้งนี้ยังมีข้อจำกัดในการเข้าถึงข้อมูลเชิงลึกต่างๆ ยกตัวอย่าง เช่น ปริมาณการจราจรทางถนนย้อนหลังในช่วงก่อนการระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะบนถนนในแต่ละเขตการปกครอง ดังนั้นข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคตจึงได้แก่การขยายขอบเขตพื้นที่ศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่ชุมชนในจังหวัดข้างเคียง รวมถึงพื้นที่ศึกษาในชุมชนเมืองภูมิภาคขนาดใหญ่ที่สำคัญเพิ่มเติมอีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้สามารถเห็นภาพสถานการณ์ของการเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่มีความรุนแรงชุมชนเมืองของในประเทศไทยได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังอาจนำตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของการเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่มีผู้เสียชีวิตในฐานะข้อมูล ควบคู่ไปกับแบบจำลองการถดถอยแบบพหุนามแบบลบที่นิยมใช้ในการคาดการณ์จำนวนอุบัติเหตุ มาใช้ประกอบการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุและปัจจัยเกื้อหนุนการเกิดอุบัติเหตุเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] World Health Organization, "Global status report on road safety 2018," World Health Organization, Geneva, Switzerland, Rep. Summary, July. 8, 2021. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/277370/WHO-NMH-NVI-18.20-eng.pdf>
- [2] N. O-Charoen, "Road Safety Measures Assessment in the case of Wat Bandai Pier - Tha Luang Cement Rong and the Mittraphap Road - Kaeng Khoi Cement Plant," TDRI., Bangkok., Thailand, 2017.
- [3] Road accident death information from the Integrated Road Accident Death Data System (3 bases), Department of disease control, Ministry of Public Health, Jul. 20, 2021. [Online]. Available: <https://data.go.th/dataset/rtdi>.
- [4] *Population mobility during the COVID-19 epidemic*, Ministry of Transport, Feb. 10, 2022. [Online]. <https://datagov.mot.go.th/dataset/covid-19>.
- [5] Google COVID-19 Community Mobility Reports, Google LLC, Feb. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.google.com/covid19/mobility/>.
- [6] DDC COVID-19 Interactive Dashboard, Ministry of Public Health, Jan. 18, 2022. [Online]. <https://ddc.moph.go.th/covid19-dashboard/>.
- [7] Information management and evaluation committee, "Report on the integration of death data from road accidents in Thailand", DDPM. MOI., Bangkok, Thailand, 2010.
- [8] Strategy and Evaluation Department, "Statistical Profile of Bangkok Metropolitan Administration", BMA., Bangkok, Thailand, 2020.
- [9] Policy and Planning Division, "Physical characteristics of road in Bangkok in 2018", BMA., Bangkok., Thailand, 2019.
- [10] K. Su-angka, "A study of young driver behavior that affect the risk of accidents from the motorcycle," Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, Rep. SUT7-704-58-12-44, 2016.
- [11] P. Panket, N. Tantithum, R. Chinkunkitniwat, K. Chanphanit, O. Saplon, R. Toemtor, N. Chaitham, W. Loifa, M. Buakao and S. Phonbun "Promoting the

- introduction of in-patient information (12 files) insurance system information and death certificate to take advantage,” Department of Disease control, Division of Non Communicable Disease, Nonthaburi , Thailand, Final Rep., 2010.
- [12] T. Jinwong, “Road Accidents, the “Silent Threat” That is Challenging to Deal with,” *Journal of Emergency Medical Services of Thailand*, vol.1, no.1, pp. 71–76, 2021.
- [13] S. Baral and K. Kanitpong, “Factors Affecting the severity of motorcycles accidents and casualties in Thailand by using probit and logit model,” *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 11, pp. 2175–2188, 2015, doi: 10.11175/easts.11.2175.
- [14] K. Nimtrakool, “Why is Thailand the worst traffic accident in the world?” *sdgmove.com.*, <https://www.sdgmove.com/2021/05/15/sdg-insights-road-safety-thailand/>. (accessed: July. 14, 2022).
- [15] D. E. Hinkle, W. Wiersma and S. G. Jurs, “Correlation: a measure of relationship,” in *Applied statistics for the behavioral sciences*, 5th ed. Boston, MA: Houghton Mifflin, 1988, ch. 6, sec. 1, pp. 104–107.

ผลของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสจากก้านกะหล่ำดอกต่อการกำจัดไดโคฟอล

Effects of Peroxidase Enzyme from Cauliflower Stems on Dicofol Removal

วรรณิกา ชัยประสพผล¹, โสภิตา ดวงจันทร์¹, สุพัฒน์พงษ์ มัตราช¹, วิภาดา เดชะปัญญา¹, เทียมมะณีรัตน์วีระพันธ์¹,
สมภพ สนองราษฎร์¹ และ กรรณิการ์ รัตนพงศ์เลขา^{1,*}

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

Wannika Chiaprasobphon¹, Sopita Dongjan¹, Supatpong Mattaraj¹, Wipada Dechapanya¹, Tiammanee

Rattanaweerapan¹, Sompop Sanongraj¹ and Karnika Ratanapongleka^{1,*}

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

*Corresponding Author E-mail: karnika.r@ubu.ac.th

Received: Apr 08, 2022; Revised: Aug 10, 2022; Accepted: Aug 16, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดไดโคฟอลโดยใช้เพอร์ออกซิเดสสกัดจากก้านกะหล่ำดอก สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดไดโคฟอลที่ได้นำมาทดสอบ ได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์ ความเข้มข้นไดโคฟอล ค่าพีเอชของสารละลาย อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไดโคฟอล ความเข้มข้นของเพอร์ออกซิเดส ค่าพีเอชของสารละลาย อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไดโคฟอล โดยสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาครั้งนี้คือใช้เพอร์ออกซิเดสความเข้มข้น 0.126 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ไดโคฟอลที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์ สามารถกำจัดไดโคฟอลได้ 94% ที่เวลา 6 ชั่วโมง ผลข้างต้นถูกนำมาใช้คำนวณสัดส่วนปริมาณไดโคฟอลที่ถูกกำจัดต่อหน่วยของเพอร์ออกซิเดสพบว่าเพอร์ออกซิเดส 1 ยูนิต สามารถกำจัดไดโคฟอลได้ 0.104 มิลลิกรัม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสมีประสิทธิภาพในการกำจัดไดโคฟอลและสามารถนำผลการศึกษานี้ไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ต่อไปได้

คำสำคัญ: เพอร์ออกซิเดส, ไดโคฟอล, ก้านกะหล่ำดอก, ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์, เอนไซม์

Abstract

This research aims to investigate dicofol removal by peroxidase extracted from cauliflower stem. The factors affecting dicofol removal such as concentration of the enzyme, dicofol concentration, pH value of the solution, temperature and concentration of hydrogen peroxide were tested. The results showed that changing in the enzyme concentration, the concentration of dicofol, the pH value of the solution, the temperature and the concentration of hydrogen peroxide affected the efficiency of dicofol removal. The optimum condition for removal in this study was peroxidase concentration 0.126 U/mL, dicofol 1 mg/L, the pH of the solution at 7, 30 °C and 1 mM hydrogen peroxide. The efficiency of dicofol removal was 94% at 6 h. The above results were used to calculate the amount of dicofol removed per unit of peroxidase and found

that 1 unit of peroxidase was able to remove 0.104 mg of dicofol. Therefore, it can be concluded that peroxidase is effective in removing dicofol and the results of this study can be used as a fundamental data for further application.

Keywords: Peroxidase, Dicofol, Cauliflower Stem, Hydrogen Peroxide, Enzyme

1. บทนำ

ไดโคฟอล (Dicofol) หรือเรียกว่า 2,2,2-trichloro-1,1 bis (4-chlorophenyl) ethanol เป็นสารกำจัดศัตรูพืชพวกหนอน เฟล็ก และแมลงต่าง ๆ นิยมนำมาใช้กับผลไม้ตระกูลส้ม พืชสวน หลากชนิด ใบชา รวมถึงไม้ดอกและไม้ประดับ [1],[2] ไดโคฟอลจัดอยู่ในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน มีส่วนประกอบของ ไฮโดรเจน คาร์บอน ออกซิเจน และคลอรีน [3] ถึงแม้ว่าสารชนิดนี้จะเป็นพิษเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิตต่ำแต่สามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้เป็นเวลานานและถูกดูดซับกับอนุภาคดินได้ดี เมื่อหน้าดินถูกชะด้วยน้ำจะทำให้เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำและอาจพบการสะสมของไดโคฟอลในชั้นไขมันของสัตว์น้ำเนื่องจากมีคุณสมบัติละลายได้ดีในไขมัน การสะสมของสารนี้ในสิ่งแวดล้อมสามารถส่งผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันในสิ่งมีชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ การทำงานของต่อมไร้ท่อ ทำลายระบบประสาท และก่อให้เกิดมะเร็ง [4-6] การลดความเป็นพิษและผลกระทบของไดโคฟอลจึงมีความสำคัญ

การฟื้นฟูและปรับสภาพดินและแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในพื้นที่การเกษตรโดยใช้วิธีการทางชีวภาพทำให้สภาพแวดล้อมเกิดการฟื้นตัวมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้จุลินทรีย์พวกแบคทีเรีย [7] เชื้อรา [8],[9] และจุลินทรีย์สาหร่าย [10] ในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อม และสามารถช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกได้ พร้อมทั้งสามารถลดความเป็นพิษและโทษที่เกิดจากการตกค้างของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในสิ่งแวดล้อมและเป็นผลดีในเชิงเศรษฐศาสตร์ เพราะวิธีทางชีวภาพเป็นวิธีการย่อยสลายสารพิษที่มีราคาถูกปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่การใช้จุลินทรีย์นี้จะต้องทำการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีนได้และจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพการทำงาน สภาพแวดล้อมการเจริญที่ต่างกัน จึงทำให้เกิดความยุ่งยาก ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้าง

สูงในขั้นตอนการคัดเลือกเพื่อจะได้จุลินทรีย์ที่ต้องการมาใช้ในวิธีดังกล่าว

อย่างไรก็ตามนอกจากกระบวนการทางชีวภาพที่ใช้จุลินทรีย์แล้ว การใช้เอนไซม์ซึ่งเป็นตัวเร่งทางชีวภาพ โดยเฉพาะเอนไซม์ในกลุ่มไฮโดรเลส กลุ่มออกซิโดรีดักเทส และกลุ่มทรานสเฟอเรส พบว่าสามารถนำมาย่อยสลายสารพิษในธรรมชาติได้เป็นอย่างดี [11] การใช้เอนไซม์จึงถูกจัดเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าจะนำมาใช้ในการกำจัดสารดังกล่าวได้นอกจากนี้เอนไซม์ยังมีคุณสมบัติที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารตั้งต้น เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว ไม่เกิดปฏิกิริยารุนแรงง่ายต่อการจัดการ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และจากการค้นคว้าพบว่าเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) เป็นเอนไซม์ในกลุ่มออกซิโดรีดักเทส สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และออกซิไดซ์ซับสเตรทที่ให้อิเล็กตรอนได้หลายชนิดทั้งในกลุ่มสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ [12] จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการนำเพอร์ออกซิเดสไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร เกษตรกรรม และการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม [13],[14] แต่ยังไม่พบว่ามีงานวิจัยใดนำเพอร์ออกซิเดสไปใช้กับสารกำจัดศัตรูพืชชนิดไดโคฟอล ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะทดสอบผลของเพอร์ออกซิเดสที่มีต่อการกำจัดไดโคฟอล

เพอร์ออกซิเดสถูกพบในสิ่งมีชีวิตหลากหลายชนิดทั้งในสัตว์พืช และจุลินทรีย์ [13] เพอร์ออกซิเดสที่สกัดได้จากพืชฮอระดิส (Horseradish) นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากลักษณะสมบัติและการทำงานที่ดี แต่หากต้องนำมาใช้งานในปริมาณมากในประเทศไทยอาจไม่เหมาะสมเนื่องจากมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เพอร์ออกซิเดสที่สกัดจากก้านกะหล่ำดอก เนื่องจากเป็นพืชที่หาได้ง่ายและเป็นการนำของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์เนื่องจากก้านกะหล่ำเป็นส่วนที่

ไม่นิยมนำมาบริโภค โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาการกำจัดไดโคพอลด้วยเพอร์ออกซิเดสแบบหยาบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเพอร์ออกซิเดส ความเข้มข้นของไดโคพอล ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย อุณหภูมิและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ เช่น สารไดโคพอลบริสุทธิ์ ($C_{14}H_9Cl_5O$) เมทานอล (Methanol, CH_3OH) (เกรดสำหรับวิเคราะห์ HPLC $\geq 99.9\%$) และสารวิเคราะห์ค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ได้แก่ กัวไอเอคอล (Guaiacol, $C_7H_8O_2$) และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนสารเคมีที่ใช้เตรียมบัฟเฟอร์จากบริษัท AppliChem ประเทศเยอรมัน

2.2 การเตรียมเพอร์ออกซิเดสหยาบ

แหล่งของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสที่ใช้ในการศึกษานี้ได้จากก้านของกะหล่ำดอก ประเภทสายพันธุ์เบา ซึ่งนิยมปลูกและบริโภคในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การเตรียมเอนไซม์ทำโดยนำก้านกะหล่ำดอก 1000 กรัม มาล้างด้วยน้ำสะอาด ตัดเป็นชิ้นเล็กนำไปผ่านเครื่องสกัดน้ำผลไม้แบบแยกกากและกรองด้วยผ้าขาวบาง นำส่วนที่เป็นของเหลวไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เพื่อแยกเศษตะกอนอีกครั้ง ส่วนใสที่ได้คือเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสหยาบ เมื่อนำมาตรวจวิเคราะห์ค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์มีค่าเท่ากับ 0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตร เอนไซม์สกัดที่ได้ถูกนำไปแช่แข็งเพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของเอนไซม์ให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดที่อุณหภูมิ -20 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป และก่อนทำการทดลองจะมีการตรวจสอบค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์เริ่มต้นทุกครั้ง

2.3 การกำจัดไดโคพอลด้วยเพอร์ออกซิเดสในชุดทดลองแบบเบดซ์

การศึกษาการกำจัดไดโคพอลด้วยเพอร์ออกซิเดสในชุดทดลองแบบเบดซ์ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 500

มิลลิลิตร โดยเติมสารละลายไดโคพอล 280 มิลลิลิตร และเอนไซม์ 20 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองที่เวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง โดยผลการทดลองที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดจากการทำชุดทดลอง 2 ชุด มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่ากลางน้อยกว่าร้อยละ 10 สำหรับปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยความเข้มข้นของเอนไซม์ ความเข้มข้นของไดโคพอล ค่าพีเอชของสารละลาย อุณหภูมิ และเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ทำการศึกษาแต่ละปัจจัยตามลำดับ โดยนำผลการศึกษาค่าที่ดีที่สุดปัจจัยนั้นมาใช้สำหรับทดลองปัจจัยถัดไป สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาแต่ละปัจจัยมีดังนี้

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.014, 0.030, 0.060 และ 0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตรโดยใช้สารละลายไดโคพอล 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์ และมีการเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ใช้เอนไซม์เสื่อมสภาพการทำงาน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณไดโคพอลในสารละลายที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เพอร์ออกซิเดสความเข้มข้น 0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายไดโคพอล 5–9 โดยที่พีเอช 5 ใช้อะซิเตตบัฟเฟอร์ พีเอช 6–7 ใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และพีเอช 8–9 ใช้ทริสไฮโดรคลอไรด์บัฟเฟอร์ ความเข้มข้นเพอร์ออกซิเดสควบคุมที่ 0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตร ปริมาณไดโคพอล 1 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 20–60 องศาเซลเซียส และการศึกษาความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 0.25–1.50 มิลลิโมลาร์ ใช้เพอร์ออกซิเดสความเข้มข้น 0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตร ปริมาณไดโคพอล 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 7

2.4 การตรวจวิเคราะห์โคโคพอลและกิจกรรมการทำงานของเพอร์ออกซิเดส

การวิเคราะห์ปริมาณโคโคพอลด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography, HPLC) (VP 10AVP, Shimadzu, Japan) โดยใช้คอลัมน์ C18 (7.8 × 300 มิลลิเมตร) และเครื่องตรวจจับชนิดยูวี (UV detector) ที่ความยาวคลื่น 229 นาโนเมตร ตามวิธีของ Qiu et al., [15] โดยละลายโคโคพอลด้วยเมทานอลเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ที่ใช้คือเมทานอลต่อน้ำปราศจากประจุอัตราส่วน 80:20 โดยปริมาตร อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่เท่ากับ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ 20 ไมโครลิตร อุณหภูมิที่สภาวะการวิเคราะห์ 28 ± 3 องศาเซลเซียส

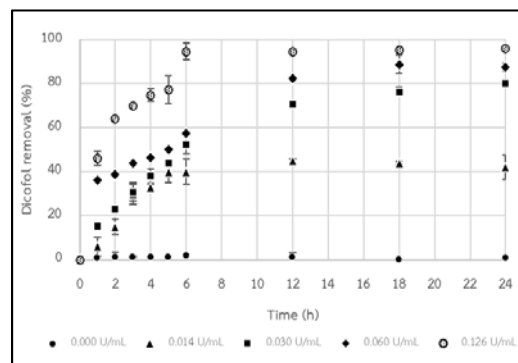
การวิเคราะห์ค่ากิจกรรมการทำงานของเพอร์ออกซิเดสตามวิธีของ Lakshmi [16] โดยนำเอนไซม์สกัดมาทำปฏิกิริยากับ 18 มิลลิโมลาร์ ถั่วไอเอคอลลซึ่งเป็นสารสับสเตรทร่วมกับร้อยละ 0.05 ของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ใน 0.1 โมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ วัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet-visible spectroscopy) (UV 1204, Shimadzu, Japan) ที่ความยาวคลื่น 436 นาโนเมตร โดยกำหนดให้ค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส 1 หน่วย หมายถึงปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้เร่งการเปลี่ยน 1 ไมโครโมลของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ภายใต้สภาวะที่ใช้ทดสอบ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลของความเข้มข้นเพอร์ออกซิเดสต่อโคโคพอล

เอนไซม์เพอร์ออกซิเดสที่สกัดจากถั่วเหลืองสำหรับการทดลองนี้มีค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์เท่ากับ 0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตร เมื่อนำเอนไซม์ดังกล่าวมาทำการเจือจางที่ระดับต่างกันได้ความเข้มข้นในช่วง 0.014–0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตร และทำปฏิกิริยากับโคโคพอล ผลการศึกษา (รูปที่ 1) พบว่าการกำจัดโคโคพอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น โดยเพอร์ออกซิเดสที่ 0.126 หน่วยต่อมิลลิลิตร สามารถกำจัดโคโคพอลได้อย่างรวดเร็วในช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการทำปฏิกิริยา หลังจากนั้นค่าการกำจัดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อทำปฏิกิริยาจนครบ 24 ชั่วโมง สามารถกำจัดโคโคพอลได้ร้อยละ 94 สำหรับความ

เข้มข้นของเพอร์ออกซิเดสที่ 0.030 และ 0.060 หน่วยต่อมิลลิลิตรสามารถกำจัดโคโคพอลได้อย่างรวดเร็วในช่วง 12 ชั่วโมงแรกของการทำปฏิกิริยา หลังจากนั้นค่าการกำจัดยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อทำปฏิกิริยาจนครบ 24 ชั่วโมง สามารถกำจัดโคโคพอลได้ในช่วงร้อยละ 80 และ 88 ตามลำดับ ในขณะที่เพอร์ออกซิเดส 0.014 หน่วยต่อมิลลิลิตรให้ค่าการกำจัดลดลงเพียงเล็กน้อยหลัง 12 ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ใช้เอนไซม์ที่ถูกทำให้เสื่อมสภาพ โดยก่อนการทดลองนำเอนไซม์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที) พบว่าความเข้มข้นของโคโคพอลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

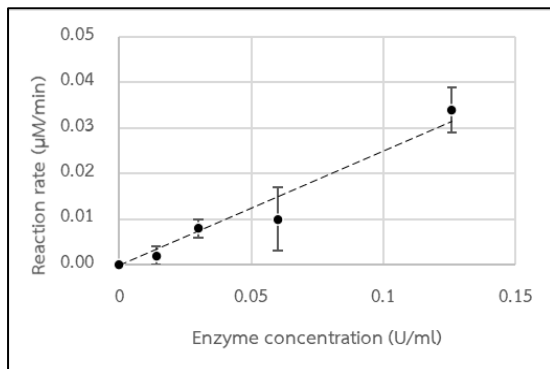


รูปที่ 1 การกำจัดโคโคพอลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเพอร์ออกซิเดส

จากผลการศึกษาข้างต้นอภิปรายได้ว่าการใช้เอนไซม์ที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมหรือมีความเข้มข้นที่มากพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้มาก แต่เมื่อเอนไซม์ลดลงความสามารถในการจับกับสารตั้งต้นจะน้อยลง การเกิดปฏิกิริยาลงไปด้วย ส่วนในบางกรณีที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นแต่ผลการทำงานของเอนไซม์ลดลงอาจเป็นผลมาจากเสถียรภาพการทำงานของเอนไซม์ลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ที่มีต่อการทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นและมีทิศทางที่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้คือ การใช้เพอร์ออกซิเดสจากถั่วเหลืองความเข้มข้น 0.05–0.6 หน่วยต่อมิลลิลิตร ถูกนำไปใช้กำจัดสีแอนทราควิโนน พบว่าเมื่อใช้เอนไซม์ที่ 0.05–0.2 หน่วยต่อมิลลิลิตร ทำให้แนวโน้มการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อเอนไซม์เพิ่มขึ้น และให้ค่าการกำจัดที่ดีที่สุด

ร้อยละ 88.39 แต่เมื่อเพิ่มเอนไซม์ที่ 0.4-0.6 ยูนิต์ต่อมิลลิลิตร พบว่าการกำจัดที่เกิดขึ้นลดลงเล็กน้อย [17]

เมื่อพิจารณาถึงอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเทียบกับเวลา (รูปที่ 2) พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาแปรผัน โดยตรงกับการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์

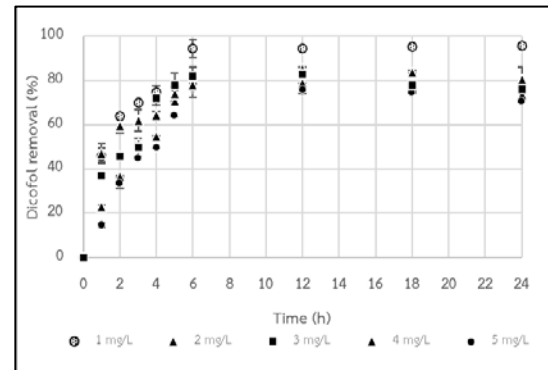


รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นเพอร์ออกซิเดสต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

3.2 ผลของความเข้มข้นไดโคพอล

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไดโคพอลส่งผลต่อการกำจัดไดโคพอลด้วยเพอร์ออกซิเดส (รูปที่ 3) ความเข้มข้นของไดโคพอลที่เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มการกำจัดลดลง ไดโคพอลที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าการกำจัดที่ดีที่สุดร้อยละ 94 ที่เวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นแนวโน้มการกำจัดจะเริ่มคงที่ ส่วนความเข้มข้นของไดโคพอลที่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร การกำจัดเกิดได้ดีที่สุดที่เวลา 12 ชั่วโมง โดยพบว่าไดโคพอลที่ความเข้มข้น 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าร้อยละการกำจัดเท่ากับ 85, 83, 78 และ 76 ตามลำดับ จะเห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นไดโคพอลส่งผลให้การกำจัดเกิดได้ช้าลง ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นของเพอร์ออกซิเดสที่มีอยู่ในระบบมีไม่เพียงพอต่อการเข้าทำปฏิกิริยากับไดโคพอลที่เพิ่มขึ้น หรืออาจเกิดจากสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการทำปฏิกิริยาระหว่างเพอร์ออกซิเดสกับไดโคพอลไปขัดขวางการทำงานของเพอร์ออกซิเดส ทำให้ไม่สามารถจับกับไดโคพอลได้ดีเหมือนเดิม และเมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นที่ลดลงของไดโคพอลมาคำนวณหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาพบว่ามีค่าต่างกันไม่มาก (อยู่

ในช่วง 0.034–0.054 ไมโครโมลาร์ต่อนาที) เนื่องจากความเข้มข้นของไดโคพอลที่ใช้แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงทำให้มีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่ของมิเคลลิส-เมนเทน (K_m) ได้

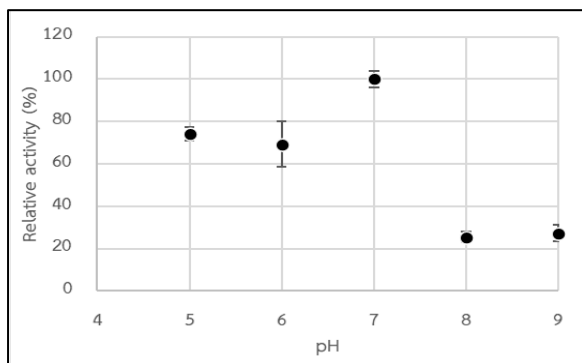


รูปที่ 3 การกำจัดไดโคพอลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไดโคพอล

3.3 ผลของความเป็นกรดต่างของสารละลายไดโคพอล

ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายไดโคพอลส่งผลต่อการทำปฏิกิริยากับเพอร์ออกซิเดส และจากการศึกษาคุณลักษณะทั่วไปของเพอร์ออกซิเดสจากแหล่งต่างกันและทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นต่างชนิดพบว่าสามารถทำงานได้ดีที่ค่าพีเอชของสารละลายต่างกัน เช่น ค่าพีเอชที่เหมาะสมของเพอร์ออกซิเดสจากมะระขี้นกเท่ากับ 5 [18] จากผักกาดหัวสีแดงเท่ากับ 7 [19] จากจมูกข้าวสาลีอยู่ในช่วง 5.3–6.3 [20] และจากถั่วฝักยาวเท่ากับ 5 [21] จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าเพอร์ออกซิเดสทำงานได้ดีในช่วงพีเอช 5–7 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกช่วงดังกล่าวมาทดสอบการทำงานของเพอร์ออกซิเดส กับ สารละลายไดโคพอล ผลการศึกษาแสดงในรูปของกิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์ของเอนไซม์กับค่าพีเอช (รูปที่ 4) โดยที่พีเอช 7 มีค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์อยู่ที่ร้อยละ 100 สำหรับที่พีเอช 5 และ 6 มีค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 74 และ 70 ตามลำดับ และพบว่าค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์ลดลงอย่างรวดเร็ว (ต่ำกว่าร้อยละ 30) เมื่อสารละลายมีพีเอชสูงกว่า 7 จากผลการศึกษานี้กล่าวได้

ว่าเพอร์ออกซิเดสสามารถทำปฏิกิริยากับไดโคพอลได้ดีที่สุดที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 เมื่อเพิ่มหรือลดค่าพีเอชส่งผลให้การทำงานของเอนไซม์ลดลง เนื่องจากเอนไซม์จะจับกับสารตั้งต้นที่บริเวณเร่ง (active site) ของเอนไซม์ ความสามารถในการจับกันและการเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นกับความสมดุลของประจุที่บริเวณเร่งรวมถึงประจุของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยด้วย ดังนั้นเมื่อเอนไซม์อยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่าค่าพีเอชของเอนไซม์ชนิดนั้นจะส่งผลให้ประจุของเอนไซม์ที่บริเวณเร่งเกิดการเปลี่ยนแปลง จนสารตั้งต้นไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ หรืออาจทำปฏิกิริยาได้น้อยลง นอกจากนี้ค่าพีเอชที่สูงมากหรือต่ำมากอาจส่งผลต่อโครงสร้างของเอนไซม์ทำให้เกิดการเสียสภาพการทำงานได้

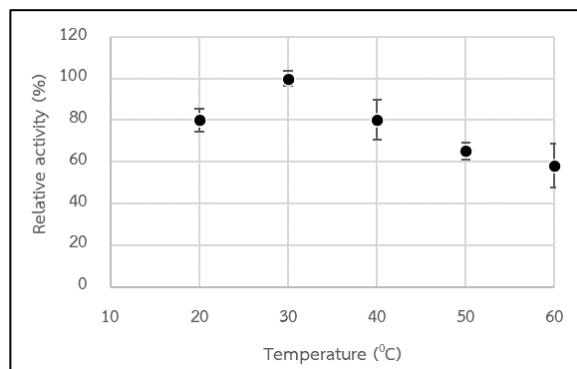


รูปที่ 4 ค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์ของเพอร์ออกซิเดสกับค่าพีเอช

3.4 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเพอร์ออกซิเดส ร่วมกับไดโคพอล (รูปที่ 5) ถูกนำเสนอในรูปแบบของค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์ซึ่งคำนวณได้จากร้อยละของค่าการกำจัดไดโคพอลที่เกิดขึ้นของแต่ละอุณหภูมิเทียบกับการกำจัดที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ดีที่สุด ผลการศึกษพบว่าอุณหภูมิในช่วง 20-30 องศาเซลเซียส มีค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 30 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกำจัดไดโคพอลคือ 30 องศาเซลเซียส เมื่อนำเอนไซม์ไปประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิแตกต่างจากนี้ (20-60 องศาเซลเซียส) จะทำให้

สามารถทราบได้ว่าการทำงานของเอนไซม์ต่อการกำจัดไดโคพอลจะลดลงมากน้อยเพียงใดเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และในผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจากจุดนี้ไปส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยให้โมเลกุลของสารในปฏิกิริยานั้นเกิดการเคลื่อนที่และชนกันมากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีขึ้น แต่เนื่องจากเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนโปรตีน การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงเนื่องจากโครงสร้างของเอนไซม์ถูกทำให้เปลี่ยนสภาพไป ส่งผลให้สารตั้งต้นอาจเข้าจับกับเอนไซม์ได้น้อยลงหรืออาจเข้าจับไม่ได้เลยหากเกิดการเสียสภาพของเอนไซม์ (enzyme denaturation)

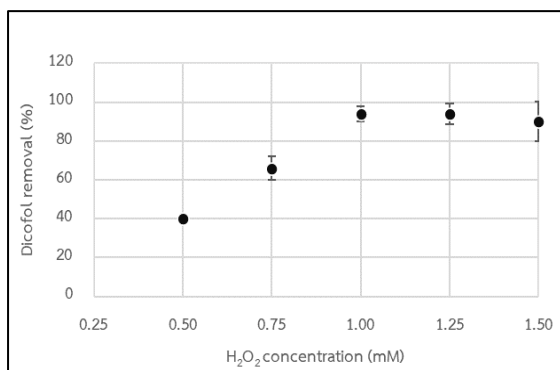


รูปที่ 5 ค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์ของเพอร์ออกซิเดสกับอุณหภูมิ

3.5 ผลของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

ผลการศึกษาค่าการกำจัดไดโคพอลด้วยเพอร์ออกซิเดส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ที่ 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 มิลลิโมลาร์ แสดงในรูปที่ 6 การเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ จาก 0.50 มิลลิโมลาร์ ถึง 1.00 มิลลิโมลาร์ ส่งผลให้ค่าการกำจัดไดโคพอลมีแนวโน้มสูงขึ้น และที่ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ และ 1.25 มิลลิโมลาร์ จะให้ค่าการกำจัดไดโคพอลสูงสุดและมีค่าเท่ากันคือร้อยละ 94 ส่วนที่ความเข้มข้น 1.50 มิลลิโมลาร์ พบว่าค่าการกำจัดลดลงเหลือร้อยละ 90 สำหรับชุดควบคุม (ไม่เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ในปฏิกิริยา) พบว่าไม่สามารถ

กำจัดไดโคฟอลได้ จากผลการศึกษานี้สามารถอธิบายได้ว่า ปกติแล้วไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้เกิด $\text{OH}^\cdot$ ขึ้น โดย $\text{OH}^\cdot$ ที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับไดโคฟอลและมีเปอร์ออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ความเข้มข้นของไดโคฟอลลดลง ปกติแล้วเปอร์ออกซิเดสจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) และออกซิไดส์สับสเตรทที่ให้อิเล็กตรอน แต่ถ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มากเกินไป จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับ $\text{OH}^\cdot$ เกิดเป็นน้ำและสารผลิตภัณฑ์อื่น ($\text{HO}_2^\cdot$) ส่งผลให้ความเข้มข้นของ $\text{OH}^\cdot$ ลดลง การไปทำปฏิกิริยากับไดโคฟอลจึงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงไปด้วย จึงกล่าวได้ว่าการเลือกใช้ความเข้มข้นของเปอร์ออกซิเดสที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำงานของเปอร์ออกซิเดส ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการศึกษาในประเด็นนี้ เช่น การนำเปอร์ออกซิเดสที่สกัดจากเปลือกมันฝรั่งและถั่วเหลืองมากำจัดสีข้อม โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ 0.1–1.0 มิลลิโมลาร์ พบว่าเปอร์ออกซิเดสจากทั้งสองแหล่งมีประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพิ่มขึ้นและดีที่สุดที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ [17] และเมื่อนำมากำจัดคลอโรฟีนอลพบว่าการใช้เปอร์ออกซิเดสที่ความเข้มข้นต่ำหรือสูงกว่า 1 มิลลิโมลาร์ ส่งผลให้การทำงานของเอนไซม์ลดลง [22] ในขณะที่ [23] พบว่าเปอร์ออกซิเดสจากฮอสเรดิซทำงานได้ดีเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 6 การกำจัดไดโคฟอลกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4. สรุปผลการศึกษา

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเปอร์ออกซิเดส ความเข้มข้นของไดโคฟอล ความเป็นกรด่างของสารละลาย อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของเปอร์ออกซิเดสต่อการกำจัดไดโคฟอล โดยสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษานี้พบว่า การใช้เปอร์ออกซิเดส 0.126 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ไดโคฟอล 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์ สามารถกำจัดไดโคฟอลได้ร้อยละ 94 ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งหากนำผลการศึกษาดังกล่าวมาคำนวณในเชิงปริมาณไดโคฟอลที่ถูกกำจัดต่อหน่วยของเปอร์ออกซิเดสที่ใช้ พบว่าไดโคฟอลปริมาณ 0.104 มิลลิกรัม ถูกกำจัดภายในเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อใช้เปอร์ออกซิเดส 1 ยูนิต อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ในส่วนค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น รวมถึงการศึกษาอัตราการย่อยสลายไดโคฟอลด้วยเปอร์ออกซิเดสและทดสอบความเป็นพิษที่เกิดขึ้นหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา ควรมีการดำเนินการเพิ่มเติมในอนาคต เมื่อผลการศึกษานี้สามารถที่จะนำเอนไซม์ไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยอาจนำไปใช้ในรูปแบบของการพ่นเอนไซม์ที่อยู่ในรูปของสารละลายนี้ลงในบริเวณพื้นที่เพาะปลูกที่มีการปนเปื้อนของไดโคฟอลโดยตรง หรือหากใช้กับแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนสารดังกล่าวอาจใช้เอนไซม์ในรูปแบบตรึงกับเยื่อกรองหรือตัวกลางต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมด้วยต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. R. Mourer, G. L. Hall, W. E. Whitehead, T. Shibamoto, L. R. Shull and S. E. Schwarzbach, "Chromatographic determination of dicofol and

- metabolites in egg yolks,” *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 19, no. 1, pp. 154–156, 1990, doi: 10.1007/bf01059825.
- [2] X. Yang, S. Wang, Y. Bian, F. Chen, G. Yu, C. Gu and X. Jiang, “Dicofol application resulted in high DDTs residue in cotton fields from northern Jiangsu province, China,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 150, no. 1, pp. 92–98, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.076.
- [3] A. H. Neilson, “An environmental perspective on the biodegradation of organochlorine xenobiotics,” *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 37, no. 1, pp. 3–21, 1996, doi: 10.1016/0964-8305(95)00092-5.
- [4] J. Zhang, H. Yan, T. Yang and Y. Zong, “Removal of dicofol from water by immobilized cellulase and its reaction kinetics,” *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 1, pp. 53–58, 2011, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.08.008.
- [5] F. Wang, X. Zhang, C. Huangfu, M. Zhu, C. Li and L. Feng, “The BODIPY-based chemosensor for the fluorometric determination of organochlorine pesticide dicofol,” *Food Chemistry*, vol. 370, 2022, Art. no. 131033, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131033.
- [6] J. -Z. Yang, Z. -X. Wang, L. -H. Ma, X. -B. Shen, Y. Sun, D. -W. Hu and L. -X. Sun, “The organochlorine pesticides residues in the invasive ductal breast cancer patients,” *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 40, no. 3, pp. 698–703, 2015, doi: 10.1016/j.etap.2015.07.007.
- [7] N. Gaur, K. Narasimhulu, and P. Y, “Recent advances in the bio-remediation of persistent organic pollutants and its effect on environment,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 198, pp. 1602–1631, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.076.
- [8] A. A. Sari, S. Tachibana and K. Itoh, “Determination of co-metabolism for 1,1,1-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl) ethane (DDT) degradation with enzymes from *Trametes versicolor* U97,” *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 114, no. 2, pp. 176–181, 2012, doi: 10.1016/j.jbiosc.2012.03.006.
- [9] R. Zhuo and F. Fan, “A comprehensive insight into the application of white rot fungi and their lignocellulolytic enzymes in the removal of organic pollutants,” *Science of The Total Environment*, vol. 778, 2021, Art. no. 146132, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146132.
- [10] J. Nie, Y. Sun, Y. Zhou, M. Kumar, M. Usman, J. Li, J. Shao, L. Wang and D. C. W. Tsang, “Bioremediation of water containing pesticides by microalgae: Mechanisms, methods, and prospects for future research,” *Science of The Total Environment*, vol. 707, 2020, Art. no. 136080, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136080.
- [11] A. Saravanan, P. S. Kumar, D. -V. N. Vo, S. Jeevanantham, S. Karishma and P. R. Yaashikaa, “A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: Microbial enzymes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 419, 2021, Art. no. 126451, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126451.
- [12] Q. Chang, J. Huang, Y. Ding and H. Tang, “Catalytic oxidation of phenol and 2,4-Dichlorophenol by using horseradish peroxidase immobilized on graphene oxide/Fe₃O₄,” *Molecules*, vol. 21, no. 8, 2016, Art. no. 1044, doi: 10.3390/molecules21081044.
- [13] M. Hamid and R. Khalil ur, “Potential applications of peroxidases,” *Food Chemistry*, vol. 115, no. 4, pp. 1177–1186, 2009, doi: 10.1016/j.foodchem.2009.02.035.
- [14] K. Sellami, A. Couvert, N. Nasrallah, R. Maachi, M. Abouseoud, and A. Amrane, “Peroxidase enzymes as

- green catalysts for bioremediation and biotechnological applications: A review,” *Science of The Total Environment*, vol. 806, 2022, Art. no. 150500, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150500.
- [15] X. Qiu, T. Zhu, B. Yao, J. Hu and S. Hu, “Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China,” *Environmental Science & Technology*, vol. 39, no. 12, pp. 4385–4390, 2005, doi: 10.1021/es050342a.
- [16] M. C. Lakshmi and K. S. M. S. Raghavarao, “Downstream processing of soy hull peroxidase employing reverse micellar extraction,” *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 15, pp. 937–945, 2010, doi: 10.1007/s12257-010-0071-6.
- [17] M. Svetozarević, N. Šekuljica, A. Onjia, N. Barać, M. Mihajlović, Z. Knežević-Jugović and D. Mijin, “Biodegradation of synthetic dyes by free and cross-linked peroxidase in microfluidic reactor,” *Environmental Technology & Innovation*, vol. 26, 2022, Art. no. 102373, doi: 10.1016/j.eti.2022.102373.
- [18] A. Fatima and Q. Husain, “Purification and Characterization of a Novel Peroxidase from Bitter Gourd (*Momordica charantia*),” *Protein & Peptide Letters*, vol. 15, no. 4, pp. 377–384, 2008, doi: 10.2174/092986608784246452.
- [19] S. S. Kim and D. J. Lee, “Purification and characterization of a cationic peroxidase Cs in *Raphanus sativus*,” *Journal of Plant Physiology*, vol. 162, no. 6, pp. 609–617, 2005, doi: 10.1016/j.jplph.2004.10.004.
- [20] C. Billaud, L. Louarme and J. Nicolas, “Comparison of peroxidases from barley kernel (*Hordeum vulgare* L.) and wheat germ (*Triticum aestivum* L.): isolation and preliminary characterization,” *Journal of Food Biochemistry*, vol. 23, no. 2, pp. 145–172, 1999, doi: 10.1111/j.1745-4514.1999.tb00011.x.
- [21] T. Köktepe, S. Altın, H. Tohma, İ. Gülçin and E. Köksal, “Purification, characterization and selected inhibition properties of peroxidase from haricot bean (*Phaseolus vulgaris* L.),” *International Journal of Food Properties*, vol. 20, no. sup2, pp. 1944–1953, 2017, doi: 10.1080/10942912.2017.1360903.
- [22] J. L. Gómez, E. Gómez, J. Bastida, A. M. Hidalgo, M. Gómez and M. D. Murcia, “Experimental behaviour and design model of a continuous tank reactor for removing 4-chlorophenol with soybean peroxidase,” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 47, no. 9, pp. 1786–1792, 2008, doi: 10.1016/j.cep.2007.09.019.
- [23] N. Amini and M. Shamsipur, “Impedimetric mechanism study of horseradish peroxidase at low and high concentrations of hydrogen peroxide based on graphene/sol-gel/horseradish peroxidase,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 123, pp. 677–681, 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.11.091.

อิทธิพลของพารามิเตอร์ในการกัดต่อความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล

Influence of Milling Parameters on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites Applying I-Optimal Experimental Design

ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร^{1,*}, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2} และ ชาตรี หอมเขียว^{1,2}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมืองสงขลา

สงขลา 90000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมือง

สงขลา สงขลา 90000

Chainarong Srivabut^{1,*}, Surasit Rawangwong^{1,2} and Chatree Homkhiew^{1,2}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,

Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

²Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

Received: Jun 02, 2022; Revised: Aug 06, 2022; Accepted: Aug 16, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์กัดต่อความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal) โดยมี 3 ปัจจัยการทดลอง คือ ความเร็วรอบ (220 480 และ 720 รอบ/นาที) อัตราป้อน (200 300 และ 400 มิลลิเมตร/นาที) และระยะป้อนลึก (3 5 และ 7 มิลลิเมตร) ทำการผสมและการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการอัดรีดเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) และกระบวนการอัดร้อน (Hot-Press) ตามลำดับ จากนั้น ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และหาสภาวะของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ซึ่งความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 480 เป็น 720 รอบ/นาที ทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่ออัตราป้อนและความลึกในการตัดลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง นอกจากนี้ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มิลลิเมตร/นาที ความลึกในการตัด 3 มิลลิเมตร ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวด้านข้าง เท่ากับ 2.580 และ 2.790 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 92.33% และ 93.93% ตามลำดับ

คำสำคัญ: กระบวนการกัด, วัสดุเชิงประกอบ, ความขรุขระผิว, ไอ-ออปติมอล, วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

This research is to study the influence of parameters on surface roughness from milling process of wood-plastic composites (WPCs) applying I-Optimal experimental design. Three factors in this study were speed (200, 480, and 720 rpm), feed rate (200, 480, and 720 mm/min), and depth of cut (3, 5, and 7 mm). The WPC specimens were mixed and compressed by twin screw extruder and hot-press, respectively. In addition, the experimental results were analyzed by Analysis of Variance (ANOVA) and optimized using Response Surface Methodology (RSM). The results can be summarized that increased speed resulted in a decrease in surface roughness, which the speed increased from 480 to 720 rpm, causing the surface roughness to be slightly increased. Moreover, it found that the decreased feed and depth of cut resulted in a decrease in surface roughness. The optimum parameter for side and face milling of WPCs was 720 rpm speed, 200 mm/min feed, and 3 mm depth of cut with a surface roughness condition generates of 2.580 μm and 2.790 μm with desirability score of 92.33% and 93.93%, respectively.

Keywords: Milling, Composite Materials, Surface Roughness, I-Optimal Design, Response Surface Methodology

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเครื่องจักรมาใช้แทนแรงงานของคนในอุตสาหกรรมการผลิตมากขึ้นเพราะมีความแม่นยำสูงในการปฏิบัติงาน มีความรวดเร็วในการผลิต และสามารถผลิตงานในปริมาณมากๆ ก่อนที่จะใช้เครื่องจักรในการผลิตนั้นผู้ใช้ต้องดูความเหมาะสมของงานและความสามารถของเครื่องนั้นๆ เพื่อให้เหมาะสมในการใช้งาน เพราะเครื่องจักรที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีหลายประเภท ได้แก่ เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องไส เครื่องเจาะ เป็นต้น [1] หากใช้เครื่องจักรผิดประเภทการใช้งานนั้นจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรหรือชิ้นงานได้ เครื่องกัด (Milling Machine) เป็นเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตที่หลากหลาย และมีความแม่นยำเที่ยงตรงสูง ด้วยการเคลื่อนที่ของใบมีดในทิศทางที่กำหนดให้ชิ้นงานมีรูปทรงที่เป็นไปตามความต้องการของการผลิตและขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการกัด ประกอบด้วย ความเร็วรอบตัด อัตราป้อน ระยะป้อนลึก ขนาดดอกกัด จำนวนคมตัด และชนิดของวัสดุ [2] ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อค่าความขรุขระผิว ค่าความแข็ง ค่าความร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัด โดยเครื่องกัดนี้สามารถกัดวัสดุได้หลายชนิด เช่น เหล็ก อลูมิเนียม และวัสดุเชิงประกอบ เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เริ่มมีการนำมาใช้ทดแทนไม้ในธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ดูดซับความชื้นน้อย ไม่ก่อให้เกิดเชื้อรา ย่อยสลายได้ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ยังสามารถเพิ่มหรือลดความแข็งแรงของวัสดุได้โดยการเติมสารเสริมแรงจำพวกเส้นใยหรือขี้เลื่อยไม้ลงไปในวัสดุเชิงประกอบพลาสติก [3],[4] เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการใช้งาน รวมถึงการขึ้นรูปให้มีขนาดและรูปร่างเป็นไปตามที่ต้องการใช้งานได้ง่ายและยังสามารถนำมาผ่านกรรมวิธีการผลิตได้หลายประเภท เช่น งานกลึง งานกัด งานตัด งานเจาะ เป็นต้น [5] วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ สามารถผลิตได้โดยการนำเส้นใย ผงไม้ หรือขี้เลื่อยมาผสมกับพลาสติก โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) จากนั้นขึ้นรูปวัสดุเหล่านี้ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การอัดรีด (Hot Press) การอัดรีด (Extrusion) หรือการฉีดเข้าเบ้า (Injection Molding) เป็นต้น [6],[7] ซึ่ง WPCs และไม้ที่ผ่านการขึ้นรูปนั้นยังไม่สามารถใช้งานได้ทันทีเนื่องจากยังมีรูปทรงหรือขนาดไม่ตรงกับความต้องการของผู้ผลิต ดังนั้น เพื่อการประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม วัสดุดังกล่าวต้องผ่านกรรมวิธีการผลิตเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างให้เป็นไปตามความต้องการสำหรับการใช้งาน ซึ่งงานกัดเป็นกรรมวิธีการผลิตอย่างหนึ่งที่มีความเหมาะสมและนิยมใช้กันมากในการแปรรูปวัสดุนี้ [8],[9]

จากการศึกษางานวิจัย พบว่า WPCs ที่ผ่านกรรมวิธีการกีดนั้นถูกนำมาใช้ทดสอบค่าความขรุขระผิวโดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวในการกีดนั้น คือ ความเร็วรอบตัด อัตราป้อน ระยะป้อนลึก โดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองและสภาวะที่เหมาะสมในการกีด ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยการนำปัจจัยในการกีดมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบการทดลองแบบ ไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) ซึ่งมีความแตกต่างกับการออกแบบการทดลองวิธีอื่นๆ คือ ได้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ละเอียดและแม่นยำในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการกีดของ WPCs ต่อความขรุขระผิวของวัสดุซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการนำมาใช้งาน

2. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือ จี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) จากบริษัทศรีพุทธตรง พารา กรุ๊ป จำกัด (จังหวัดตรัง ประเทศไทย) ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ก่อนการผสม RWS ถูกนำไปคัดแยกขนาดโดยการร่อนเพื่อให้ได้ขนาด 40 Mesh (400 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที และอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) ผลิตจากบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (จังหวัดระยอง ประเทศไทย) ก่อนการผสม HDPE ถูกนำไปอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [10] จากนั้นทำการชั่งเก็บไว้เพื่อรอการผสม โดยหลังจากการผสม วัสดุที่ใช้ในการทดลองสำหรับการกีด มีขนาด $100 \times 100 \times 40$ มม.³ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานสำหรับการกีด

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องกีดแนวตั้ง ยี่ห้อ Full mark รุ่น FM-18/20 Series (Kaiserslautern, Germany)

2) เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นดอกเอ็นมิล (End Mill) ยี่ห้อ S.A.P. บริษัท เจพีพี แมชชีน แอนด์ ทูลส์ จำกัด (จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. (3 ฟัน) โดยมี Helix Angle คือ 30 องศา ค่า Corner Radius คือ 5 มม. ค่า Overall Length คือ 100 มม. และ ค่า Neck Length คือ 30 มม. ตามลำดับ

3) เครื่องทดสอบความขรุขระผิวยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 จากบริษัท สุมิทสึ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย)

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบการทดลองในรูปแบบ ไอ-ออปติมอล (I-Optimal) และทำการวิเคราะห์เพื่อพยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) [4],[11] โดยใช้อัตราส่วนผสมของ WPCs คือ RWS ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (wt.%) และ HDPE ปริมาณ 60 wt.% โดยมีพารามิเตอร์ คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และระยะป้อนลึก (Depth of Cut) โดยแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ โดยปัจจัยการผสมและสภาวะที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเกิดจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้ได้ถึงตัวแปรต่างๆ และระดับของแต่ละปัจจัยการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดปัจจัยและระดับการทดลอง

Parameters	(ต่ำ)	(กลาง)	(สูง)
Speed (A) (rpm)	220	480	720
Feed Rate (B) (mm/min)	200	300	400
Depth of Cut (C) (mm)	3	5	7

3.2 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

นำส่วนผสมในปริมาณที่กำหนดไว้คือ RWS ปริมาณ 40 wt.% และ HDPE ปริมาณ 60 wt.% ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ โดยสภาวะในการผสม คือ ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว ระหว่าง 160–180°C ความเร็วเกลียว 50 rpm อัตราป้อน 10 รอบ/นาที และแรงดัน 6.89 MPa จากนั้น ทำการอัดเข้าแม่พิมพ์สี่เหลี่ยม ขนาด $100 \times 100 \times 40$ มม.³ เพื่อเตรียมชิ้นงานในการกัด

3.3 การวัดค่าความขรุขระผิว

เมื่อทำการออกแบบการทดลองในรูปแบบ I-Optimal ซึ่งมีทั้งหมด 24 สภาวะ (Run) ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดลอง และทำการกัดเรียบรอยแล้ว จากนั้น ทำการวัดค่าเฉลี่ยของความขรุขระผิว (Average Roughness; Ra) ด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs เป็นระยะทาง 10 มม. และมีค่า Cut-off Length คือ 0.8 มม. โดยกำหนดจุดวัด จำนวน 5 จุด ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางและขอบของชิ้นงาน ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าความขรุขระผิวในทิศทางขนานกับทิศทางการกัดโดยในแต่ละค่าของสภาวะการกัดจะวัด 5 ครั้ง (5 ซ้ำ) ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ของแต่ละการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของค่า Ra และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกัด WPCs

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวและหาสภาวะของการทดลอง ซึ่งการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการนี้มีข้อดีและความแตกต่างกับงานวิจัยอื่นๆ คือ ได้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น สมการถดถอย (Regression Model) ที่มีความละเอียดและแม่นยำกว่าวิธีการอื่นๆ โดยทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทางสถิติ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเพียงพอของข้อมูล (Model Checking) การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ของผลการทดลอง การนำค่าการตอบสนองไปวิเคราะห์ด้วยแบบสมการถดถอย และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว จากนั้น ตรวจสอบความถูกต้อง

ของตัวแบบสมการถดถอยโดยการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการพยากรณ์ (Prediction) และผลจากการวัดค่าจริง (Observation) ของ WPCs เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทดลอง

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยเป็นการอธิบายผลการทดลอง ซึ่งจะอธิบายถึงผลกระทบและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการกัด คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และระยะป้อนลึก (Depth of Cut) ต่อค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; Ra) ของ WPCs แสดงดังตารางที่ 2 ตลอดจนการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้า

4.1 หลักการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์ต่อความขรุขระผิวการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

การออกแบบการทดลองมีตัวแปรหรือปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ซึ่งสามารถออกแบบสภาวะที่ใช้ในการทดลองได้ทั้งหมด 24 Run เช่นเดียวกันค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; Ra) และการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบการจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม โดยค่า Sequential Model Sum of Squares จะต้องมียุทธศาสตร์ ค่า Adjusted Coefficient of Determination ($Adj-R^2$) และค่า Predicted Coefficient of Determination ($Pred-R^2$) จะต้องมียุทธศาสตร์ค่าสูงกว่า 75% [1] นอกจากนี้ ค่าความขรุขระผิวจากการออกแบบการทดลองเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองแบบ 2FI เพราะจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติต้องการทราบถึงปัจจัยต่างๆ รวมไปถึงปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยค่า R^2 , ค่า $Adj-R^2$ และค่า $Pred-R^2$ ถูกใช้เพื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมเช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ค่า $Adj-R^2$ ของค่าความขรุขระผิวจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็น

ว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม ใน ส่วนของค่า $Pred-R^2$ อาจมีค่าต่ำกว่าค่า R^2 และ ค่า $Adj-R^2$ เล็กน้อย ซึ่งรูปแบบจำลองที่ได้นี้สามารถประมาณการหรือ อธิบายความผันแปรในข้อมูลได้ นอกจากนี้ ค่า Coefficients

of Variation (C.V.) ของค่าความขรุขระผิวควรมีค่าต่ำ โดย ปกติไม่ควรให้ค่านี้เกินร้อยละ 10 หรือ 10% โดย CV หมายถึง การตรวจวัดสมบัติของวัสดุมีความแม่นยำที่ดี และ สามารถใช้เป็นข้อมูลในการสร้างรูปแบบการจำลองได้ [12]

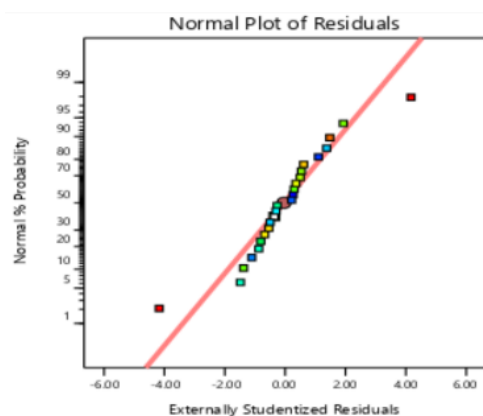
ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออฟฟิมอล และการหาค่าความขรุขระผิว (Ra) ในการกัดด้านข้างและหน้าของ WPCs

Run	Factors		Surface Roughness (Ra)		
	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Side Milling (μm)	Face Milling (μm)
1	220	200	3	3.049	3.710
2	480	400	7	3.123	3.772
3	480	300	3	2.952	3.122
4	480	200	3	2.831	3.104
5	720	200	5	2.747	2.789
6	220	300	5	3.152	4.060
7	220	200	5	3.138	3.830
8	720	300	3	2.723	2.934
9	480	400	3	3.012	3.606
10	720	400	7	3.057	3.195
11	220	300	3	3.074	4.040
12	720	400	5	2.893	3.107
13	220	400	3	3.162	3.811
14	480	300	7	3.087	3.594
15	480	300	5	3.039	3.495
16	480	200	7	2.893	3.389
17	220	400	5	3.212	3.927
18	480	200	5	2.849	3.242
19	720	300	5	2.771	3.045
20	720	300	7	2.828	3.100
21	720	200	7	2.791	2.931
22	720	400	3	2.922	3.082
23	220	200	7	3.268	4.000
24	220	400	7	3.273	4.120

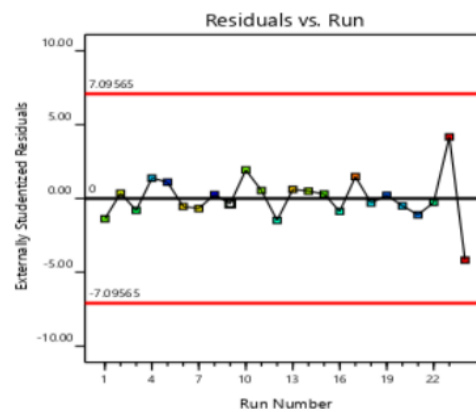
4.2 การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลในการกัก ด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลถูกวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของการกระจายของข้อมูลเพื่อยืนยันความเพียงพอและความน่าเชื่อถือของข้อมูลจากการทดลอง โดยยกตัวอย่างการตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลในการกักด้านข้างของ WPCs แสดงดังรูปที่ 2 จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า รูปที่ 2 (ก) แสดงกราฟ Normal Probability ของความขรุขระผิวในการกักด้านข้างของ WPCs จะเห็นได้ว่า การกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรง (มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง) และไม่พบค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้นสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 2(ข) แสดงกราฟค่าเฉลี่ยเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) พบว่า ค่าเฉลี่ยเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการ

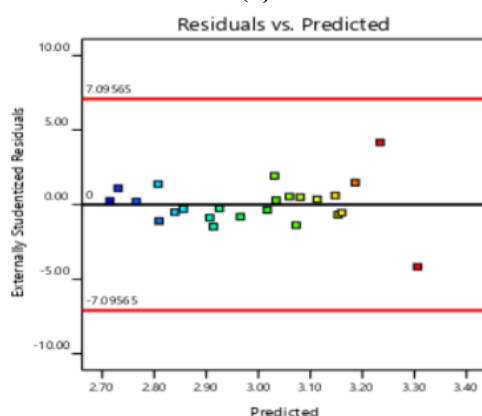
ทดลองที่เป็นแนวโน้ม หรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ รูปที่ 2(ค) แสดงกราฟค่าเฉลี่ยเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted) พบว่า ค่าเฉลี่ยเหลือมีการกระจายของข้อมูลนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ เช่นเดียวกับค่าเฉลี่ยเหลือมีการกระจายรอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และ รูปที่ 2(ง) แสดงกราฟ ค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs. Actual) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการพยากรณ์โดยรูปแบบจำลองการถดถอย และการทดลองจริง พบว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งสมการถดถอยเหล่านี้สามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 กราฟ และข้อมูลเหล่านี้ สามารถสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง [12],[13]



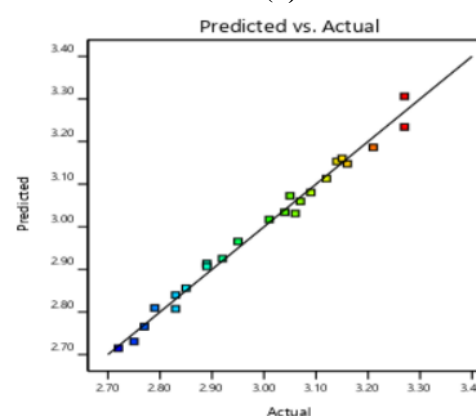
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอย (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (ข) กราฟค่าเฉลี่ยเหลือต่อลำดับการทดลอง (ค) กราฟค่าเฉลี่ยเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ง) กราฟค่าทำนายต่อค่าการทดลองจริง

4.3 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิว

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า Adj-R² จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่า R² ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองให้เห็นว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า R² ของการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs มีค่าเท่ากับ 0.9088 และ 0.9507 ซึ่งมีค่าสูง สามารถสรุปได้ว่า ค่าความขรุขระผิวมีผลกระทบจากปัจจัยที่กำหนด คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก ซึ่งมีค่า 90.88% และ 95.07% ตามลำดับ ส่วนอีก 9.12% และ 4.93% เป็นผลจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่นเดียวกันค่า Adj-R² ของการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs มีค่าเท่ากับ 0.8766 (87.66%) และ 0.9333 (93.33%) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า Pred-R² เล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8199 (81.99%) และ 0.9032 (90.32%) แสดงให้เห็นว่า จำนวนข้อมูลในการทดลองมีความเพียงพอต่อการทดลอง นอกจากนี้ พบว่า ค่า C.V. ของความขรุขระผิว มีค่าเท่ากับ 3.39% และ 3.13% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำและน้อยกว่า 10% สรุปได้ว่า การตรวจวัดสมบัติของวัสดุมีความแม่นยำสูง [13]

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอย

Sources	Side Milling	Face Milling
Std. Dev.	0.5780	0.1083
Mean	2.99	3.46
C.V.%	3.39	3.13
R ²	0.9088	0.9507
Adj-R ²	0.8766	0.9333
Pred-R ²	0.8199	0.9032

4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิว

เมื่อตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล แล้วพบว่าข้อมูลที่ได้มีความเพียงพอและน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลมาทำ

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีผลต่อความขรุขระผิวหรือไม่ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($P < 0.05$) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert (Version 8) แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 พบว่า ค่าความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดทั้ง 2 กระบวนการ มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลอง 2FI จะเห็นได้ว่ารูปแบบจำลองนั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ซึ่งมีค่า $P < 0.0001$ และ $P = 0.0003$ ตามลำดับ สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก มีผลต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) นอกจากนี้ จากสมการถดถอยในแต่ละปัจจัยของการทดลองเพื่อระบุผลกระทบสัมพัทธ์ของปัจจัยโดยการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วรอบ (A) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) สรุปได้ว่าความเร็วในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิว [14],[15] ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Coded Equation ได้ดังสมการ (1) และ (2)

$$\begin{aligned} \text{Ra (Side Milling)} = & 2.99 + 0.1807A(1) - 0.0101A(2) - \\ & 0.0733B(1) - 0.0081B(2) - 0.0578C(1) - 0.0119C(2) + \\ & 0.0537A(1)B(1) - 0.0481A(2)B(1) - 0.0126A(1)B(2) + \\ & 0.0567A(2)B(2) - 0.0219A(1)C(1) + 0.0096A(2)C(1) + \\ & 0.0056A(1)C(2) + 0.0048A(2)C(2) - 0.0011B(1)C(1) - \\ & 0.013B(2)C(1) + 0.0063B(1)C(2) + 0.0144B(2)C(2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Ra (Face Milling)} = & 3.48 + 0.5050A(1) - 0.0234A(2) - \\ & 0.1691B(1) + 0.0485B(2) - 0.1231C(1) - 0.0044C(2) + \\ & 0.0323A(1)B(1) - 0.0410A(2)B(1) + 0.1191A(1)B(2) - \\ & 0.0999A(2)B(2) - 0.0067A(1)C(1) - 0.0546A(2)C(1) - \\ & 0.0400A(1)C(2) + 0.0522A(2)C(2) + 0.0149B(1)C(1) - \\ & 0.0386B(2)C(1) - 0.0180B(1)C(2) + 0.0108B(2)C(2) \end{aligned} \quad (2)$$

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการกีดกันข้างของ WPCs

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.6351	18	0.0353	26.64	< 0.0001*	significant
A-Speed	0.4560	2	0.2280	146.30	<0.0001*	
B-Feed	0.0960	2	0.0480	30.81	0.0005*	
C-Depth	0.0609	2	0.0304	19.53	0.0061*	
AB	0.0437	4	0.0109	7.01	0.0278*	
AC	0.0031	4	0.0008	0.4958	0.7418	
BC	0.0024	4	0.0006	0.3822	0.8138	
Residual	0.0307	5	0.0018			
Cor Total	0.6429	23				

หมายเหตุ: * ค่า *P-value* น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการกีดกันหน้าของ WPCs

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	4.02	18	0.2231	42.51	0.0003*	significant
A-Speed	3.52	2	1.76	335.96	< 0.0001*	
B-Feed	0.2812	2	0.1406	26.82	0.0021*	
C-depth	0.2362	2	0.1181	22.53	0.0032*	
AB	0.1338	4	0.0335	6.38	0.0335*	
AC	0.0281	4	0.0070	1.34	0.3707	
BC	0.0112	4	0.0028	0.5321	0.7196	
Residual	0.0262	5	0.0052			
Cor Total	4.04	23				

หมายเหตุ: * ค่า *P-value* น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองและพื้นผิวตอบสนองของค่าความขรุขระผิว

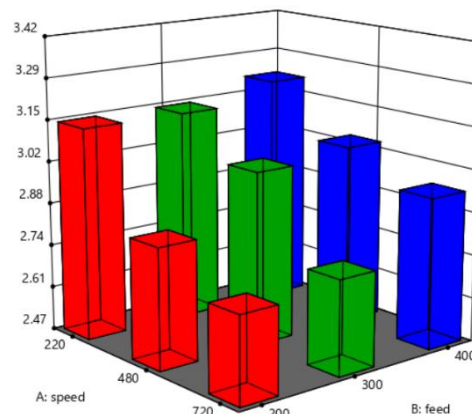
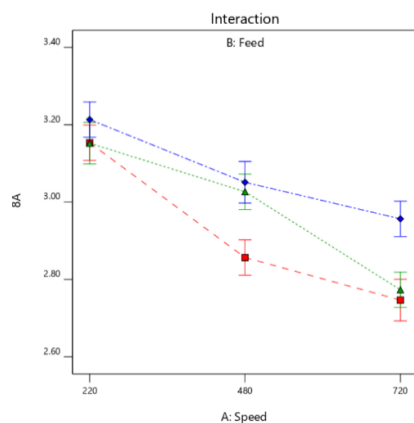
จากสภาวะของการทดลองในตารางที่ 2 นำมาทดสอบค่าความขรุขระผิวในการกีดกันข้างและด้านหน้าของ WPCs จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสมการถดถอยเพื่อหาผลกระทบของพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวของ WPCs แสดงดังในรูปที่ 3-5 ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 220 เป็น 480 และ 720 รอบ/นาที ทำให้ความเร็วรอบของดอกกัดในการตัดเฉือนชิ้นงานสูงขึ้นเช่นกัน แสดงดัง

รูปที่ 3 ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลงอย่างชัดเจน เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 300 และ 400 มม./นาที ทำให้ความเร็วของการเดินชิ้นงานในการตัดเฉือนมากขึ้นเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 4 ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 และ 7 มม. ทำให้อัตราการคายเศษออกเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น [16] แสดงดังรูปที่ 5 ตามลำดับ

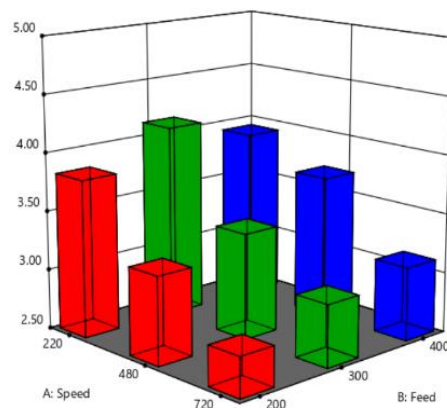
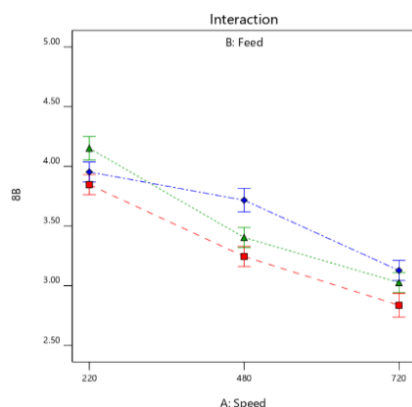
นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว แสดงดังรูปที่ 3-5 ตามลำดับ โดยรูปที่ 3-

5(ก) แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมและกราฟพื้นผิวตอบสนองของการกัดด้านข้างของ WPCs และรูปที่ 3-5(ข) แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมและกราฟพื้นผิวตอบสนองของการกัดด้านหน้าของ WPCs ตามลำดับ พบว่า ถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและอัตราป้อนลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ในทางตรงข้าม ถ้าใช้ความเร็วรอบลดลงและอัตราป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและอัตราป้อน คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และอัตราป้อนที่ 200 มม./นาที ตามลำดับ ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้น และใช้ระยะป้อนลึกลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ในทางตรงข้าม ความเร็วรอบลดลงใช้ระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4 โดยสภาวะที่

เหมาะสมที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและระยะป้อนลึก คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ นอกจากนี้ ถ้าอัตราป้อนเพิ่มขึ้นและใช้ระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ถ้าใช้อัตราป้อนลดลงและใช้ระยะป้อนลึกลดลงจะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อนและระยะป้อนลึก คือ อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สภาวะของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ [1],[13]

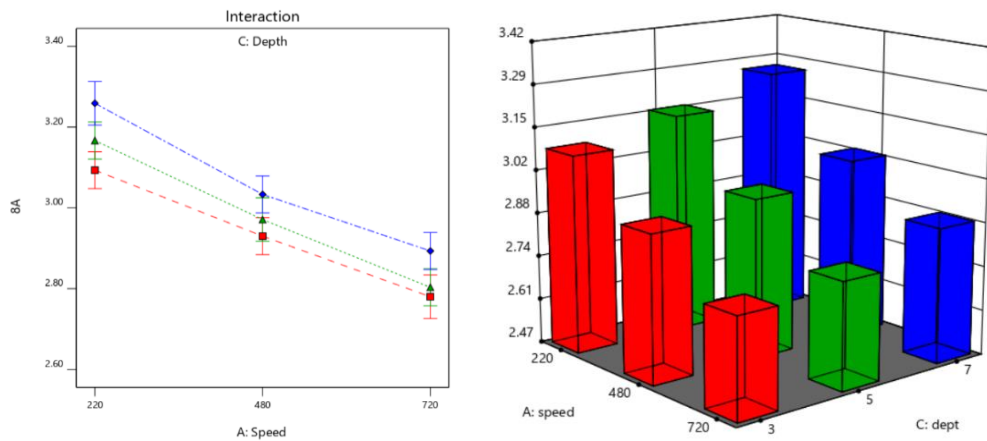


(ก)

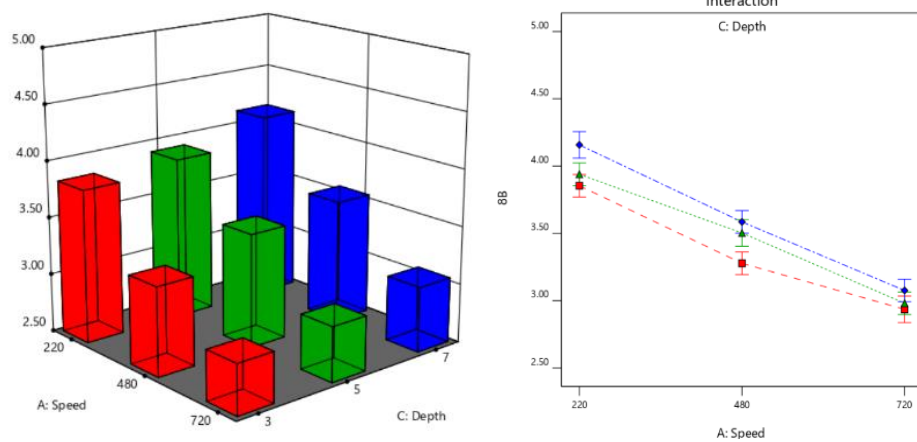


(ข)

รูปที่ 3 ปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว (ก) กัดด้านข้าง (ข) กัดด้านหน้า

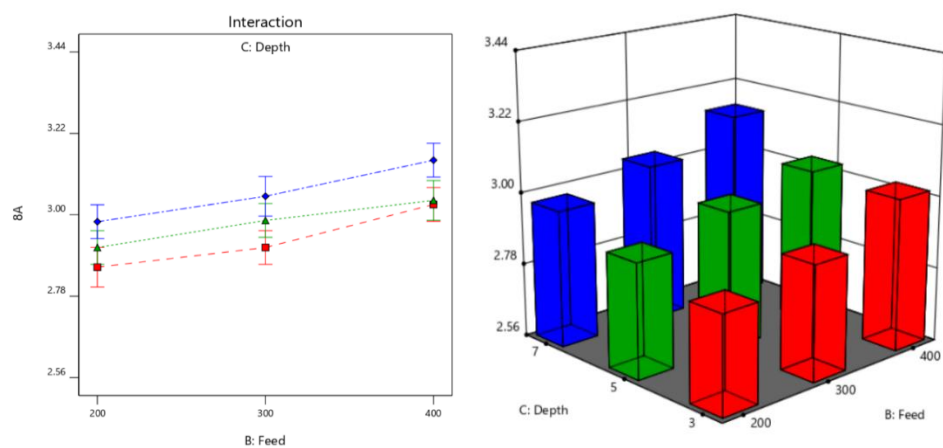


(ก)

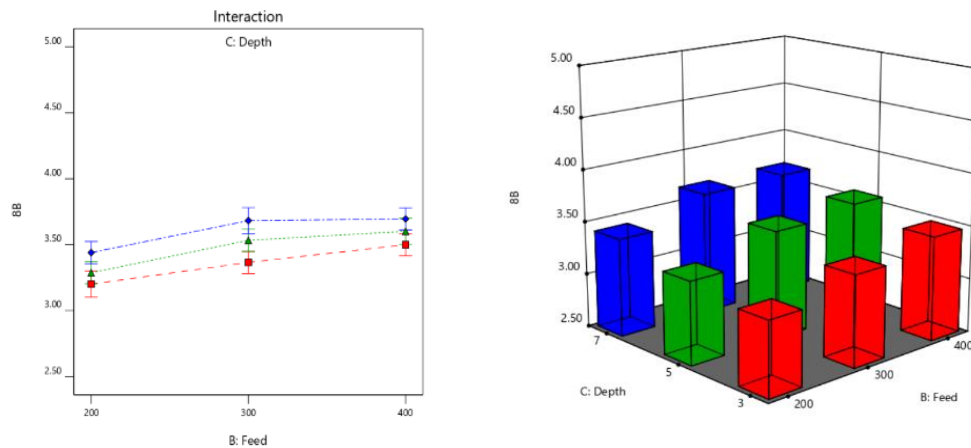


(ข)

รูปที่ 4 ปัจจัยความเร็วรอบและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว (ก) กัดด้านข้าง (ข) กัดด้านหน้า



(ค)



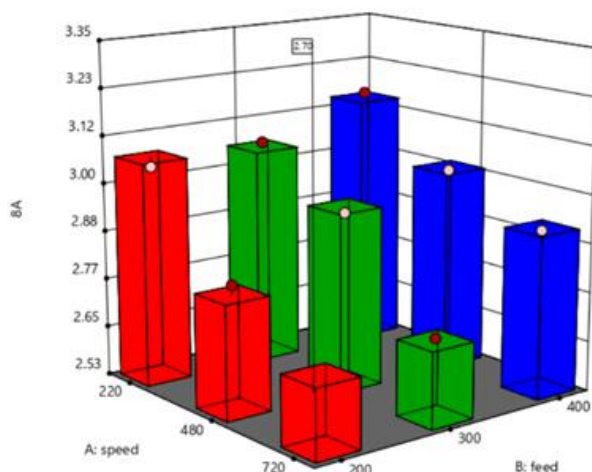
(ข)

รูปที่ 5 ปัจจัยอัตราป้อนและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว (ก) กัดด้านข้าง (ข) กัดด้านบน

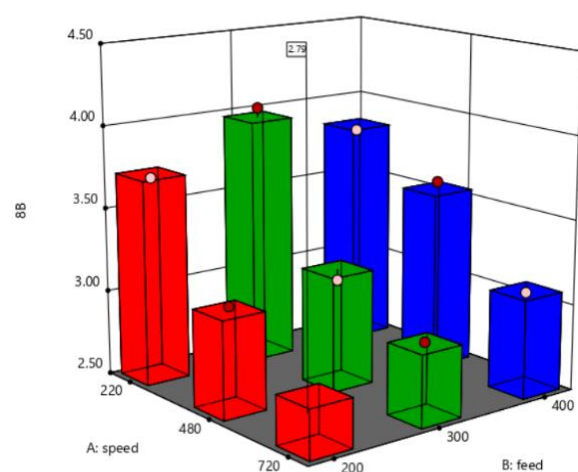
4.6 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านบน

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดและการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์โดยเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวที่มีค่าน้อยที่สุด (Minimize) [17],[18] แสดงดังรูปที่ 6 กล่าวคือ ประสิทธิภาพต้องมีความขรุขระผิวน้อยที่สุดจากกระบวนการผลิต โดยมีปัจจัยในการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะกินลึก โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert

(Version 8) ได้สภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวแสดงดังตารางที่ 6 โดยสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 92.33% นอกจากนี้ สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านบนของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.790 และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 93.93% ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 สภาวะที่เหมาะสมในการกัดของ WPCs: (ก) การกัดด้านข้างและ (ข) การกัดด้านบน

ตารางที่ 6 สภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

Process	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Desirability (%)
Side Milling	720	200	3	2.580	92.33
Face Milling	720	200	3	2.790	93.93

4.7 การตรวจสอบพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้าของ WPCs

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs และเพื่อยืนยันความถูกต้องของกระบวนการออกแบบการทดลอง การทดสอบ และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของงานวิจัย ดังนั้นผู้วิจัยได้ทวนสอบผลการทดลองโดยการนำสภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์ (Predicted) คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ผ่านกระบวนการขึ้นรูป การกัด และการทดสอบค่าความขรุขระ

ผิวอีกครั้งเพื่อหาค่าจริง (Observed) ที่ได้จากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 7 โดยทำการทดลอง 5 ซ้ำ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากการพยากรณ์มีค่าแตกต่างกันสูงสุดกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงไม่เกิน 5% พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการพยากรณ์ (Predicted) และค่าจริง (Observed) ที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 2.17% สำหรับการกัดด้านข้างและ 3.33% สำหรับการกัดด้านหน้า ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความน่าเชื่อถือในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวของกระบวนการกัดของ WPCs [19],[20]

ตารางที่ 7 ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

Process	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Observed (Ra)	Percentage Error (%)
Side Milling	720	200	3	2.580	2.636	2.17
Face Milling	720	200	3	2.790	2.883	3.33

5. สรุปผล

งานวิจัยเป็นการศึกษาอิทธิพลปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs โดยการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal) ทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทำการพยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยปัจจัยหลักที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึกในกระบวนการตัด การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ได้ค่าพยากรณ์ความ

ขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 ไมโครเมตร สำหรับการกัดด้านข้าง และ 2.790 ไมโครเมตร สำหรับการกัดด้านหน้า นอกจากนี้ยังมีการยืนยันผลการทดลองด้วยค่าจริงของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การออกแบบการทดลอง การทดสอบ และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของงานวิจัยมีความแม่นยำและเชื่อถือได้จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้กับ WPCs ที่ต้องอาศัยกระบวนการแปรรูปเพื่อใช้งานลักษณะต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม เช่น วัสดุโครงสร้าง เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 (รหัสข้อเสนอการ

วิจัย: DR256508012004) และขอขอบคุณสาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย จนทำ ให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ratanawilaia, P. Pitsuwan, S. Jirasampata and C. Homkhiew, "Influence of Milling Factors on Surface Finish of Wood-Plastic Composites," (in Thai), Ladkrabang Engineering Journal, vol. 32, no. 2, pp. 43–48, 2015.
- [2] C. Homkhiewa, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, "Effects of ground rubber tire and natural rubber contents on mechanical properties of thermoplastic elastomer," (in Thai), RMUTSV Research Journal, vol. 10, no. 3, pp. 553–567, 2021.
- [3] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, "Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber," Construction and Building Materials, vol. 162, pp. 450–458, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.048.
- [4] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, "Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design," (in Thai), KKU Research Journal, vol. 19, no. 6, pp. 780–793, 2014.
- [5] W. Cheewawuttipong, C. Homkhiew and S. Rawangwong, "A comparative study on the effect of oil palm fiber contents and types on properties of rubberwood sawdust-polypropylene composites," (in Thai), RMUTSV Research Journal, vol. 11, pp. 31–46, 2022.
- [6] N. Ayrilmis, 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.
- [7] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, "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.
- [8] R. Huang, B. -J. Kim, S. Lee, Z. Yang and Q. 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.
- [9] T. Ratanawilai and K. Taneerat, "Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering," Construction and Building Materials, vol. 172, pp. 349–357, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266.
- [10] S. Khamtree, T. Ratanawilai and S. Ratanawilai, "The effect of alkaline-silane treatment of rubberwood flour for water absorption and mechanical properties of plastic composites," Journal of Thermoplastic Composites Material, vol. 33, no. 5, pp. 599–613, 2020, doi: 10.1177/0892705718808556.
- [11] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, "Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood-plastic composites with calcium carbonate filler," Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 23, pp. 1503–1517, 2021, doi: 10.1007/s10163-021-01230-7.
- [12] C. Srivabut, C. Homkhiew and S. Rawangwong, "Optimal composition on surface roughness of wood-plastic composites using mixture design and response

- surface methodology,” (in Thai), Ladkrabang Engineering Journal, vol 38, no 4, pp. 151–165, 2021.
- [13] 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,” (in Thai), Ladkrabang Engineering Journal, vol 39, no 1, pp. 23–34, 2022.
- [14] T. Ratanawilai, P. Lekanukit and S. Urapantamas, “Effect of rubberwood and palm oil content on the properties of wood–polyvinyl chloride composites,” *Journal of Thermoplastic Composites Material*, vol. 27, no. 6, pp. 719–730, 2014, doi: 10.1177/0892705712454863.
- [15] 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,” *Polymer Composites*, vol. 37, no.9, pp. 2657–2672, 2016, doi: 10.1002/pc.23460.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] N. Ayırlmis, S. Korkut, E. Tanritanir, J. E. Winandy and S. Hiziroglu, “Effect of various fire retardants on surface roughness of plywood,” *Building and Environment*, vol. 41, no. 7, pp. 887–892, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.011.
- [19] C. Homkhiew, S. Rawangwong, W. Boonchouytan and W. Thongruang, “Mechanical and physical properties of thermoplastic natural Rubber,” (in Thai), *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 13, no 1, pp. 107–122, 2018.
- [20] 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.

กรอบการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการเงินของผู้มีส่วนได้เสียของสัญญา PPP O&M ของโครงการทางหลวงระหว่างเมืองของประเทศไทย

Financial Risk Analysis Framework of Stakeholders in PPP O&M Contracts for Inter-City Motorway Projects

นันทพัฒน์ ปิ่นตบแต่ง^{1,*} และ นคร กกแก้ว¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วังใหม่ ปทุมวัน กทม. 10330

Nantaphat Pintobtang^{1,*} and Nakhon Kokkaew¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Wang Mai, Pathumwan, Bangkok,
10330, Thailand

*Corresponding Author E-mail: pat.pintobtang@gmail.com

Received: Apr 06, 2022; Revised: Aug 07, 2022; Accepted: Aug 22, 2022

บทคัดย่อ

ปัจจุบันรัฐได้เปิดโอกาสให้เอกชนเข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ทางหลวงระหว่างเมือง เป็นต้น โดยอยู่ในรูปแบบของการจ้างดำเนินงานและบำรุงรักษาโครงการ (PPP O&M Gross Cost) ซึ่งรัฐรับความเสี่ยงด้านรายได้ และเอกชนรับความเสี่ยงด้านเงินลงทุนงานระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาตลอดอายุสัญญา โดยเอกชนจะได้รับผลตอบแทนในลักษณะอัตราเหมาจ่ายจากภาครัฐ โครงการ PPP นั้นผู้มีส่วนได้เสียหลักประกอบด้วย 1) รัฐเจ้าของโครงการ 2) เอกชนผู้ให้บริการ และ 3) สถาบันการเงินผู้ให้เงินกู้ สัญญา PPP O&M Gross Cost ได้นำกลไกการจ่ายค่าตอบแทนที่เรียกว่า “Availability payment (AP)” โดยเป็นการจ่ายค่าตอบแทนตามสภาพความพร้อมใช้และคุณภาพของการให้บริการ ซึ่งค่าตอบแทนในแต่ละงวดอาจมีการปรับลด ในกรณีที่ผู้ให้บริการไม่สามารถรักษาสภาพความพร้อมใช้ได้และคุณภาพของการให้บริการได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดในสัญญาได้ ซึ่งถือเป็นความเสี่ยงที่สำคัญสำหรับเอกชนผู้ให้บริการและสถาบันการเงินผู้ให้เงินกู้ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอกรอบเชิงคำนวณเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการเงินของผู้มีส่วนได้เสียหลักของสัญญา PPP O&M Gross Cost โดยใช้โครงการทางหลวงระหว่างเมืองหมายเลข 6 บางปะอิน-นครราชสีมา เป็นโครงการกรณีศึกษา ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการเงินของผู้มีส่วนได้เสียพบว่า รัฐเจ้าของโครงการมีโอกาสค่อนข้างสูงที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิของเงินลงทุนและรายได้จากการเก็บค่าผ่านทางจะไม่เป็นตามเกณฑ์ สำหรับเอกชนผู้ให้บริการพบว่ามีโอกาสสูงเช่นเดียวกันที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิของเงินลงทุนและค่าตอบแทนจะไม่เป็นตามเกณฑ์ ทั้งนี้เนื่องจากการเสนอราคาประมูลที่ค่อนข้างต่ำของเอกชน ส่วนสถาบันการเงินผู้ให้เงินกู้พบว่ามีความเสี่ยงไม่มากนักโดยค่า DSCR เฉลี่ยอยู่ในระดับที่มากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความเสี่ยง, โครงการร่วมลงทุนระหว่างรัฐและเอกชน, สัญญาจ้างดำเนินงานและบำรุงดูแลรักษา, ค่าตอบแทนความพร้อมใช้, ผู้มีส่วนได้เสีย, โครงการทางหลวงระหว่างเมือง

Abstract

Public Private Partnership (PPP) has been welcomed by government around the world as an innovative infrastructure delivery. Currently, there is a new type of PPP arrangements that is being employed in the highway sector in Thailand called PPP

O&M Gross Cost in which the private operator is responsible for operation and maintenance of the project to meet performance specification and will be paid for a fixed sum of money over the contract period and the public agency is responsible for land acquisition, construction cost, and still bears the market risks such as tolled revenue risk. In PPP O&M contracts, compensation made to the private operator will be linked to output performance. This payment mechanism is called “availability payment.” Under this payment mechanism, the actual compensation will be adjusted by performance deduction to be calculated in each period if the private operator fails to meet performance specifications of the contract. This article is to present risk analysis framework using Monte Carlo simulation of key stakeholders in PPP O&M contracts, namely, public agency, private operator, and lenders. The proposed framework is then applied to a case study project named Motorway#6 (Bang Pa-In to Nakhon Ratchasima). Based on the application of the proposed financial risk analysis framework, this study found that the financial risk of the public agency was high. However, the public agency must include economic benefits into the evaluation since financial NPV is only part of the whole public project evaluation. As for private operator, the financial risk is relatively high as well. This is mainly due to the low bid price of the private operator. Finally, lender’s risk of the default of the loan, measured using DSCR, was quite low since the mean of the DSCR was greater than 1 over the course of the term loan.

Keywords: Risk analysis, PPP, O&M contract, Availability payment, Stakeholders, Motorway

1. บทนำ

ปัจจุบันรัฐเจ้าของโครงการได้เปิดโอกาสให้เอกชนเข้ามาร่วมลงทุนในโครงการของรัฐในรูปแบบของการจ้างดำเนินงานและบำรุงรักษาโครงการ (PPP O&M) ซึ่งรัฐรับผิดชอบในการลงทุนในการก่อสร้างงานโยธา ส่วนเอกชนรับผิดชอบในการลงทุนในงานระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาตลอดอายุโครงการ ตัวอย่างโครงการที่ใช้รูปแบบการร่วมลงทุนแบบ PPP O&M ได้แก่ โครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 บางปะอิน-นครราชสีมา และโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 81 บางใหญ่-กาญจนบุรี เป็นต้น

สัญญา PPP O&M รายได้จากการเก็บค่าผ่านทางจะเป็นของรัฐทั้งหมด โดยรัฐที่เป็นเจ้าของโครงการจะจ่ายผลตอบแทนให้กับเอกชนผู้ให้บริการในลักษณะอัตราเหมาจ่าย ซึ่งรวมเงินลงทุนสำหรับงานระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาตลอดอายุสัญญา ซึ่งเป็นรูปแบบการร่วมลงทุนที่เรียกว่า PPP Gross Cost ความเสี่ยงของสัญญา PPP O&M ในรูปแบบ PPP Gross Cost นั้น รัฐเจ้าของโครงการยังต้องแบกรับความเสี่ยงด้านการตลาด (Market risk) เช่น สภาพเศรษฐกิจของประเทศ ปริมาณจราจร และรายได้ในการจัดเก็บค่าผ่านทาง เป็นต้น ส่วนเอกชน

ผู้สัญญารับความเสี่ยงด้านการต้นทุนในการลงทุนงานระบบและต้นทุนในการดำเนินงานและบำรุงรักษาให้อยู่ในระดับที่ระบุในสัญญา (Operational risk) เช่น สภาพผิวจราจรต้องอยู่ในระดับดีมาก ซึ่งกำหนดโดยใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) เป็นต้น

ทั้งนี้โครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 และ 81 ถือเป็นโครงการโครงสร้างพื้นฐานด้านถนนแห่งแรกของประเทศไทยที่นำกลไกการจ่ายค่าตอบแทน (Payment mechanism) ที่เรียกว่า “Availability payment (AP)” ซึ่งมีการใช้แล้วในหน่วยงานรัฐในต่างประเทศ เช่น โครงการ Port of Miami Tunnel ในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น โดย AP เป็นการจ่ายค่าตอบแทนตามสภาพความพร้อมใช้และคุณภาพของการให้บริการ (Performance-based) โดยค่าตอบแทนนี้อาจแบ่งการจ่ายเป็นรายเดือน รายไตรมาส และค่าตอบแทนในแต่ละงวดอาจมีการปรับลด (Deduction) ในกรณีที่เอกชนผู้ให้บริการหรือบริษัทผู้รับสัมปทาน (Private operator หรือ Concessionaire) ไม่สามารถรักษาสภาพความพร้อมใช้ได้และคุณภาพของการให้บริการได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดในสัญญาได้

ความเสี่ยงด้านปริมาณจราจร การปรับลดค่าตอบแทนต้นทุนในการก่อสร้าง ดำเนินงานและบำรุงรักษางานระบบและอัตราคิดลด ถือเป็นความเสี่ยงที่สำคัญที่ส่งผลต่อ

ผลตอบแทนทางการเงินสุทธิทั้ง 3 ผู้มีส่วนได้เสียหลัก (Stakeholders) ของสัญญา PPP O&M ในรูปแบบ PPP Gross Cost ซึ่งได้แก่ 1) หน่วยงานรัฐเจ้าของโครงการ 2) เอกชนผู้ให้บริการ และ 3) สถาบันการเงินผู้ให้เงินกู้กับเอกชนผู้ให้บริการ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลกระทบทางการเงินที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับผู้มีส่วนได้เสียหลักที่เกี่ยวข้องจากปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญที่ได้กล่าวมา ของสัญญา PPP Availability-based O&M ของโครงการทางหลวงระหว่างเมืองของประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนากลไกการปรับลดค่าตอบแทนให้สอดคล้องกับ 1) บริบทของประเทศไทย และ 2) สถานะและเสถียรภาพทางการเงินของโครงการ และแนวทางการจูงใจการให้บริการที่ดีของผู้ให้บริการ (Operator) ในโครงการการร่วมลงทุนระหว่างรัฐและเอกชนที่ใช้วิธีการปรับลดการจ่ายค่าตอบแทนจากความความพร้อมใช้ (Availability payment) โดยมีโครงการกรณีศึกษาคือโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. โครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure)

โครงสร้างพื้นฐานโดยทั่วไป คือ สินทรัพย์ทางกายภาพ เครื่องมือ สิ่งอำนวยความสะดวก ซึ่งเชื่อมโยงเข้าด้วยกันเป็นระบบผ่านการดำเนินการโดยผู้ให้บริการ ภายใต้ข้อจำกัดของโครงการ การบริหารจัดการ กฎหมายและข้อกำหนดต่าง ๆ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการพื้นฐานของประชาชน เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิต และเพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการแข่งขันทางเศรษฐกิจของประเทศ [1]

การก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานจำเป็นต้องมีการดำเนินการ ทั้งการก่อสร้าง การจ้างบุคลากรด้านต่างๆ ตลอดจนการดำเนินงานและบำรุงรักษาตลอดช่วงอายุของโครงสร้างพื้นฐาน โครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่หลายโครงการจึงมีความต้องการเงินลงทุนที่สูง การลงทุนจากรัฐเพียงฝ่ายเดียวอาจไม่สามารถระดมเงินทุนได้เพียงพอเนื่องจากข้อจำกัดในด้านการระดมทุนและต้องคำนึงถึงเสถียรภาพการคลังของประเทศด้วย อีกทั้งภาระที่เกิดจาก

การกู้ยืมซึ่งจะก่อให้เกิดหนี้สาธารณะที่สูงขึ้น จึงก่อให้เกิดการให้เอกชนเข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน หรือที่เรียกว่า โครงการร่วมทุนระหว่างรัฐและเอกชน (Public-Private Partnership หรือ PPP) เพื่อแก้ปัญหาในส่วนนี้ อีกทั้งยังส่งผลดีต่อรัฐในแง่อื่นอีกด้วย เช่น การสร้างงานในภาคการก่อสร้าง การหมุนเวียนของเงินในระบบเศรษฐกิจจากกิจกรรมการก่อสร้าง และการเพิ่มขีดความสามารถของประเทศในด้านพร้อมของปัจจัยในการผลิตและขนส่งหรือกระจายสินค้า เป็นต้น

2.2. สัญญาร่วมทุนระหว่างรัฐและเอกชน (PPP)

สัญญาร่วมทุนระหว่างรัฐและเอกชน (Public-Private Partnership) หรือ PPP เป็นสัญญาระยะยาว (Long-term contract) ที่มีการแบ่งสรรความเสี่ยงที่เหมาะสมระหว่างรัฐและเอกชน (Proper risk allocation) เพื่อผลประโยชน์ร่วมกันทั้งสองฝ่าย [2] ซึ่งเกิดจากการรวมกันของสัญญาย่อยหลาย ๆ สัญญาเข้าด้วยกัน ซึ่งการรวมสัญญาเข้าด้วยกัน (Contract bundling) โดยวัตถุประสงค์หลักของการนำสัญญา PPP มาใช้ ก็เพื่อให้เกิดการประหยัดของต้นทุนรวมตลอดอายุโครงการ (Life cycle cost) เนื่องจากเอกชนที่ได้รับสัมปทานจะมุ่งเน้นในช่วงออกแบบและก่อสร้าง (Design and construction phase) ให้มีประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนในช่วงดำเนินงานและบำรุงรักษา (O&M phase) [3] นอกจากนี้ยังเป็นการกำหนดแรงจูงใจของผู้ออกแบบ บริษัทก่อสร้าง และบริษัทผู้ให้บริการที่สอดคล้องกันอีกด้วย

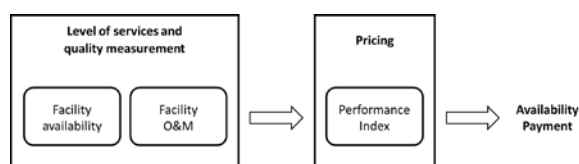
อย่างไรก็ตาม PPP ก็ส่งผลกระทบต่อประชาชน เช่น อัตราค่าผ่านทางที่รัฐไม่สามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น รัฐเจ้าของโครงการจึงเกิดแนวคิดในการนำลักษณะการร่วมทุนแบบ PPP O&M ที่มีการจ่ายค่าตอบแทนจากการให้บริการ (Availability payment) เพื่อให้รัฐยังคงมีอำนาจในการบริหารโครงการ

2.3. Availability Payments (AP)

การจ่ายค่าตอบแทนจากการให้บริการ (AP) ถือเป็นกลไกสำคัญระหว่างรัฐเจ้าของโครงการและเอกชนผู้ให้บริการ โดยหัวใจหลักของวิธีการจ่ายค่าตอบแทนจากการให้บริการ คือ “การให้บริการ” ที่เป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนดด้านสมรรถนะ หรือผลของการให้บริการ (Performance-based specification) [4]

ประโยชน์ของสัญญา PPP ที่เป็นแบบ AP ก็เพื่อสร้างแรงจูงใจให้เอกชนผู้ให้บริการรักษาระดับการให้บริการให้เป็นไปตาม “เกณฑ์คุณภาพการให้บริการตามมาตรฐานที่กำหนด” ส่งผลให้เกิดความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการพัฒนาและบริหารโครงการโดยรวม นอกจากนี้แล้วรัฐยังได้ประโยชน์จากการแข่งขันด้านราคาของเอกชนในการประมูลสัญญา โดยนำเทคโนโลยีในการก่อสร้างและบริหารโครงการมาใช้ในการลดต้นทุนในการดำเนินงาน โดยราคาที่เสนอต่ำสุดจะถือเป็นต้นทุนสูงสุดที่รัฐต้องจ่ายทั้งหมดตลอดอายุโครงการ [5]

ในการการจ่ายค่าตอบแทนจากการให้บริการนั้น มีองค์ประกอบหลัก คือ 1) การวัดระดับและคุณภาพของการให้บริการ (Level of services and quality measurement) และ 2) การคิดค่าตอบแทน (Pricing) ตามระดับและคุณภาพของการให้บริการ [6] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบและปัจจัยในการคำนวณการจ่ายค่าตอบแทนจากการให้บริการ

จากรูปที่ 1 องค์ประกอบแรกยังประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบย่อย ได้แก่

- 1) ความพร้อมในการให้บริการ (Facility availability) หมายถึง สินทรัพย์ต้องอยู่ในสถานะพร้อมให้บริการ เมื่อมีการเกิดอุบัติเหตุ จะต้องดำเนินการเพื่อให้สายทางกลับมาพร้อมใช้งานอย่างรวดเร็วที่สุด
- 2) การดำเนินงานและบำรุงรักษาที่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่ตกลงกันในสัญญา (Facility O&M) โดยผู้ให้บริการจะต้องดำเนินงานและบำรุงรักษาตามเกณฑ์มาตรฐาน เช่น การเข้าถึงอุบัติเหตุให้ทันเวลาที่ เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้สายทาง หรือสภาพผิวจราจร ที่กำหนดโดยดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) เป็นต้น

โดยรัฐเจ้าของโครงการต้องมีการวัดและตรวจสอบระดับ และคุณภาพของการให้บริการ ว่าเป็นไปตามเกณฑ์คุณภาพที่

กำหนดในสัญญาหรือไม่ หากเอกชนผู้ให้บริการดำเนินการที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด หน่วยงานรัฐเจ้าของโครงการจะประเมิน “มูลค่าการปรับลดค่าตอบแทน (Deduction หรือ Adjustment)” ทั้งนี้เพื่อเป็นแรงจูงใจให้เอกชนผู้ให้บริการดำเนินงานและบำรุงรักษาโครงการ ให้เป็นไปตามเกณฑ์ด้านคุณภาพ อย่างไรก็ตาม การปรับลดค่าตอบแทนนั้น ควรมีความเหมาะสมและเป็นธรรมกับทั้งรัฐเจ้าของโครงการและเอกชน เพื่อให้การพัฒนาโครงการที่มีประสิทธิภาพและได้ประโยชน์ทั้งสองฝ่าย (Win-win situation)

องค์ประกอบที่สอง คือ คำนวณการจ่ายค่าตอบแทน (Pricing) โดยใช้เกณฑ์หรือดัชนีต่าง ๆ ที่ระบุในสัญญา (Performance index) ประกอบในการคำนวณค่าตอบแทนที่แท้จริง โดยขั้นตอนนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่

- 1) การคำนวณค่าตอบแทนจากการให้บริการสูงสุด (Maximum Availability Payment หรือ MAP) สำหรับไตรมาสที่ q ปีที่ y
 - 2) การคำนวณการปรับลดค่าตอบแทนจากการให้บริการ (Performance Adjustment หรือ PA) สำหรับไตรมาสที่ q ปีที่ y
- โดย Aziz and Abdelhalim [7] ได้อธิบายถึงองค์ประกอบของการจ่ายค่าตอบแทน ดังแสดงในรูปที่ 2

$$\text{MAP}_{q,t} = \text{PA}_{q,t} \equiv \text{AAP}_{q,t}$$

รูปที่ 2 องค์ประกอบของการจ่ายค่าตอบแทนของสัญญา PPP O&M

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่า ค่าตอบแทนที่แท้จริงของการให้บริการ (Actual Availability Payment, AAP) ที่เอกชนผู้ให้บริการจะได้รับในแต่ละช่วงเวลา (ไตรมาส q สำหรับปีที่ t) มีค่าเท่ากับ ค่าตอบแทนจากการให้บริการสูงสุด (MAP) หักค่าปรับลดค่าตอบแทน (PA)

3. ตัวแบบทางการเงินของผู้มีส่วนได้เสียหลัก

จากการศึกษาสัญญา PPP O&M ที่มีรูปแบบการจ่ายค่าตอบแทนแบบ AP นั้น สามารถพิจารณาหาผลตอบแทน

จากการลงทุน โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตการประเมินผลตอบแทนเฉพาะที่เป็นตัวเงิน ยังไม่ได้รวมผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการประเมินในส่วนของรัฐเจ้าของโครงการ

ตัวแบบทางการเงิน (Financial model) ของแต่ละผู้มีส่วนได้เสียได้แก่ 1) รัฐเจ้าของโครงการ 2) เอกชนผู้ให้บริการ 3) ผู้ให้เงินกู้ (Lenders) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.ตัวแบบทางการเงินของรัฐเจ้าของโครงการ

ตัวแบบทางการเงินของรัฐเจ้าของโครงการ (Public agency) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$Y_P = \sum_{t=1}^{Tc+To} \frac{-I_t - CR_t - ACQ_t + (365 \times AADT_t \times TR_t) + PA_t - OMP_t}{(1+r_p)^t} \quad (1)$$

โดย Y_P = มูลค่าปัจจุบันสุทธิทางการเงิน (Financial NPV) ของรัฐเจ้าของโครงการ; I_t = เงินลงทุนของรัฐเจ้าของโครงการ ในปี t ; CR_t = เงินสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างงานระบบ (System construction repayment) ปี t ; ACQ_t = ค่าใช้จ่ายในการจัดกรรมสิทธิ์ที่ดินในปี t ; $AADT_t$ = ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันของโครงการ ในปี t ; OMP_t = ค่าตอบแทนของเอกชนจากการดำเนินงาน (Operation & maintenance payment) ปี t ; PA_t = การปรับลดค่าตอบแทน (Payment adjustment) ในปี t ; TR_t = อัตราค่าผ่านทางเฉลี่ยต่อคัน ในปี t ; r_p = อัตราคิดลดของโครงการของรัฐ (Public project discount rate); Tc = ระยะเวลาในการก่อสร้างทั้งหมด (ปี); To = ระยะเวลาในการดำเนินงาน (ปี)

3.2.ตัวแบบทางการเงินของเอกชนผู้ให้บริการ (Private operator)

ตัวแบบทางการเงินของเอกชนผู้ให้บริการ (Private operator) สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2)

$$Y_O = \sum_{t=1}^{Tc+To} \frac{-C_t - F_t + (CR_t + OMP_t - PA_t) - OMP_t - DS_t - Tax_t}{(1+r_E)^t} \quad (2)$$

โดย Y_O = ผลตอบแทนทางการเงินของเอกชนผู้ให้บริการ (Private operator); C_t = เงินลงทุนของเอกชน ในปี t ; F_t = ค่าใช้จ่ายในการจัดหาเงินทุนและประกันของเอกชน (ประมาณ 2% ของเงินลงทุนงานระบบ) ในปี t ; CR_t = เงิน

สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างงานระบบ (System construction repayment) ปี t ; OMP_t = ค่าตอบแทนจากการดำเนินงานปี t ; PA_t = การปรับลดค่าตอบแทน (Payment adjustment) ในปี t ; OM_t = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาในปี t ; DS_t = เงินจ่ายคืนเงินกู้ (Debt service) ในปี t ; Tax_t = ภาษีจ่าย ในปี t ; r_E = อัตราคิดลด หรือ อัตราผลตอบแทนของเอกชน

3.3.เกณฑ์ทางการเงินของผู้ให้เงินกู้ (Lenders)

สำหรับสถาบันการเงินที่สนับสนุนเงินกู้ให้กับเอกชนผู้ให้บริการ ในการศึกษาเลือกใช้ค่า Debt service coverage ratio (DSCR) เป็นเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของผู้ให้เงินกู้ โดยระยะเวลาในการกู้ต้องน้อยกว่าระยะเวลาสัญญา และค่า DSCR ในแต่ละปีต้องไม่น้อยกว่า 1 โดยสมการ DSCR แสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$DSCR_t = FCF_t / DS_t \quad (3)$$

โดย FCF_t คือ กระแสเงินสดอิสระ (Free cash flow) สำหรับเจ้าหนี้และเจ้าของ โดยมีสมการเป็น $FCF_t = -C_t - F_t + (CR_t + OMP_t - PA_t) - OMP_t$; DS_t คือ หนี้ที่ต้องชำระคืนในปี t โดยคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$DS_t = D \times \left[\frac{r_D \times (1+r_D)^n}{(1+r_D)^n - 1} \right] \quad (4)$$

เมื่อ r_D คืออัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (Interest rate) n คือ ระยะเวลาในการกู้ (ปี) D คือเงินกู้ยืมทั้งหมด

4. การวิเคราะห์ความเสี่ยงของโครงการ

4.1.การระบุตัวแปรเสี่ยง (Risk identification)

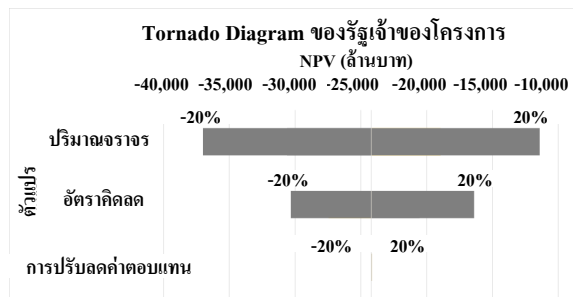
การศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ในการระบุตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญ โดยจากตัวแบบทางการเงินในหัวข้อที่ 4 มีตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่

- ปริมาณจราจร ($AADT_t$)
- การปรับลดค่าตอบแทน (PA_t)
 - ระยะเวลาในการจัดการความพร้อมใช้ของสายทาง (D1)
 - ระยะเวลาในการเข้าถึงอุบัติเหตุ (D2)

- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงดูแลรักษา
- อัตราคิดลด

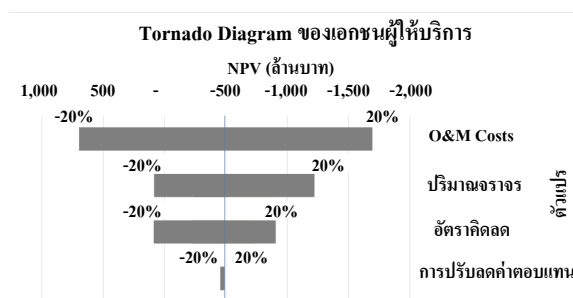
สำหรับการพิจารณากรณีฐาน ประกอบไปด้วยปริมาณจราจร เช่น ปริมาณจราจร 43,490 คันต่อวันในปีแรก เป็นต้น; ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา เช่น 411 ล้านบาท ในปีแรก เป็นต้น; อัตราคิดลดที่ร้อยละ 4 สำหรับรัฐเจ้าของโครงการ; อัตราคิดลดที่ร้อยละ 8.6 สำหรับเอกชนผู้ให้บริการ; ระยะเวลา D1 48 นาที; ระยะเวลา D2 เท่ากับ 11 นาที

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของรัฐเจ้าของโครงการ เป็นดังแสดงในรูปที่ 3 และของเอกชนผู้ให้บริการเป็นดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 Sensitivity Analysis ของรัฐเจ้าของโครงการ

จากรูปที่ 3 ลำดับของปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนของรัฐเจ้าของโครงการ คือ 1) ปริมาณจราจร 2) อัตราคิดลด 3) การปรับลดค่าตอบแทน โดยมีค่า NPV สำหรับกรณีฐานเท่ากับ -24,209 ล้านบาท

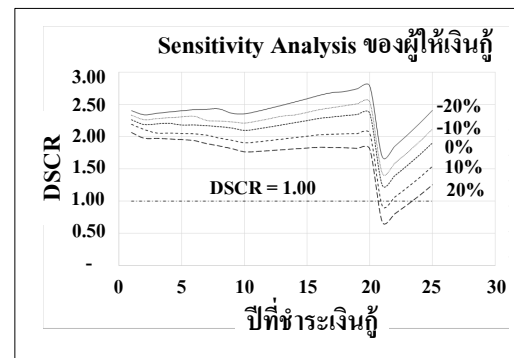


รูปที่ 4 Sensitivity Analysis ของเอกชนผู้ให้บริการ

จากรูปที่ 4 ลำดับของปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนของเอกชนผู้ให้บริการจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ 1) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา 2)

ปริมาณจราจร 3) อัตราคิดลด 4) การปรับลดค่าตอบแทน โดยมีค่า NPV สำหรับกรณีฐานเท่ากับ -489 ล้านบาท

ส่วนผู้ให้เงินกู้มีปัจจัยเสี่ยงเหมือนกับเอกชนผู้ให้บริการยกเว้นอัตราคิดลด โดยเกณฑ์ทางการเงินของผู้ให้เงินกู้พิจารณาจากค่า DSCR ของแต่ละปีที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1.00 ตัวอย่าง Sensitivity Analysis ด้าน DSCR ของผู้ให้เงินกู้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 Sensitivity Analysis ของผู้ให้เงินกู้จากปัจจัยเสี่ยงทางด้านค่าใช้จ่าย OM

4.2.การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรเสี่ยง

(Risk modelling)

สมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์ค่าของตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญของโครงการในอนาคตได้ โดยรายละเอียดของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรเสี่ยงเป็นดังต่อไปนี้

4.2.1.ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันของโครงการ

ปริมาณจราจรเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงถึงการเงินของโครงการของรัฐเจ้าของโครงการ โดยในการศึกษานี้ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Geometric Brownian motion (GBM) ในการพยากรณ์ปริมาณจราจรในอนาคตของโครงการ โดย GBM สามารถได้ดังสมการที่ (5)

$$dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dz \quad (5)$$

โดยที่ $dz = \varepsilon_t \sqrt{dt}$; $\varepsilon_t \sim N(0,1)$; X_t หรือ $AADT_t$ = ปริมาณจราจรปีที่ t ; μ = อัตราการเติบโตของตัวแปรสุ่ม X_t ; σ = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม X_t ; dt

$= \frac{T}{n}$; T = จำนวนปีของสัญญา; n = จำนวนครั้งของ *time step* ในช่วงเวลา T

จะต้องดำเนินการสายทางให้มีความพร้อมใช้ตลอดเวลา สามารถคำนวณค่าปรับได้ดังสมการที่ (7)

4.2.2. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของการปรับลด

ค่าตอบแทนจากการให้บริการ

การปรับลดค่าตอบแทนจากการให้บริการนั้น เป็นตัวเล็งซึ่งส่งผลต่อการเงินของโครงการของ เอกชนผู้ให้บริการโดยมีปัจจัยในการปรับลดค่าตอบแทนดังแสดงในสมการที่ (6) [8]

$$PA_{q,t} = QUT_{q,t} + QOV_{q,t} + QED_{q,t} \quad (6)$$

โดย $QUT_{q,t}$ คือ การปรับลดค่าตอบแทนจากความพร้อมใช้ของสายทางของไตรมาสที่ q ปีที่ t โดยเอกชนผู้ให้บริการ

$$QUT_{q,t} = (\sum_i Deduction)_{q,t} \times \frac{CCPI_{q,t}}{RCPI} \quad (1)$$

โดย $CCPI_{q,t}$ คือ ดัชนีราคาผู้บริโภคของไตรมาสที่ q ปีที่ t และ $RCPI$ คือ ดัชนีราคาผู้บริโภคอ้างอิง

ส่วนเกณฑ์ในการคิดค่าปรับลด จะคิดจาก 2 ปัจจัย คือ 1) ปริมาณจราจร และ 2) ระยะเวลาของถนนที่ไม่พร้อมใช้งาน ซึ่งได้ระบุไว้ในสัญญาของแต่ละโครงการ สำหรับโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 ซึ่งเป็นโครงการกรณีศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ เกณฑ์ในการคิดค่าปรับลดเป็นดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 การคิดค่าปรับลดจากความไม่พร้อมใช้ของถนน 4 ช่องจราจร

Unit: THB per Duration

Traffic Volume per Direction (pcu/h)	Duration of Lane Closure			
	1–15 minutes	16–30 minutes	31–45 minutes	46–60 minutes
1,000 or less	None	None	None	None
1,500	4,400	17,200	38,600	68,500
2,000	15,700	62,600	140,800	250,300
2,500	36,500	145,700	327,800	582,700
3,000	84,000	335,800	755,300	1,342,800
Over 3,000	130,100	520,300	1,170,700	2,081,100

ตารางที่ 2 การคิดค่าปรับลดจากความไม่พร้อมใช้ของถนน 6 ช่องจราจร

Unit: THB per Duration

Traffic Volume per Direction (pcu/h)	Duration of Lane Closure			
	1–15 minutes	16–30 minutes	31–45 minutes	46–60 minutes
2,000 or less	None	None	None	None
2,500	900	3,100	6,900	12,100
3,000	5,700	22,200	49,900	88,500
3,500	12,600	50,400	113,300	201,300
4,000	23,700	94,700	212,800	378,200
Over 4,000	82,600	329,800	742,000	1,319,200

ส่วน $QOV_{q,t}$ คือ การปรับลดค่าตอบแทนจากการดำเนินงานและบำรุงรักษาที่ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในสัญญา โดยการปรับลดค่าตอบแทนจะคิดจากคะแนนหรือแต้มการปรับลด (Demerit Point) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการปรับลดค่าตอบแทนจาก 2 ปัจจัยคือ 1) การเข้าถึงอุบัติเหตุในสายทาง และ 2) ความเรียบของผิวถนน

โดยเกณฑ์ในการคิดคะแนนสำหรับการปรับลดค่าตอบแทนของทั้งสองปัจจัย สำหรับโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 การปรับลดค่าตอบแทนจากการดำเนินงานและบำรุงรักษาที่ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดเป็นดังแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การคิดคะแนนสำหรับการปรับลดค่าตอบแทนจากการเข้าถึงอุบัติเหตุในสายทาง

Description	Indicator	Demerit Point
Incident Response Time, Including on-site Traffic Management, within 30 minutes in general cases	$\geq 95\% \text{ to } \leq 100\% \text{ of incident cases}$	0
	$\geq 90\% \text{ to } \leq 95\% \text{ of incident cases}$	50
	$\geq 85\% \text{ to } \leq 90\% \text{ of incident cases}$	100
	$< 85\% \text{ of incident cases}$	150

ตารางที่ 4 การคิดคะแนนสำหรับการปรับลดค่าตอบแทนจากการดูแลรักษาความเรียบของผิวถนน

Description	Indicator	Demerit Point
Roughness of Concrete Pavement, Average IRI in any 1,000 m.	Maintained condition Average IRI $\leq 3.5 \text{ m/km.}$	400 per 1 lane - 1,000 m.

จากนั้น คะแนนสำหรับการปรับลดค่าตอบแทนในแต่ละกรณีที่ได้กล่าวมา จะถูกนำมาคำนวณค่าปรับลดดังแสดงในสมการที่ (8)

$$QOV_{q,t} = (\sum_i VDPs)_{q,t} \times 0.002\% \times OMLP_{q,t} \quad (8)$$

โดย $QOV_{q,t}$ = การปรับลดค่าตอบแทนจากการดำเนินงานและบำรุงรักษาที่ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ในไตรมาสที่ q ปีที่ t ; $\sum_i VDP_{q,t}$ = ผลรวมของคะแนนสำหรับการปรับลด (Violation Demerit Points) ในไตรมาสที่ q ปีที่ t ; $OMLP_{q,t}$ = ค่าตอบแทนจากการดำเนินงานและบำรุงรักษาในไตรมาสที่ q ปีที่ t

สำหรับโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 คะแนนสำหรับการนำมาคิดค่าปรับนั้น จะถูกจำกัดไว้ไม่เกิน 5,000 คะแนนต่อไตรมาส โดยคะแนนส่วนเกินจะนำมาคิดสำหรับการปรับลดค่าตอบแทนในไตรมาสถัดไป

สำหรับ $QED_{q,t}$ คือ การปรับลดค่าตอบแทนอันเนื่องมาจากคะแนนส่วนเกินจากไตรมาสก่อนหน้าโดยสามารถคำนวณการปรับลดค่าตอบแทนได้ดังสมการที่ (9)

$$QED_{q,t} = EDPs \times 0.002\% \times OMLP_{q,t} \quad (9)$$

โดย $EDPs$ = คะแนนส่วนเกินจากไตรมาสก่อนหน้า (Excess Demerit Points); $OMLP_{q,t}$ = ค่าตอบแทนจากการดำเนินงานและบำรุงรักษาในไตรมาสที่ q ปีที่ t

4.2.3. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา (OM costs)

การดำเนินงานและบำรุงรักษานั้นส่งผลต่อการเงินของโครงการของเอกชนผู้ให้บริการ โดยที่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรในโครงการ (AADT_t) สามารถคิดได้ดังสมการที่ (10)

$$OM_t = FC_t + (VC_t \times 365 \times AADT_t) + AC_t \quad (10)$$

โดย OM_t = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาในปีที่ t ; FC_t = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาคงที่ (Fixed cost) ในปีที่ t ; VC_t = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาแปรผัน (Variable cost) ในปีที่ t ; $AADT_t$ = ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวัน ในปีที่ t ; AC_t = ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม (Added cost) ในกรณีที่มีการซ่อมบำรุงที่ไม่ได้เกณฑ์มาตรฐานความเรียบของผิวทางในปีที่ t

4.2.4. อัตราคิดลด (Discount rate)

อัตราคิดลดสำหรับรัฐเจ้าของโครงการนั้น พิจารณาจากอัตราพันธบัตรรัฐบาลระยะยาว ร้อยละ 4.00 ส่วนอัตราคิดลด

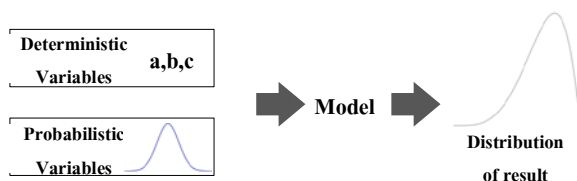
ของเอกชนผู้ให้บริการนั้น พิจารณาจากกรณีผลตอบแทนสูงสุดของรัฐ ซึ่งเป็นอัตราที่ปรับให้เหมาะสมกับความเสี่ยงของต้นทุนเงินทุน (Risk adjusted cost of capital) อ้างอิงจาก Final Report – Strategic Intercity Motorway Network Project – TA7483 จัดทำโดยกรมทางหลวงและธนาคารพัฒนาเอเชีย (Asian Development Bank: ADB) เท่ากับร้อยละ 8.60 ต่อปี

4.3.การวิเคราะห์ความเสี่ยงของผู้มีส่วนได้เสียหลักโดยวิธี

Monte Carlo simulation

วิธีการจำลองมอนติคาร์โลใช้หลักการของการสุ่มค่าจากการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ถูกกำหนดของตัวแปรเสี่ยง (Probabilistic variables) เพื่อใช้สำหรับการประมาณค่าของตัวแปรสุ่มที่เป็นไปได้ ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งสำหรับการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative risk analysis) โดยการใช้ค่าที่ได้จากการสุ่มเหล่านั้นในการคำนวณค่าที่เป็นไปได้ของตัวแปรเสี่ยงตาม [9]

วิธีการจำลองมอนติคาร์โลสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพการจำลองมอนติคาร์โล

จากรูปที่ 6 ค่าของตัวแปรต้น (Input variables) ทั้งที่เป็นแบบ Deterministic และ Probabilistic สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาตัวแปรตาม หรือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output variables) ที่มีการกระจายตัวของค่าผลลัพธ์ที่เป็นไปได้

5. ข้อมูลโครงการกรณีศึกษา

5.1.ข้อมูลพื้นฐานของโครงการทางหลวงพิเศษหมายเลข 6 (M6)

โครงการทางหลวงพิเศษหมายเลข 6 ประกอบด้วยสายทางขนาด 4-6 ช่องจราจร โดยมีขนาด 6 ช่องจราจร ระยะทาง 86.5 กิโลเมตร และขนาด 4 ช่องจราจร ระยะทาง 109.5 กิโลเมตร และสามารถรองรับปริมาณจราจรสูงสุดได้ 2200 คันต่อช่องจราจรต่อวัน

ระยะเวลาของโครงการประกอบไปด้วย 1) ระยะเวลาในการก่อสร้างงานโครงสร้าง 4 ปี 2) ระยะเวลาในการก่อสร้างงานระบบ 3 ปี และ 3) ระยะเวลาจ้างเอกชนผู้ให้บริการสำหรับการดำเนินงานและบำรุงรักษา 30 ปี

ข้อมูลที่สำคัญทางด้านการเงินจากสำนักงบประมาณและรายงานการศึกษาของกรมทางหลวง สรุปได้ดังนี้

- ค่าจัดกรรมสิทธิ์ที่ดินประมาณ 6,630 ล้านบาท
- ค่าก่อสร้างงานโยธาประมาณ 66,269 ล้านบาท
- เงินลงทุนสำหรับการก่อสร้างงานระบบประมาณ

7,187 ล้านบาท

- วงเงินประมูลสำหรับค่าจ้าง O&M ประมาณ 21,308 ล้านบาท (มูลค่าปัจจุบัน)

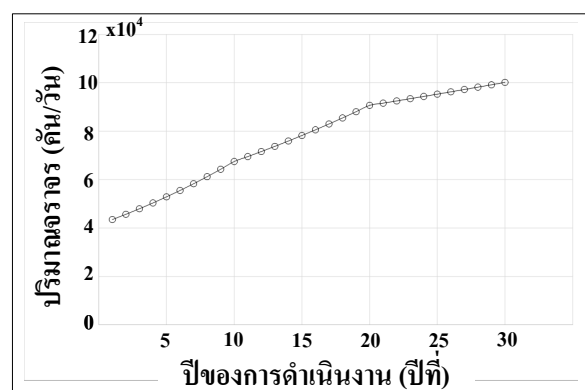
- เงินกู้จากสถาบันการเงิน คิดบนสมมติฐานของมูลค่าเงินกู้ครั้งหนึ่งของเงินลงทุนสำหรับก่อสร้างงานระบบ

5.2.ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรเสี่ยงของโครงการ

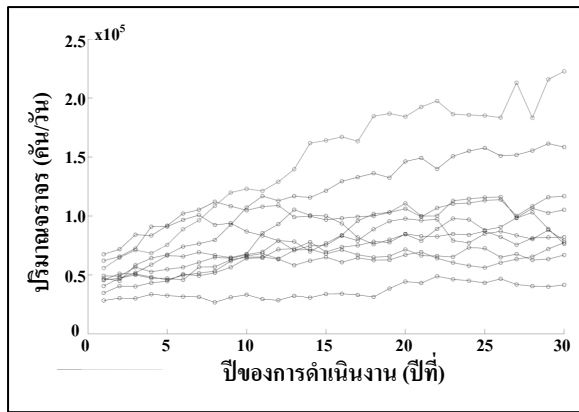
จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในหัวข้อ 4.2 และวิธี Monte Carlo simulation โดยใช้ MATLAB สามารถแสดงผลการพยากรณ์ตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญของโครงการกรณีศึกษาได้ดังนี้

5.2.1.การพยากรณ์ปริมาณจราจรของโครงการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาข้อมูลปริมาณจราจรโดยใช้ระบบ NAM และ SAM [10] สำหรับการพยากรณ์ที่เป็นแบบ Deterministic ดังแสดงในรูปที่ 7 และใช้สมการ Stochastic process ที่เรียกว่า Geometric Brownian motion (GBM) ตัวอย่างของผลที่ได้จากการพยากรณ์ปริมาณจราจรโดยใช้ MATLAB เป็นดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 กราฟแสดงปริมาณจราจรในอนาคตด้วยวิธี NAM และ SAM

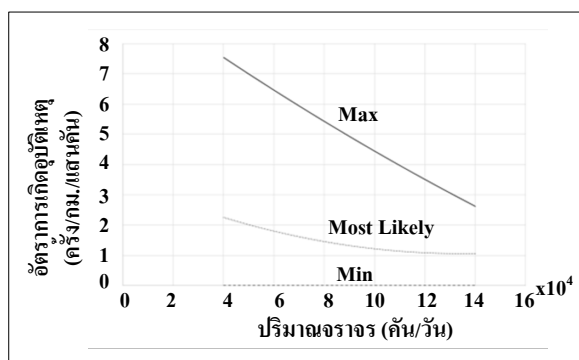


รูปที่ 8 ตัวอย่างการพยากรณ์ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันใน
อนาคต จำนวน 10 ครั้ง (10 simulated paths)

ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันที่ได้จากการพยากรณ์ในแต่ละปีนั้นจะนำไปพิจารณาคำนวณตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป เช่น รายได้จากการจัดเก็บค่าผ่านทาง ค่าจ่ายในการ O&M และการปรับลดค่าตอบแทน เป็นต้น

5.2.2. การพยากรณ์การเกิดอุบัติเหตุของโครงการ

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์อุบัติเหตุในโครงการจากค่าสถิติการเกิดอุบัติเหตุในทางหลวงทั่วประเทศไทยจำนวน 90 สายทาง พร้อมทั้งใช้ Envelope Method [11] สำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของอุบัติเหตุ โดยแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์อุบัติเหตุดังแสดงในรูปที่ 9



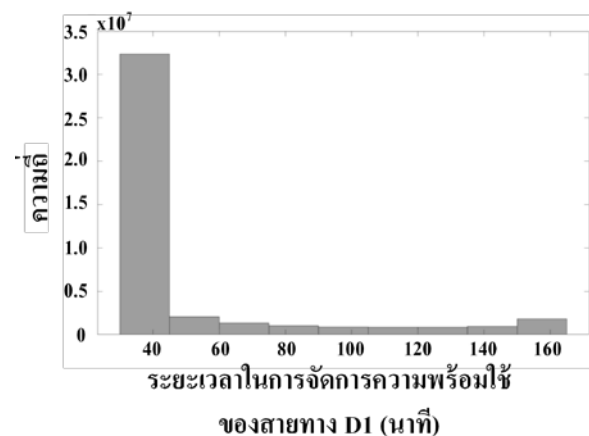
รูปที่ 9 กราฟแสดงอัตราการเกิดอุบัติเหตุต่อปริมาณจราจร

จากรูปที่ 9 สามารถพยากรณ์อัตราการเกิดอุบัติเหตุได้ตัวอย่างเช่น สมมุติปริมาณจราจรในอนาคตอยู่ที่ 60,000 คันต่อวัน ฉะนั้นแล้วอัตราการเกิดอุบัติเหตุจะมี “ค่าที่เป็นไปได้มากที่สุด” (Most Likely) ประมาณ 1.8 ครั้งต่อปีต่อกิโลเมตรต่อปริมาณจราจร 1 แสนคัน แต่จะไม่น้อยกว่า

ค่าน้อยที่สุด (Min) 0 ครั้ง และไม่เกินค่ามากที่สุด (Max) 6.5 ครั้ง

5.2.3. การพยากรณ์ระยะเวลาในการจัดการความพร้อมใช้ของสายทางของโครงการ

จากอัตราการเกิดอุบัติเหตุที่กล่าวมา เมื่อได้ผลลัพธ์แล้ว จะต้องทำการพยากรณ์ระยะเวลาในการจัดการความพร้อมใช้ของสายทางโดยงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ระยะเวลาในการจัดการความพร้อมใช้ของสายทาง จากข้อมูลสถิติของโครงการที่มีลักษณะใกล้เคียงกับทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 ซึ่งก็คือโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 โดยมีผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์ดังแสดงในรูปที่ 10

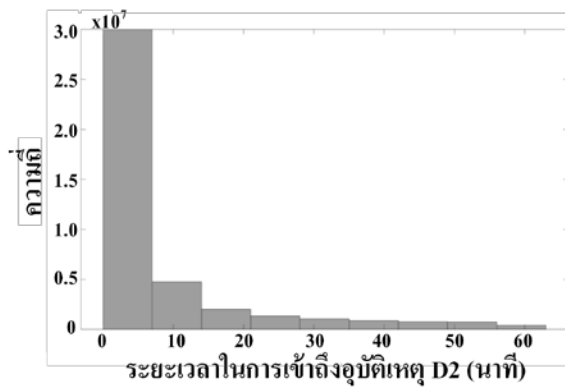


รูปที่ 10 กราฟแสดงความถี่ของระยะเวลาในการจัดการ
ความไม่พร้อมใช้ของสายทาง

รูปที่ 10 แสดงถึงค่าการกระจายตัวของระยะเวลาในการจัดการอุบัติเหตุในแต่ละครั้ง ซึ่งแต่ละระยะเวลาของอุบัติเหตุแต่ละครั้งจะถูกนำไปพิจารณาถึงค่าปรับจากความไม่พร้อมใช้ดังที่ได้แสดงตารางที่ 1 และ 2

5.2.4. การพยากรณ์ระยะเวลาในการเข้าถึงอุบัติเหตุในสายทาง

งานวิจัยนี้ได้พยากรณ์ระยะเวลาในการเข้าถึงอุบัติเหตุในสายทาง โดยนำข้อมูลสถิติของระยะเวลาในการเข้าถึงอุบัติเหตุจากโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 โดยมีผลลัพธ์จากการพยากรณ์ดังแสดงในรูปที่ 11

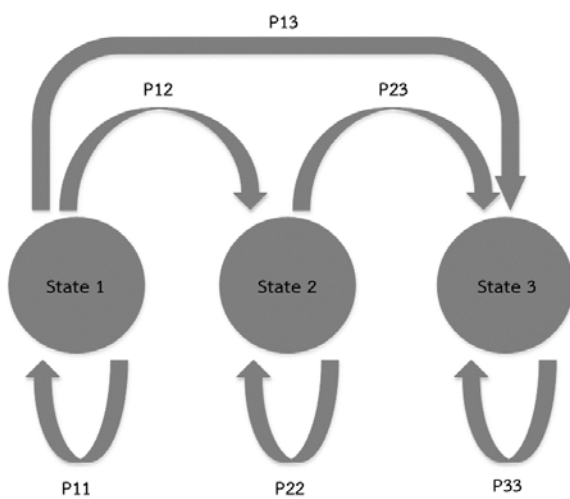


รูปที่ 11 กราฟแสดงความถี่ของระยะเวลาในการเข้าถึงอุบัติเหตุในสายทาง

เมื่อทราบค่าพยากรณ์ของระยะเวลาของการเข้าถึงอุบัติเหตุแต่ละครั้งแล้วนั้น ก็จะสามารถหาค่าคะแนนสำหรับการใช้ในการคำนวณการปรับลดค่าตอบแทนได้ โดยใช้ตารางที่ 3 ประกอบการคำนวณ

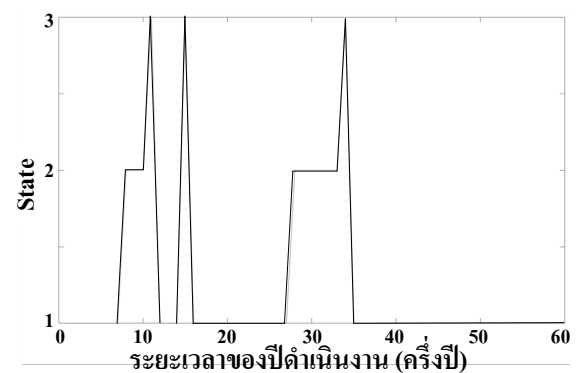
5.2.5. การพยากรณ์ดัชนีความขรุขระสากลของผิวจราจร (IRI)

งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลด้านการพยากรณ์สภาพความขรุขระของผิวจราจร โดยดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) โดยใช้หลักการของแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov chains) โดยเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจุบันเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นและมีความต่อเนื่องกัน สามารถอธิบายเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แผนภาพแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chains)

จากรูปที่ 12 ประกอบไปด้วย 1) สถานะ (State) ของตัวแปรที่สนใจคือสภาพผิวจราจร และ 2) ความน่าจะเป็น (Probability, P) คือความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง โดยงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะจากงานวิจัยของ Pérez-Acebo et al. [12] สำหรับการพยากรณ์สภาพความขรุขระของผิวจราจร เมื่อสถานะที่ได้จากการพยากรณ์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์การประเมิน เอกชนผู้ให้บริการจะต้องบำรุงรักษาผิวจราจรให้กลับมาอยู่ในสภาพที่เป็นไปตามเกณฑ์ โดยตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์ (ทุกครึ่งปี) ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์สถานะของผิวถนน

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าถนนได้มีการเปลี่ยนสถานะจาก State 1 ไปยัง State 2 และ 3 เมื่อเวลาผ่านไป เมื่อถนนอยู่ใน State 3 ซึ่งผิวจราจรมีค่า IRI เกินกว่า 3.5 ส่งผลให้เกิดการปรับคะแนนจากตารางที่ 4 แล้วนำไปคิดค่าปรับต่อไป อีกทั้งเอกชนต้องบำรุงรักษาผิวจราจรให้กลับมาอยู่ใน State 1 ดั้งเดิม ซึ่งจะถูกราคาเป็นค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม (Added costs) ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.2.3

6. ผลการวิเคราะห์โครงการกรณีศึกษา

เมื่อได้ผลการพยากรณ์ตัวแปรเสี่ยงแล้ว สามารถนำไปประมาณการรายได้จากการจัดเก็บ ค่าใช้จ่าย O&M และการปรับลดค่าตอบแทนทั้งการความไม่พร้อมใช้ของถนน และการดำเนินงานและบำรุงรักษาที่ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินและความเสี่ยงของแต่ละผู้มีส่วนได้เสียหลักทั้ง 3 โดยนำเสนอเป็น 2 กรณี คือ 1) ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินภายใต้สมมติฐานหลัก (Deterministic analysis) และ 2) ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินภายใต้ความไม่แน่นอน (Analysis under uncertainty) รายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

6.1. ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินภายใต้สมมติฐานหลัก (Deterministic analysis)

จากค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ (1), (2) และ (3) สามารถ

วิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินของรัฐเจ้าของโครงการ (Public agency) เอกชนผู้ให้บริการ (Private operator) และผู้ให้เงินกู้ยืม (Lenders) ได้ดังในตารางที่ 5-7

จากตารางที่ 5 จะพบว่าในช่วงปีแรกของโครงการ รัฐเจ้าของโครงการมีกระแสเงินสดสุทธิ (Net Cash Flow) ที่ติดลบจากการจ่ายค่าจัดกรรมสิทธิ์ที่ดินและค่าก่อสร้างงานโยธา แต่เมื่อโครงการได้มีการเปิดใช้งานจึงมีรายได้จากการเก็บค่าผ่านทางเช่นในปีที่ 10 กระแสเงินสดสุทธิจึงมีค่าที่เป็นบวก

ตารางที่ 5 ผลตอบแทนทางการเงินของรัฐเจ้าของโครงการ (Public agency)

ปี										รายการ
37	36	35	...	11	10	...	2	1	0	
-	-	-	...	-	-	...	-	-	6,630	ACQ_t (ล้านบาท)
-	-	-	...	-	-	...	17,556	18,733	-	I_t (ล้านบาท)
-	-	-	...	359	359	...	-	-	-	CR_t (ล้านบาท)
36.6	36.2	35.8	...	18.4	17.5	...	-	-	-	$AADT_t$ (ล้านคัน)
9,805	9,495	9,194	...	2,567	2,388	...	-	-	-	รายได้จากค่าธรรมเนียม (ล้านบาท)
25	24	24	...	0	0	...	-	-	-	PA_t (ล้านบาท)
2874	2727	2596	...	797	759	...	-	-	-	OMP_t (ล้านบาท)
6,931	6,768	6,597	...	1,411	1,269	...	-17,556	-18,733	-6,630	Net Cash Flow (ล้านบาท)
1,624	1,649	1,672	...	916	858	...	-16,232	-18,013	-6,630	PV of Net Cash Flow (ล้านบาท)
-24,209 ล้านบาท										ผลตอบแทนทางการเงินสุทธิ (Y_P)

เอกชนผู้ให้บริการในตารางที่ 6 มีลักษณะที่เหมือนกับรัฐเจ้าของโครงการ ในช่วง 3 ปีแรกเป็นช่วงก่อสร้างงานระบบ ทำให้กระแสเงินสดสุทธิมีค่าที่ติดลบ แต่เมื่อโครงการได้เปิดใช้งานแล้ว เอกชนผู้ให้บริการจะได้รับค่าตอบแทนจากการดำเนินงานและบำรุงรักษา (OMP_t) และเงินชดเชยจากการก่อสร้างงานระบบ (CR_t) ทำให้กระแสเงินสดสุทธิของโครงการมีค่าเป็นบวก ส่วนของผู้ให้เงินกู้ยืมจากตารางที่ 7 นั้น พิจารณาค่าจาก DSCR ของ

โครงการในแต่ละปี โดยพิจารณาในปีที่เริ่มการชำระเงินกู้

6.2. ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินภายใต้ความไม่แน่นอน (Analysis under uncertainty)

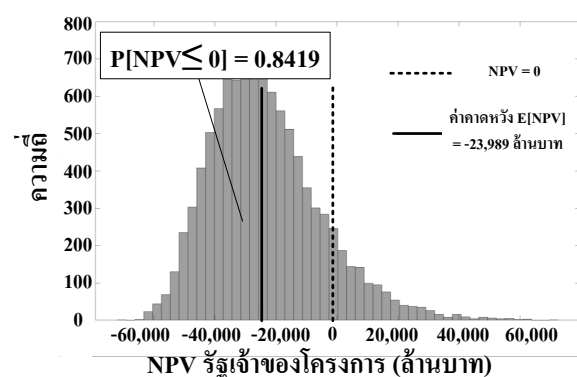
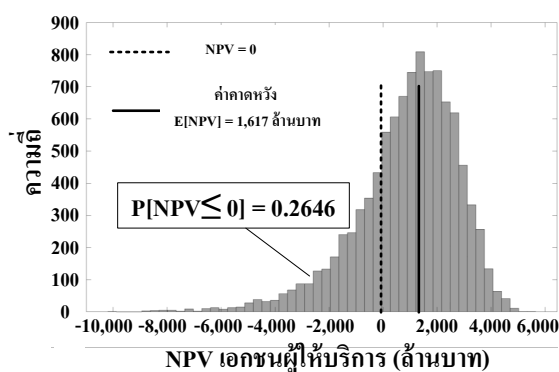
ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินภายใต้ความไม่แน่นอน ของรัฐเจ้าของโครงการ เอกชนผู้ให้บริการ และผู้ให้เงินกู้ยืม โดยใช้วิธี Monte Carlo simulation และใช้จำนวนการสุ่มเท่ากับ 10,000 ครั้ง เป็นดังแสดงในรูปที่ 14-16

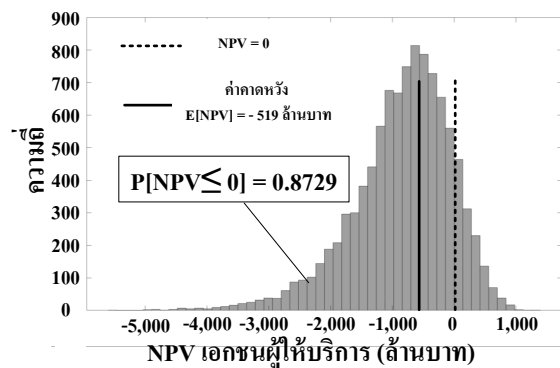
ตารางที่ 6 ผลตอบแทนทางการเงินของเอกชนผู้ให้บริการ (Private operator)

รายการ	ปีที่								
	0	1	2	3	4	...	30	31	32
C_i (ล้านบาท)	2,156	2,156	2,875	-	-	...	-	-	-
F_i (ล้านบาท)	43	43	57	-	-	...	-	-	-
OMP_i (ล้านบาท)	-	-	-	713	723	...	2,580	2,710	2,857
CR_i (ล้านบาท)	-	-	-	359	359	...	-	-	-
PA_i (ล้านบาท)	-	-	-	0	0	...	24	24	25
OM_i (ล้านบาท)	-	-	-	411	442	...	1,830	1,889	1,951
DS_i (ล้านบาท)	-	-	-	293	293	...	-	-	-
Tax_i (ล้านบาท)	-	-	-	40	36	...	100	114	131
Net Cash Flow (ล้านบาท)	-1,078	-1,078	-1,437	330	311	...	641	697	765
PV of Net Cash Flow (ล้านบาท)	-1,078	-993	-1,219	257	224	...	54	54	55
ผลตอบแทนทางการเงิน (Y_o) กรณี $r_E = 4\%$	1,647 ล้านบาท								
ผลตอบแทนทางการเงิน (Y_o) กรณี $r_E = 8.6\%$	-489 ล้านบาท								

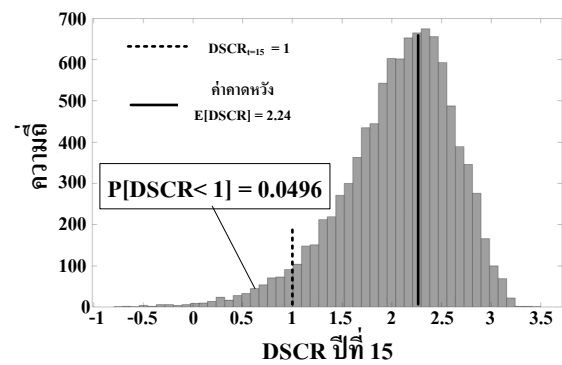
ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ค่า DSCR ของสถาบันการเงินผู้ให้เงินกู้ (Lenders)

รายการ	ปีที่									
	0	1	2	3	4	5	...	25	26	27
Loan (ล้านบาท)	1,078	1,078	1,437	-	-	-	...	-	-	-
FCF (ล้านบาท)	-	-	-	662	640	643	...	455	504	557
DS (ล้านบาท)	-	-	-	293	293	293	...	293	293	293
DSCR	-	-	-	2.26	2.19	2.20	...	1.55	1.72	1.90

รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านผลตอบแทน
การเงินของรัฐเจ้าของโครงการรูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านผลตอบแทน
การเงินของเอกชนผู้ให้บริการกรณี $r_E = 4\%$

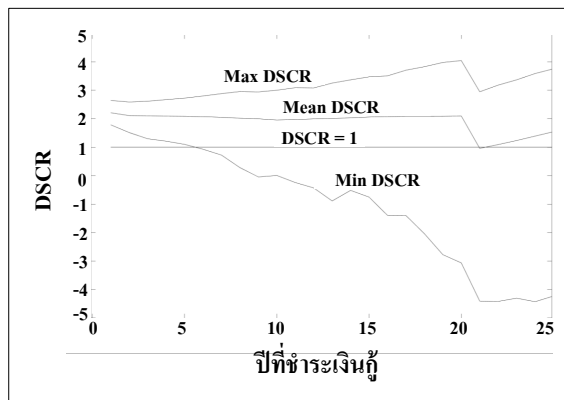


รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านผลตอบแทน
การเงินของเอกชนผู้ให้บริการกรณี $r_E = 8.6\%$



รูปที่ 18 ตัวอย่างของ Histogram ของค่า DSRC ในปีที่
15

ส่วนผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงของผู้ให้เงินกู้ยืมโดยใช้
ค่า DSCR เป็นดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 กราฟแสดงค่า DSCR ใน 3 กรณี ได้แก่ 1) ค่า
DSCR เฉลี่ย 2) ค่า DSCR สูงสุด และ 3) ค่า DSCR ต่ำสุด

โดยจากรูปที่ 17 จะพบว่าผู้ให้เงินกู้มีค่าเฉลี่ยของ
DSCR (เส้นกราฟ Mean DSCR) ที่สูงกว่า 1.00 ตลอด
ช่วงเวลาของการจ่ายเงินกู้ (25 ปี) ยกเว้นปีที่ 21 และ
หากมองถึงความเสี่ยงของผู้ให้เงินกู้พบว่าหลังปีที่ 7 เอกชน
ผู้ให้บริการอาจมีปัญหากการคืนเงินกู้ได้ ซึ่งการวิเคราะห์
ความเสี่ยงนี้ต้องวิเคราะห์เป็นรายปี ยกตัวอย่างเช่น หาก
ต้องการวิเคราะห์ความเสี่ยงของผู้ให้เงินกู้ ในปีที่ 15 โดย
ใช้เกณฑ์ DSCR ที่ต้องมากกว่า 1.00 เป็นต้น พบว่าค่า
โอกาสที่ค่า DSCR ของโครงการมีค่าน้อยกว่า 1.00 มี
ค่าประมาณ 4.96% ($P[DSCR < 1] = 4.96\%$) ดังแสดงในรูป
ที่ 18

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งของรัฐเจ้าของ
โครงการ เอกชนผู้ให้บริการ และผู้ให้เงินกู้ นั้น มาจากการ
พยากรณ์ตัวแปรต่างๆ และคำนวณในสมการผลตอบแทน
ทางการเงิน ด้วยหลักการ Monte Carlo simulation ทำให้
เห็นถึงช่วงของผลลัพธ์ของการพยากรณ์ที่เป็นไปได้
(Possible range of outcomes) ซึ่งแสดงถึงความเสี่ยงที่
อาจจะเกิดขึ้นกับผลตอบแทนทางการเงิน

7. อภิปรายผลและสรุปผลการศึกษา

จากผลการวิเคราะห์โครงการกรณีศึกษา พบว่า
หน่วยงานรัฐที่เป็นเจ้าของโครงการ มีผลตอบแทนทาง
การเงินสุทธิ -24,209 ล้านบาทกรณีใช้อัตราคิดลด 4% โดย
เมื่อคิดเป็นโอกาสที่ผลตอบแทนจากการลงทุนที่เป็นบวก
ประมาณ 15.59% ($P[NPV > 0] = 15.59\%$) ดังแสดงในรูป
ที่ 14 หรือมีความเสี่ยงทางการเงินที่จะมีมูลค่าปัจจุบัน
สุทธิเป็นลบประมาณ 84.41% ($P[NPV < 0] = 84.41\%$)
นั่นเอง อย่างไรก็ตามเนื่องมาจากงานวิจัยนี้มีขอบเขตของ
การศึกษาความต้องการจากการลงทุนเฉพาะผลตอบแทน
ทางการเงินเท่านั้น ยังไม่ได้คำนึงถึงผลตอบแทน
ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ตัวอย่างเช่น มูลค่าที่ประหยัดไปได้
จากต้นทุนที่ลดลงของผู้ใช้ทาง เวลาการเดินทางและ
อุบัติเหตุที่ลดลง เป็นต้น อีกทั้งงานวิจัยนี้ได้พิจารณาใน
ส่วนของค่าจรรยาบรรณที่รวมด้วย และจากการศึกษาพบว่า
ปัจจัยเสี่ยงที่มากที่สุดของรัฐเจ้าของโครงการ คือ ปริมาณ
จราจรของโครงการในอนาคต

ในส่วนเอกชนผู้ให้บริการ จากผลการวิเคราะห์พบว่า เอกชนมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 1,647 ล้านบาทกรณีใช้อัตราคิดลด 4% และ -489 ล้านบาทกรณีใช้อัตราคิดลด 8.6%

อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ใช้วงเงินประมุลจริงของผู้ที่ชนะการประมูล ซึ่งน้อยกว่าราคากลางของรัฐประมาณ 36% ทำให้ผลตอบแทนของเอกชนน้อยกว่าที่ประเมินในรายงานการศึกษาความเป็นไปได้ของกรมทางหลวง และเมื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงพบว่า โอกาสที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่อัตราคิดลด 4% จะเป็นลบ มีค่าประมาณ 26.46% ($P[NPV < 0] = 26.46\%$) (ดูรูปที่ 15 ประกอบ) และหากใช้อัตราคิดลด 8.6% จะมีความเสี่ยงที่ NPV จะติดลบ ประมาณ 87.29% ($P[NPV < 0] = 87.29\%$) (ดูรูปที่ 16 ประกอบ) โดยปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญที่สุดของเอกชนผู้ให้บริการ คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา (O&M cost) ตลอดอายุโครงการ

ส่วนในกรณีของผู้ให้เงินกู้ บทความนี้เสนอการประเมินความเสี่ยงของผู้ให้เงินกู้กับเอกชนผู้ให้บริการที่จะไม่ได้รับชำระเงินกู้คืน (Debt repayment risk) โดยใช้เกณฑ์ดัชนี DSCR ที่ต้องมากกว่า 1 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ค่า DSCR มีค่าสูงกว่า 1.00 ตลอดอายุของสัญญาเงินกู้ ยกเว้นในปีที่ 21 ของการชำระเงินกู้ อีกทั้งผู้ให้เงินกู้ยังมีความเสี่ยงที่จะไม่ได้รับเงินกู้คืนครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ในแต่ละปี ซึ่งค่าความเสี่ยงนี้ต้องวิเคราะห์เป็นรายปี ดังเช่นที่ได้กล่าวในหัวข้อ 6.2 โดยจากผลการวิเคราะห์โดยรวมสรุปได้ว่า ปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญที่สุดของผู้ให้เงินกู้ (Lenders) คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา (O&M Cost) ของเอกชนผู้ให้บริการ

จากปัจจัยเสี่ยงที่แต่ละภาคส่วนต้องแบกรับนั้น รัฐเจ้าของโครงการมีความต้องการให้มีผู้ให้บริการมาก เพื่อให้มีรายรับที่สูงขึ้น ส่วนเอกชนผู้ให้บริการนั้น มีความต้องการในการลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา เช่นเดียวกับผู้ให้เงินกู้ แต่ทว่าค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษานั้นแปรผันตรงกับปริมาณจราจร จึงก่อให้เกิดแนวทางในการดำเนินงานที่ไม่เหมือนกัน ฉะนั้นแล้วรัฐเจ้าของโครงการควรจะต้องสร้างแรงจูงใจ

สำหรับผู้ให้บริการให้มีความต้องการที่เพิ่มขึ้นทางด้านปริมาณจราจรด้วย เพื่อให้ทิศทางของผลประโยชน์ไปในแนวเดียวกับ (Alignment of interest) ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำสัญญา PPP O&M มาใช้ในการพัฒนาโครงข่ายทางหลวงระหว่างเมืองของประเทศไทยต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Weber and W.H. Alfen, "Infrastructure—An Overview," in *Infrastructure as an Asset Class*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2012, ch. 1, sec. 1.1–1.3, pp. 1–20.
- [2] M. Garvin and D. Bosso, "Assessing the Effectiveness of Infrastructure Public—Private Partnership Programs and Projects," *Public Works Management & Policy*, vol. 13, no. 2, pp.162–178, 2008, doi: 10.1177/1087724X08323845
- [3] E. Engel, R. Fischer and A. Galetovic, "Public-Private Partnerships: Some Lessons After 30 Years. *Regulation*," vol. 43, no. 3, pp. 30–35, 2020.
- [4] S. Guiny, D. Mirchandani, B. Clark, M. Ham, V. Hallikeri and Sasha Page, "Public-Private Partnership Availability Payment Concessions Model Contract Guide," Federal Highway Administration Office of Innovative Program Delivery, Washington, DC, USA, Rep. FHWA-HIN-17-002, 2016. [Online]. Available: https://www.transportation.gov/buildamerica/sites/buildamerica.dot.gov/files/2019-08/ap_concession_model_p3_contract_guide_0117_0.pdf
- [5] *Public-Private Partnerships (P3s)*, 2017. [Online]. Available: https://www.fhwa.dot.gov/ipd/pdfs/fact_sheets/techtools_P3_payment_mechanisms.pdf
- [6] A. Mahmoud., "A survey of the payment mechanisms for transportation DBFO projects in British Columbia," *Construction Management & Economics*, vol. 25, no. 5, pp. 529–543, 2007, doi: 10.1080/01446190601161465
- [7] A. A. Aziz and K. Abdelhalim, "Comparative Analysis of P3 Availability Payments in the USA and Canada,"

- Second International Conference on Public-Private Partnerships*, Austin, TX, USA, May 26–29, 2015, pp. 560–573, 2017, doi: 10.1061/9780784480267.044
- [8] Ministry of Transport, “Public Private Partnership for Operation and Maintenance (O&M), Bang Pa-In - Nakhon Ratchasima Intercity Motorway Project,” Department of Highways, Bangkok, Thailand, Proposal Volume 4 DOH's Requirement: Part 3 Outline Operation and Maintenance Specification Rep., 2019.
- [9] J. Mun, “On the Shores of Monaco” in *Modeling Risk: Applying Monte Carlo Simulation, Real Options Analysis, Stochastic Forecasting, and Optimization Techniques*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2006, ch. 4, sec. 3, pp. 74–77.
- [10] Suranaree University of Technology, “Study and analysis of the feasibility of Public-Private Partnership for Operation&Maintenance (O&M) Intercity Motorway Bang Pa-in - Nakornratchasima,”. Department of Highways, Bangkok, Thailand, main Rep., 2016.
- [11] D. Vose, “Modelling correlation and dependencies” in *Risk Analysis—A Quantitative Guide.*: Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2008, ch. 13, sec.4, pp. 380.
- [12] H. Pérez-Acebo, N. Mindra, A. Railean and E. Rojí, “Rigid pavement performance models by means of Markov Chains with half-year step time,” *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, no. 7, pp. 830–843, 2019, doi: 10.1080/10298436.2017.1353390

วงจรแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันแบบประหยัดความแม่นยำสูง

Low-Cost and High-Precision Inverse Sine Function Circuit

สมปอง วิเศษพานิชกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Sompong Wisetphanichkij

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

*Corresponding Author E-mail: sompong.wi@kmitl.ac.th

Received: May 16, 2022; Revised: Aug 14, 2022; Accepted: Aug 23, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการประมาณค่าการแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันแบบใหม่ โดยอาศัยการประมาณค่าของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผันและการจัดการทางคณิตศาสตร์ โดยแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงเลขเพื่อกำหนดอัตราขยายสัญญาณที่เหมาะสม ทำให้ได้การแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันที่ได้มีความแม่นยำสูงและค่าความผิดพลาดต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ วงจรที่นำเสนอสร้างขึ้นจากวงจรขยายค่าความนำ (OTA) ที่มีคู่ทรานซิสเตอร์ส่วนหน้าทำหน้าที่เป็นวงจรผลต่างและการกำหนดสัญญาณอินพุตของและกระแสไบอัสที่เหมาะสม ร่วมกับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส ซึ่งมีอัตราขยายสัญญาณตามที่กำหนด วงจรที่เสนอจึงมีขนาดเล็กโดยประกอบด้วยวงจรขยาย (Op-Amp) และวงจรขยายค่าความนำ (OTA) อย่างละ 2 ตัว กับตัวต้านทาน ผลการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานของวงจร แสดงประสิทธิภาพของวงจรที่เสนอโดยมีค่าผิดพลาดประมาณ 1.2 องศา และ ค่าความผิดพลาดแบบ RMS จากองค์ประกอบความถี่ที่ถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.8%

คำสำคัญ: วงจรแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผัน, วงจรขยายค่าความนำ, วงจรไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์, การประมาณการเชิงเลข

Abstract

This paper proposes a new estimation method of the inverse sine function transformation. By taking the approximation of the hyperbolic tangent function, the inverse hyperbolic tangent function and mathematic manipulation determine the appropriate signal gains with the numerical computer program. The inverse sine function comes with small errors and high accuracy when compared to the previous methods. The proposed inverse sine function circuit is synthesized from an operational transconductance amplifier (OTA) with a bipolar transistor differential-pair front end circuit and the appropriate configuration of the input signal and bias current. With an inverting summing amplifier circuit, it amplifies the signal according to the specified gain. The proposed circuit is compact. It consists of two amplifier circuits (Op-Amp) and two conductivity amplifiers (OTA) with some resistors. The results of a circuit simulator show the error of approximately 1.2 degrees and a Root Mean Square Error (RMSE) of the weighted frequency component 0.8%.

Keywords: Inverse sine function circuit, Operation transconductance amplifier, Hyperbolic tangent circuit, Numerical approximation

1. บทนำ

วงจรฟังก์ชันไซน์ผกผัน (Inverse Sinusoidal Circuit) เป็นวงจรแปลงสัญญาณคลื่นไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมที่มีค่าสอดคล้องกับมุม (เฟส) ของสัญญาณไซน์ ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการประมวลผลสัญญาณทั้งในระบบควบคุมระบบเครื่องมือวัด และระบบสื่อสาร เช่น เป็นส่วนประกอบของวงจรรีโซลเวอร์ (Resolver circuit) [1] ที่ใช้สำหรับการวัดตำแหน่งองศาการหมุนของเพลลา โดยวงจรรีโซลเวอร์จะมีโครงสร้างคล้ายมอเตอร์คือ ประกอบด้วยโรเตอร์ทำหน้าที่เป็นขดลวดอ้างอิง (ปฐมภูมิ) และสเตเตอร์ ทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิซึ่งจะให้ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งขั้วมาเป็นสัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งองศาของเพลลา โดยวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันจะทำการแปลงสัญญาณไซน์ให้เป็นค่ามุมสำหรับเป็นสัญญาณในการควบคุมมอเตอร์ หรือเป็นส่วนหนึ่งของวงจรกำเนิดสัญญาณ (signal generator) [2] ในการสร้างสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมจากการแปลงกลับสัญญาณไซน์ที่ได้จากวงจรวงจรออสซิลเลเตอร์สำหรับงานทดสอบและเครื่องมือวัด วงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันยังสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจจับเฟสของสัญญาณ สำหรับการประยุกต์ใช้ในวงจรเฟสล็อกกลูป (PLL) [3] ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานสำหรับระบบวัดมุมและระบบสื่อสาร นอกจากนี้ วงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันยังสามารถนำไปใช้ในการลดผลฮาร์มอนิกจากการไบอัสวงจรมอดูเลเตอร์ทางแสง (Mach-Zehnder modulator (MZM)) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ [4] และยังสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ [5]

ในการสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ผกผันสามารถสร้างขึ้นด้วยหลายเทคนิค ทั้งในรูปแบบของวงจรแอนะล็อกและด้วยการคำนวณแบบดิจิทัล ซึ่งเทคนิคการคำนวณแบบดิจิทัลนั้น มักใช้ตัวประมวลผลดิจิทัลร่วมกับอัลกอริทึมการประมวลผลเชิงเลข ซึ่งทำให้เกิดค่าหน่วงเวลาอันเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานในระบบเรียลไทม์ [6-7] ในขณะที่เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยวงจรแอนะล็อก [2-4], [8-13] ให้ผลตอบสนองแบบเวลาจริง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับงานประเภทเรียลไทม์

แนวทางพื้นฐานวิธีการหนึ่งสำหรับสังเคราะห์วงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันคือการใช้วงจรกำเนิดฟังก์ชันไซน์ทำการ

เชื่อมต่อกับวงจรขยายที่มีการป้อนกลับ โดยวงจรป้อนกลับจะถูกออกแบบด้วยวงจรประมวลผลหลายอย่าง เช่น วงจรคูณ วงจรหาร วงจรค่าสัมบูรณ์ และสวิตช์แบบแอนะล็อกในการสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ผกผัน [8-11] ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของตัวสร้างฟังก์ชันไซน์ และวงจรย่อยต่างๆ ในวงจรป้อนกลับ นอกจากนี้วงจรประเภทนี้จะมีขยายใหญ่และซับซ้อน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการออกแบบและใช้งาน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำเสนอการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมหรือวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันโดยอาศัยการประมาณค่าทางคณิตศาสตร์ด้วยฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน [12-14] ที่มีข้อดีคือวงจรมีขนาดเล็กและประหยัด

ในบทความนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันที่มีการปรับปรุงให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยการปรับปรุงฟังก์ชันการประมาณค่าเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีค่าความผิดพลาดน้อยลง โดยส่วนที่ 2 จะแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับเทคนิคที่เสนอการด้วยการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผัน และการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB ส่วน 3 และ 4 แสดงวงจรที่นำเสนอและผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ PSpice® ตามลำดับ โดยส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนสรุปซึ่งจะกล่าวถึงข้อสังเกตและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

2. การประมาณฟังก์ชันไซน์ผกผัน

ฟังก์ชันตรีโกณมิติสามารถหาอินเวอร์สได้โดยสลับที่ระหว่างโดเมนและเรนจ์ที่มีช่วงจำกัดระหว่าง $[-\pi/2, \pi/2]$ สำหรับวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันเป็นวงจรที่ให้เอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 1(a) เมื่อทำการป้อนสัญญาณ x ในช่วง $[-1, 1]$ และเมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตด้วยสัญญาณไซน์ วงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันจะให้เอาต์พุตเป็นค่ามุมของสัญญาณไซน์แสดงในรูปที่ 1(b) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle wave) ที่มีความถี่เดียวกันกับสัญญาณไซน์

สำหรับการประมาณค่าฟังก์ชันด้วยวิธีการประมาณด้วยอนุกรมกำลัง (Power series) [12-15] มีข้อดีหลายประการ คือค่าที่ได้จากการประมาณมีความต่อเนื่อง วงจรที่สังเคราะห์ขึ้น

มีขนาดเล็ก ใช้อุปกรณ์น้อย ทำให้สามารถการออกแบบและควบคุมการทำงานของวงจรได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผันด้วยอนุกรมกำลังบนฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน [12–14] ด้วยการกำหนดอัตราขยายที่เหมาะสม ทำให้ได้อนุกรมกำลังที่ได้จากการประมาณ มีความใกล้เคียงกับอนุกรมกำลังที่ได้จากการแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผัน อย่างไรก็ตาม การประมาณด้วยเทคนิคดังกล่าวจะใกล้เคียงกับฟังก์ชันไซน์ผกผันเฉพาะเมื่อ $|x|$ มีค่าน้อย และจะมีค่าผิดพลาดเพิ่มขึ้นเมื่อ $|x|$ มีค่ามากขึ้น

ในบทความนี้นำเสนอการประมาณฟังก์ชันไซน์ผกผัน โดยปรับปรุงจากเทคนิคการประมาณด้วยฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน เพื่อให้ผลการประมาณค่ามีความผิดพลาดต่ำลง ด้วยการเพิ่มส่วนฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก ที่ให้ผลตอบสนองต่ำลงเมื่อ $|x|$ มีค่ามากขึ้น ทำให้ได้ค่าประมาณฟังก์ชันไซน์ผกผันที่ใกล้เคียงมากขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (1) เมื่อมีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ a, b และ c ที่เหมาะสม

$$V_{\text{asin_proposed}}(v_{\text{sin}}) = c * \tanh(a * v_{\text{sin}} + b * \operatorname{atanh}(v_{\text{sin}})) \quad (1)$$

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ ทำได้โดยการแทนค่าฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน ด้วยอนุกรมกำลัง (สมการที่ (2)) ลงในสมการที่ (1) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\operatorname{atanh}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1} = x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \frac{x^7}{7} \dots; |x| < 1 \quad (2)$$

$$V_{\text{asin_proposed}}(v_{\text{sin}}) = c * \tanh\left(a * v_{\text{sin}} + b\left(v_{\text{sin}} + \frac{(v_{\text{sin}})^3}{3} + \frac{(v_{\text{sin}})^5}{5} + \dots\right)\right); |v_{\text{sin}}| < 1 \quad (3)$$

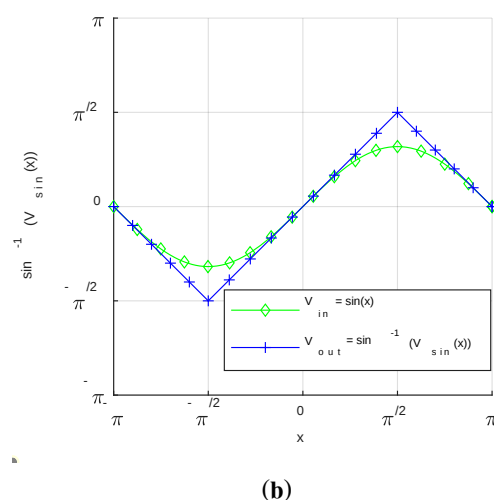
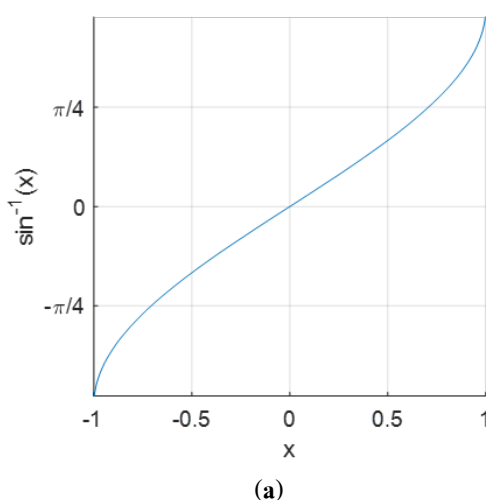
เนื่องจากฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์สามารถแปลงเป็นอนุกรมกำลังดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\tanh(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n}(2^{2n}-1)B_{2n}x^{2n-1}}{(2n)!} = x - \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} - \frac{17x^7}{315} \dots; |x| < \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

เมื่อ B_{2n} คือ Bernoulli number

และทำการแทนสัญญาณอินพุตไซน์ด้วยอนุกรมกำลัง $v_{\text{sin}}(x) = \sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots$, เมื่อ $x \in R$ และมีหน่วยเป็นเรเดียน ดังนั้น จะได้การประมาณฟังก์ชันไซน์ผกผันดังแสดงในสมการที่ (5)

$$V_{\text{asin_proposed}}(v_{\text{sin}}(x)) = c(a + b)x + c\left(\frac{1}{3}(a + b)^3 + \frac{1}{6}(a - b)\right)x^3 + c\left(\frac{2}{15}(a + b)^5 - \frac{1}{18}(a - b)^3 + \frac{2}{9}(a^3 - b^3) + \frac{a}{120} + \frac{b}{24}\right)x^5 + \dots; |x| < \frac{\pi}{2} \quad (5)$$



รูปที่ 1 การแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผัน (a) เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต $x \in [-1, 1]$ (b) เมื่อป้อนสัญญาณ $\sin(x)$

เมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันไซน์ผกผัน(ในอุดมคติ)ที่ทำให้การป้อนด้วยสัญญาณอินพุตไซน์จะให้เอาต์พุตเป็นค่ามุม x ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$V_{asin_ideal}(v_{sin}(x)) = asin(v_{sin}(x)) \\ = x ; \quad |x| < \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

ดังนั้นเพื่อให้ค่าประมาณมีค่าใกล้เคียงกับฟังก์ชันไซน์ผกผัน เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (พจน์ x) จะได้ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ a, b และ c ดังสมการที่ (7)

$$c(a + b) = 1 \text{ หรือ } b = \frac{1}{c} - a \quad (7)$$

โดยค่าความผิดพลาดจากการประมาณ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$err(v_{sin}) = V_{asin_proposed}(v_{sin}) - V_{asin_ideal}(v_{sin}) \quad (8)$$

เมื่อแทนสมการที่ (1) และ (6) ในสมการที่ (8) จะได้ค่าความผิดพลาดดังแสดงในสมการที่ (9)

$$err(v_{sin}) = c * \tanh(a * v_{sin} + b * \operatorname{atanh}(v_{sin})) - x \quad (9)$$

หากกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ให้ค่าผิดพลาดที่ตำแหน่ง $x = -\pi/2$ และ $\pi/2$ มีค่าเป็น 0 หรือ $\lim_{x \rightarrow \pm \frac{\pi}{2}} err(x) = 0$ หรือ

$\lim_{v_{sin} \rightarrow \pm 1} err(v_{sin}) = 0$ จากสมการที่ (9) โดยใช้หลักเกณฑ์โลปีตาล (L'Hôpital's rule) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ c ดังสมการที่ (10)

$$c = 1.5708 \quad (10)$$

เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผัน (สมการที่ (1)) ที่มีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันไซน์ผกผัน (สมการที่ (6)) มากที่สุด หากกำหนดให้ $\epsilon(x)$ แทนค่าผิดพลาดกำลังสองสะสมที่ได้จากการอินทิเกรตตลอดช่วง $x = (-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2})$

$$\epsilon = \int_{x=-\frac{\pi}{2}}^{x=\frac{\pi}{2}} (err(v_{sin}(x)))^2 dx \quad (11)$$

โดยค่าความผิดพลาด $err(v_{sin})$ สามารถหาได้จากแทนค่าสัมประสิทธิ์ b และ c ที่ได้สมการที่ (7) และ (10) ลงในสมการที่ (9) จากนั้นจึงแทนลงในสมการที่ (11) ซึ่งจะได้ค่าผิดพลาดกำลังสองสะสมในสมการที่ (12) (แสดงเฉพาะพจน์ที่มีกำลังต่ำกว่าหรือเท่ากับ 6)

$$\epsilon(a) \approx 4.341 * a^6 + 4.440 * a^5 + 2.783 * a^4 + 1.633 * a^3 + 0.776 * a^2 + 0.344 * a - 0.0355 \quad (12)$$

รูปที่ 2(a) แสดงค่าอินทิกรัลของค่าผิดพลาดกำลังสองตลอดช่วง $x = (-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2})$ พบว่า ค่าผิดพลาดกำลังสองสะสมจะมีค่าต่ำเมื่อ a มีค่าระหว่าง -1 ถึง 0.5 ซึ่งเป็นช่วงที่กว้าง ทำให้ง่ายเมื่อนำไปออกแบบวงจร อย่างไรก็ตาม ในการหาค่า a ที่ทำให้ค่าผิดพลาดกำลังสองที่ค่าต่ำสุด ทำได้โดยการหาอนุพันธ์ของค่าผิดพลาดกำลังสองเทียบกับค่า a ที่ให้ค่าเท่ากับ 0 ดังแสดงในรูปที่ 2(b) จากผลการคำนวณด้วย MATLAB จะได้

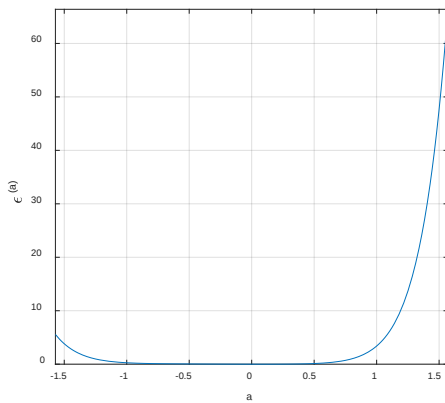
$$a = 0.0824 \quad (13)$$

เมื่อได้สัมประสิทธิ์ c และ a ตามสมการที่ (10) และ (13) แล้ว ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ b (สมการที่ (14)) โดยแทนลงในสมการที่ (7) ดังนั้น

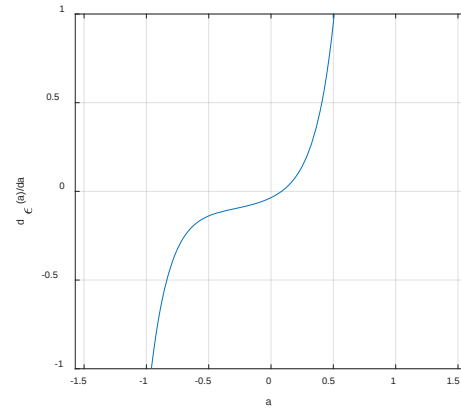
$$b = 0.5542 \quad (14)$$

เมื่อได้สัมประสิทธิ์ a, b และ c จากสมการที่ (13), (14) และ (10) เมื่อแทนลงในสมการที่ (1) จะได้สมการการประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผันดังสมการที่ (15)

$$V_{asin_proposed}(v_{sin}) = 1.5708 * \tanh(0.0824 * v_{sin} + 0.5542 * \operatorname{atanh}(v_{sin})) ; |v_{sin}| < 1 \quad (15)$$



(a)



(b)

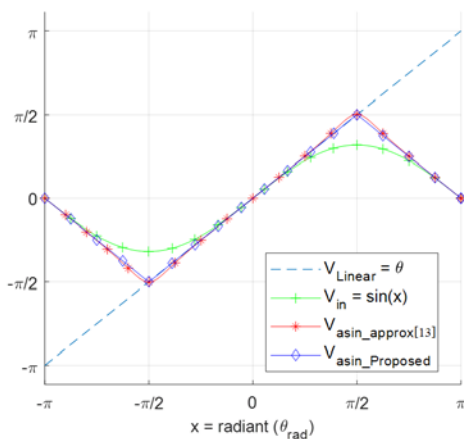
รูปที่ 2 (a) ค่าอินทิกรัลของค่าผิดพลาดกำลังสอง (สมการที่ (11)) (b) ค่าอนุพันธ์ของค่าผิดพลาดกำลังสองเทียบกับค่า a

รูปที่ 3(a) แสดงการประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอ (สมการที่ (15)) เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุต (v_{Sin}) เป็นสัญญาณไซน์ ($\sin(x)$) โดยเปรียบเทียบกับค่าประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอโดย [13] รูปที่ 3(b) แสดงค่าผิดพลาดของการประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผัน โดยแกน y จะแสดงในรูปแบบองศา ซึ่งจะพบว่า การประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอจะได้ค่ามุมผิดพลาดต่ำตลอดช่วงการ $[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}]$ และมีค่ามุมผิดพลาดจากการแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันในช่วง ± 0.2 องศา

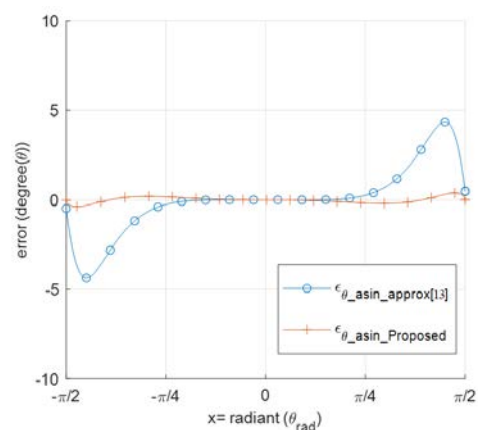
ดังนั้น ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาด RMS(%) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (16)

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{x=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (err(v_{Sin}(x)))^2 dx} * 100\% \quad (16)$$

เมื่อทำการคำนวณด้วย MATLAB จะพบว่า การประมาณฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอ (สมการที่ (1)) เมื่อกำหนดค่าอัตราขยาย (a , b และ c) ที่เหมาะสม จะได้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาดของฟังก์ชันประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอ (RMS) ที่ต่ำเพียง 0.154%



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) การประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผัน (b) ค่าผิดพลาดของการประมาณค่าฟังก์ชันไซน์ผกผัน

3. วงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอ

ในการสังเคราะห์วงจรฟังก์ชันไซน์ผกผัน จากสมการการประมาณฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอ (สมการที่ (1)) จะประกอบไปด้วยฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์และฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้หลายวิธี [13–14] ในบทความนี้จะใช้วงจรขยายค่าความนำ (Operational transconductance amplifier, OTA) หรือโอทีเอ (รูปที่ 4(a)) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่สามารถแปรค่าอัตราขยายความนำ (Transconductance gain) ได้อย่างเป็นเชิงเส้น สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาที่ถูก โดยวงจรภายในส่วนหน้าจะประกอบไปด้วยวงจรคู่ผลต่าง (Differential Amplifier) ที่สร้างขึ้นจากคู่อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ที่มีความสมมาตรกัน ทำหน้าที่เปลี่ยนผลต่างศักย์อินพุตเป็นกระแสก่อนที่จะถูกขยายเป็นกระแสเอาต์พุต โดยมีความสมการถ่ายโอนสัญญาณขนาดใหญ่แสดงในสมการที่ (17) [13]

$$I_{out} = mI_B \tanh\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \quad (17)$$

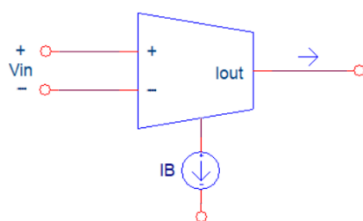
เมื่อ I_B คือกระแสไบอัสของวงจรขยายค่าความนำ

V_T คือแรงดันเชิงอุณหภูมิ (Thermal voltage) ที่มีค่า

$$\text{เท่ากับ } \frac{kT}{q}$$

k คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน มีค่าเท่ากับ $1.3806503 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน



(a)

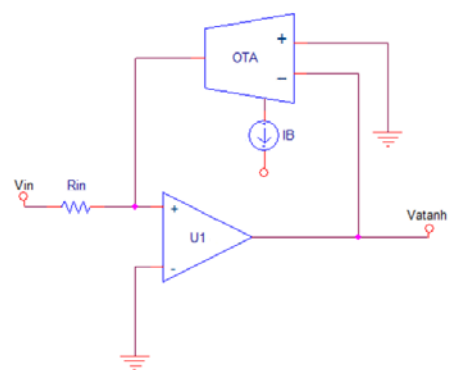
q คือประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602176487 \times 10^{-19} \text{ C}$

m คือค่าคงที่ขึ้นกับวงจร OTA ที่นำมาสังเคราะห์

สำหรับฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน สามารถสร้างขึ้นจากวงจรขยายสัญญาณที่ใช้วงจรขยายค่าความนำเป็นสัญญาณป้อนกลับ [13] ดังแสดงในรูปที่ 4(b) โดยความต้านทาน R_{in} จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณศักย์ไฟฟ้าอินพุต (V_{in}) เพื่อกำหนดเป็นกระแสเอาต์พุตให้กับวงจรขยายค่าความนำ (OTA) โดยวงจรขยายสัญญาณ (Op-Amp) จะสร้างสัญญาณอินพุตให้กับวงจรขยายค่าความนำที่สอดคล้องกับค่ากระแสที่ถูกกำหนดจากสัญญาณ V_{in} เนื่องจากวงจรขยายค่าความนำ (OTA) มีฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (สมการที่ (17)) ดังนั้นสัญญาณอินพุตของวงจรขยายค่าความนำ (OTA) ที่ได้อาจขยายสัญญาณ (Op-Amp) จึงเป็นฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน ดังแสดงในสมการที่ (18) [13]

$$V_{atanh} = 2V_T \operatorname{atanh}\left(\frac{V_{in}}{mI_B R_{in}}\right); \left|\frac{V_{in}}{mI_B R_{in}}\right| < 1 \quad (18)$$

เมื่อนำวงจรทั้งสองมาสังเคราะห์เป็นวงจรแปลงฟังก์ชันไซน์ตามสมการที่ (1) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยเมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตด้วยสัญญาณไซน์ ก็จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นมุม (เฟส) ของสัญญาณอินพุตที่ป้อน โดยสัญญาณอินพุตจะถูกป้อนเข้าสู่วงจรขยาย a และวงจรแปลงไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน (atanh) ก่อนถูกขยาย



(b)

รูปที่ 4 (a) วงจรขยายค่าความนำ (b) วงจรแปลงไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน

ด้วยวงจรขยาย b สัญญาณที่ได้จะถูกนำมารวมกันด้วยวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์และวงจรขยาย c ตาม ลำดับ

สำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ สัญญาณอินพุตไซน์ (V_{sin}) ป้อนเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผันที่สร้างขึ้นจากวงจรขยาย Op-Amp (U1A) และ วงจรขยายความนำ (OTA1) ดังสมการที่ (19)

$$V_{atanh} = 2V_T \tanh\left(\frac{V_{sin}}{mI_{B1}R_{in}}\right) \quad (19)$$

สัญญาณที่ได้จากถูกนำไปรวมกับสัญญาณอินพุตด้วยวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสที่สร้างขึ้นจากวงจรขยาย Op-Amp (U2A) โดยกำหนดให้มีค่าอัตราขยายของแต่ละสัญญาณได้ด้วยค่าความต้านทาน R_F , R_A และ R_B ดังสมการที่ (20)

$$V_1 = -\left(\frac{R_F}{R_A}V_{sin} + \frac{R_F}{R_B}V_{atanh}\right) \quad (20)$$

สัญญาณ V_1 ที่ได้จะเป็นสัญญาณกลับเฟส และจากเอกลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ $\tanh(x) = -\tanh(-x)$ สัญญาณ V_1 จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ที่สร้างขึ้นจากวงจรขยายค่าความนำ (OTA2) ที่ขาอินพุตลบทำให้ได้สัญญาณกระแสเอาต์พุตแบบกลับเฟส ดังสมการที่ (21)

$$I_{out} = -mI_{B2} \tanh\left(\frac{V_1}{2V_T}\right) \quad (21)$$

เมื่อแทนสมการที่ (20) ลงในสมการที่ (21) ดังนั้นจะได้สัญญาณการแปลงไซน์ผกผัน ดังสมการที่ (22)

$$V_{asin_proposed} = R_{Load}I_{out} = mR_{Load}I_{B2} * \tanh\left(\frac{1}{2V_T}\left(\frac{R_F}{R_A}V_{sin} + \frac{R_F}{R_B}V_{atanh}\right)\right) = mR_{Load}I_{B2} * \tanh\left(\frac{R_F}{2V_T R_A}V_{sin} + \frac{R_F}{R_B} \tanh\left(\frac{V_{sin}}{mI_{B1}R_{in}}\right)\right) \quad (22)$$

หากกำหนดให้ สัญญาณอินพุตไซน์ (V_{sin}) ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ m_1 หรือ ($V_{sin} = m * \sin(x)$) ลงในสมการที่

(22) และเปรียบเทียบกับสมการที่ (1) จะได้สัญญาณการแปลงไซน์ผกผัน ดังสมการที่ (23)

$$V_{asin_proposed} = mR_{Load}I_{B2} * \tanh\left(\frac{R_F}{2V_T R_A}m \sin(x) + \frac{R_F}{R_B} \tanh\left(\frac{m \sin(x)}{mI_{B1}R_{in}}\right)\right) \quad (23)$$

หรือมีค่าเท่ากับสมการที่ (24)

$$V_{asin_proposed} = mR_{Load}I_{B2} * \tanh\left(\frac{mR_F I_{B1} R_{in}}{2V_T R_A} \left(\frac{\sin(x)}{I_{B1} R_{in}}\right) + \frac{R_F}{R_B} \tanh\left(\frac{\sin(x)}{I_{B1} R_{in}}\right)\right) \quad (24)$$

4. ผลการจำลองการทำงานวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอ

การจำลองการทำงานวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice โดยใช้วงจรขยายค่าความนำ (OTA)[13] ที่สร้างขึ้นจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ CA3280 และ วงจรขยาย (Op-Amp) LM324 ที่ระดับไฟเลี้ยง $\pm 10V$ โดยกำหนดให้ I_{B1} เท่ากับ $20mA$ และ R_m เท่ากับ 50 Ohm ($I_{B1}R_{in} = 1$) และ I_{B2} เท่ากับ 15 mA จะได้ค่า $m_1 = \frac{\pi}{2}$ ดังนั้นจากสมการที่ (24) จะได้สัญญาณฟังก์ชันไซน์ผกผันดังสมการที่ (25)

$$V_{asin_proposed} = \frac{\pi}{2} R_{Load} I_{B2} * \tanh\left(\frac{\pi R_F}{4V_T R_A}(\sin(x)) + \frac{R_F}{R_B} \tanh(\sin(x))\right) \quad (25)$$

จากสมการที่ (22) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (1) จะได้

ค่าอัตราขยาย ($a = \frac{\pi R_F}{4V_T R_A}$) = 0.0824, หากกำหนดให้ R_F เท่ากับ 100 Ohm ดังนั้น R_A เท่ากับ 36.660 k. Ohm
ค่าอัตราขยาย ($b = \frac{R_F}{R_B}$) = 0.5542; จาก R_F เท่ากับ 100 Ohm ดังนั้น R_B เท่ากับ 180 Ohm และ

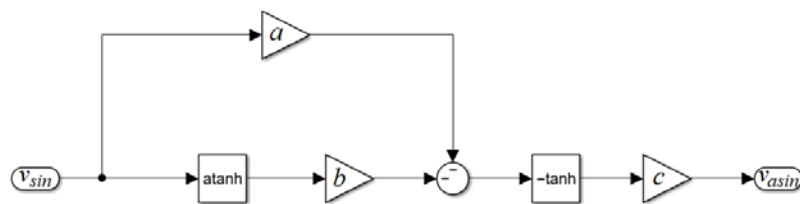
ค่าอัตราขยาย ($c = \frac{\pi}{2} R_{Load} I_{B2}$) = 1.5708; หากกำหนดให้ I_{B2} เท่ากับ 15 mA ดังนั้น R_{Load} เท่ากับ 66.6 Ohm

รูปที่ 6(a) แสดงผลการจำลองการทำงานวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอ (**รูปที่ 5(b)**) โดยการป้อนสัญญาณอินพุตไซน์ เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ 18 ($|V_{in}| < mI_{B1}R_{in}$, เมื่อ $m = \frac{\pi}{2}$, $I_{B1} = 20mA$, $R_{in} = 50 \text{ Ohm}$) ดังนั้น จึงกำหนดให้ที่มีแอมพลิจูดมีค่าเท่ากับ 1.52

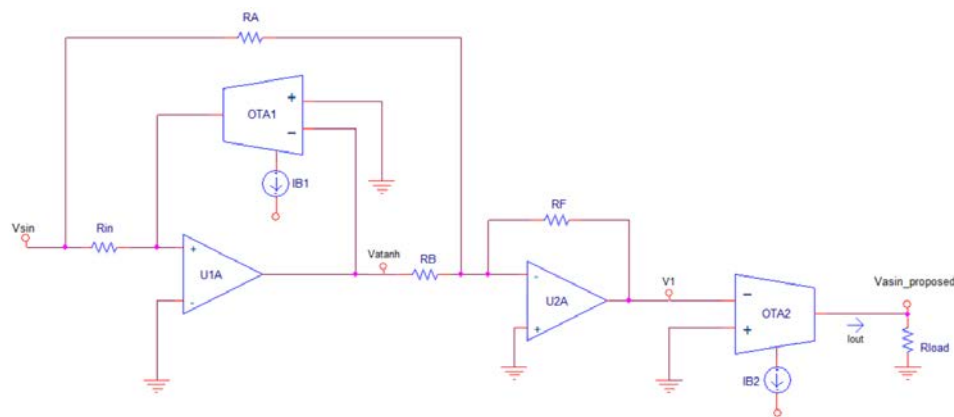
V (หรือ $V_{in} = 1.52 * \sin(x)$) โดยแกน x แสดงค่ามุม (เฟส) ของสัญญาณอินพุตในหน่วยองศา ในขณะที่แกน y เป็นค่าที่ได้จากวงจรแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันซึ่งจะมีค่าสอดคล้องกับค่ามุม (เฟส) ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนแต่ในหน่วยเรเดียน (radian) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง $[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}]$

สำหรับ รูปที่ 6(b) แสดงค่าความผิดพลาดของการแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันเทียบกับค่าอุดมคติ (เฟสของสัญญาณอินพุต) โดยแกน y แสดงค่าในหน่วยองศา ซึ่งจะพบว่าค่าความ

ผิดพลาดจะมีการน้อยและจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเพิ่มขึ้น และจะลดลงเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเฟสของสัญญาณอินพุตเข้าใกล้ค่า $\pm \frac{\pi}{2}$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ในส่วนที่ 2 ค่าความผิดพลาดจากการจำลองการทำงานจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเนื่องจากการประมาณค่าเมื่อกำหนดค่าความต้านทานคุณสมบัติที่ไม่เป็นอุดมคติของวงจรขยาย (Op-Amp) และวงจรขยายค่าความนำ (OTA) โดยมีค่าความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 1.2 องศา

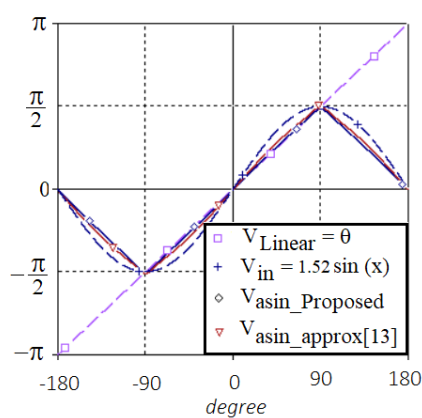


(a)

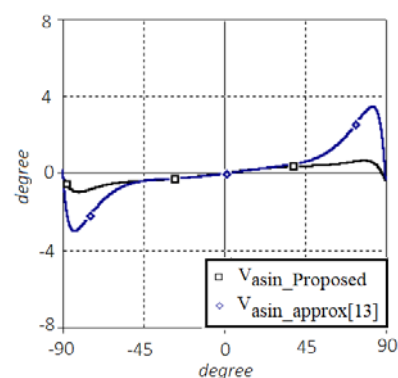


(b)

รูปที่ 5 วงจรแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผัน (a) บล็อกไดอะแกรม (b) วงจรที่นำเสนอ



(a)

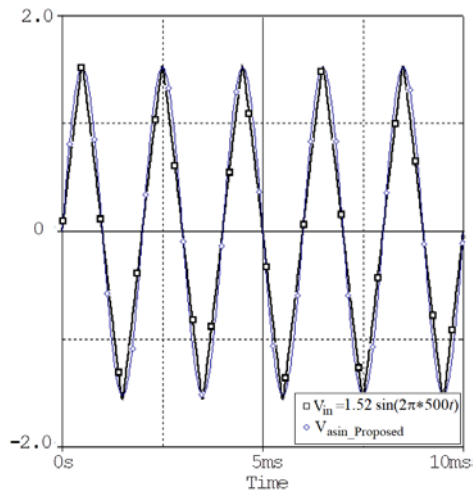


(b)

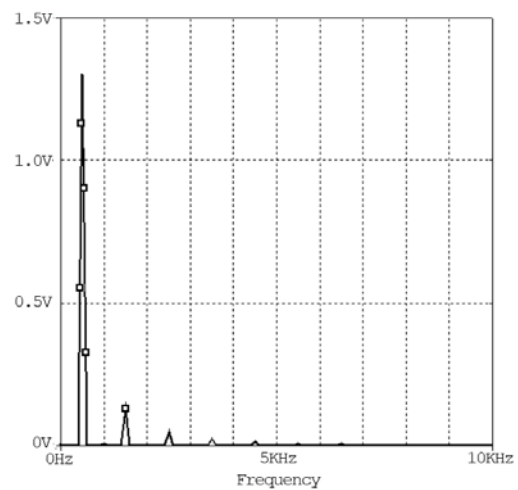
รูปที่ 6 (a) ผลการจำลองการทำงานวงจรฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอ (b) ค่าความผิดพลาด

สำหรับการทดสอบทางเวลา (Transient Analysis) จะทำการป้อนสัญญาณไซน์ขนาด 1 โวลต์ที่ความถี่ 500 Hz ($V_{sin} = 1.52 * \sin(2\pi * 500t)$) โดยผลการตอบสนองเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีขนาดเปลี่ยนไปตามมุม(เฟส) ของสัญญาณอินพุตดังแสดงในรูปที่ 7(a) เมื่อทำการวิเคราะห์ฟูเรียร์ จะได้องค์ประกอบความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 7(b) และเมื่อคำนวณค่าความผิดพลาดแบบ RMS จากองค์ประกอบความถี่ที่ถ่วงน้ำหนัก [13] จะมีค่าเท่ากับ 0.8% เมื่อเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมในอุดมคติที่ได้จากการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ด้วยฟังก์ชันไซน์ผกผัน

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองภายใต้สัญญาณต่าง ๆ แม้ว่า



(a)



(b)

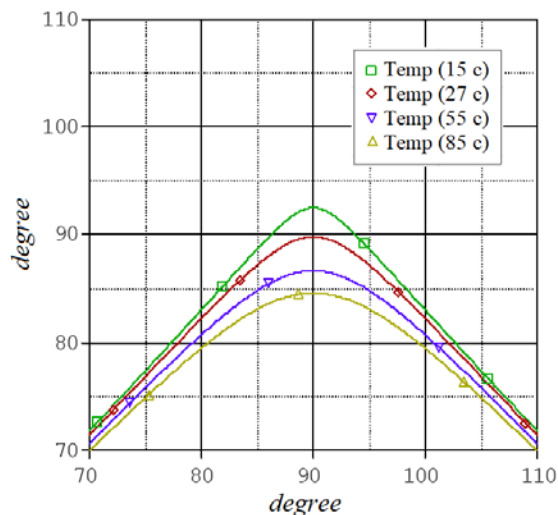
รูปที่ 7 (a) ผลตอบสนองทางเวลา (b) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่จากการแปลงฟูเรียร์

5. สรุป

บทความนี้เสนอการประมาณการแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผัน โดยอาศัยคุณสมบัติฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ และฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผันและกำหนดค่าขนาดสัญญาณที่เหมาะสม โดยวงจรแปลงฟังก์ชันไซน์ผกผันที่นำเสนอจะสร้างขึ้นจากวงจรขยายค่าความนำ (OTA) ที่มีวงจรส่วนหน้าเป็นวงจรคู่ผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ด้วยการกำหนดค่าของสัญญาณจุดเข้าและกระแสไบอัสที่เหมาะสม ร่วมกับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสซึ่งจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณตามอัตราขยายที่กำหนดไว้ โดยวงจรที่นำเสนอจะมีขนาดเล็กประกอบด้วย

ผลกระทบของอุณหภูมิในส่วนของวงจรแปลงไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผันจะถูกชดเชยแล้วเมื่อป้อนผ่านวงจรแปลงไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (สมการที่ (22)) แต่อุณหภูมิจะยังมีผลต่อสัญญาณเอาต์พุต จากค่าอัตราขยาย a ที่เปลี่ยนไป ดังสมการที่ (22) โดยขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการทำงานสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าอัตราขยาย a ที่เปลี่ยนไปในช่วงจำกัด (รูปที่ 2(a)) จะส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อยต่อค่าผิดพลาด แต่จะส่งผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้น หากทำการปรับค่าอัตราขยาย b ให้สอดคล้องกับอัตราขยาย a ที่เปลี่ยนไปตามสมการที่ (7) ก็จะช่วยลดผลกระทบของอุณหภูมิต่อการทำงานของวงจร

วงจรขยาย (Op-Amp) และวงจรขยายค่าความนำ (OTA) อย่างละจำนวน 2 ตัว ร่วมกับค่าความต้านทาน โดยให้ผลการแปลงที่แม่นยำ ค่าผิดพลาดต่ำประมาณ 1.2 องศา และค่าความผิดพลาดแบบ RMS จากองค์ประกอบความถี่ที่ถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.8% เมื่อเทียบกับเทคนิคการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผัน [13] ที่มีค่าผิดพลาดประมาณ 3.7 และค่าความผิดพลาดแบบ RMS 1.2% ความถูกต้องแม่นยำสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยการเลือกใช้วงจรฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์และวงจรฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ผกผันที่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8 ผลการจำลองภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Benammar, L. Ben-Brahim and M. A. Alhamadi, "A novel resolver-to-360 linearized converter," *IEEE Sensors Journal*, vol.4, no. 1, pp. 96–101, 2004, doi: 10.1109/JSEN.2003.820317.
- [2] S. L. Kwok, "Sine wave to triangle wave convertor," U.S. Patent No. US4415860A, 1981.
- [3] M. Karray, J. K. Seon, J. -J. Charlot and N. Nasmoudi, "VHDL-AMS modeling of a new PLL with an inverse sine phase detector (ISPD PLL)," in *Proc. 2002 IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation*, Santa Rosa, CA, USA, Oct. 08, 2002, pp. 80–83, doi: 10.1109/BMAS.2002.1291062.
- [4] Y. Chiu, B. Jalali, S. Garner and W. Steier, "Broad-band electronic linearizer for externally modulated analog fiber-optic links," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 48–50, 1999, doi: 10.1109/68.736386.
- [5] M. J. Narasimha, K. Sheno and A. M. Peterson, "The arcsine transform and its applications in signal processing," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Hartford, CT, USA, May 09–11, 1977, pp. 502–505, doi: 10.1109/ICASSP.1977.1170346.
- [6] S. Nandi, S. Prasad, C. M. Ananda and S. S. Rekha, "Fixed point implementation of trigonometric function using Taylor's series and error characterization," *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Jaipur, India, Sep 21–24, 2016, pp. 442–446, doi: 10.1109/ICACCI.2016.7732085.
- [7] S. Dyer, N. Ahmed and D. Hummels, "Computation of the discrete cosine transform via the arcsine transform," *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 1980, pp. 231–234, doi: 10.1109/ICASSP.1980.1170904.
- [8] B. Gilbert, "A monolithic microsystem for analog synthesis of trigonometric functions and their inverses," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 17, no. 6, pp. 1179–1191, 1982, doi: 10.1109/JSSC.1982.1051878.
- [9] M. Benammar, "Precise, wide-range approximations to arc sine function suitable for analog implementation in sensors and instrumentation applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 52, no. 2, pp. 262–270, 2005, doi: 10.1109/TCSI.2004.840287.
- [10] M. Abdellaoui, B. Gassara and N. Masmoudi, "A new model of an inverse sine phase detector to design ISPD PLL demodulator without using any filters," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 61, no. 1, pp. 10–21, 2007, doi: 10.1016/j.aeue.2006.01.007.
- [11] J. -K. Seon, "A fully integrated CMOS inverse sine circuit for computational systems," *International Journal of Electronics*, vol. 97, no. 8, pp. 867–882, 2010, doi: 10.1080/00207211003646886.
- [12] A. Kaewpoonsuk, W. Petchmaneeumka, A. Rerkratn, S. Tammaruckwattana and V. Riewruja, "A novel resolver-to-DC converter based on OTA-based

- inverse-sine function circuit,” in *SICE Annual Conference*, Chofu, Japan, Aug 20–22, 2008, pp. 609–614, doi: 10.1109/SICE.2008.4654729.
- [13] P. Apisitticharoonlert, W. Petchmaneelumka, and V. Riewruja, “Inverse sine function circuit with temperature compensation,” *Proc. International MultiConference of Engineer and Computer Scientists (IMECS)*, Hong Kong, Mar 16–18, 2016, pp. 616–619.
- [14] J. Tongcharoen, W. Petch maneelumka, T. Cheypoca, and V. Riewruja, “Resolver-to-Triangular Wave Converter,” in *SICE2014*, Nagoya, Japan, Sep. 9–12, 2014, pp. 1181–1184.
- [15] P. Prommee, K. Angkeaw and K. Karawanich, “Low-Cost Linearity Range Enhancement for Linear Variable Differential Transformer,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 3316–3325, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3142195.

การปรับปรุงสถานีการประกอบด้วยวงจรพีดีซีเอและทีมข้ามสายงาน

An Improvement of the Assembly Station with PDCA Cycle and Cross-Functional Team

บรรหาณู ลีลา^{1,*} และ สุธิดา ชีโนดม²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา แสนสุข เมือง ชลบุรี 20131

²ภาควิชานิเทศศาสตร์, คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา แสนสุข เมือง ชลบุรี 20131

Banhan Lila^{1,*} and Suthida Chinodom²

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Saensuk, Muang, Chonburi, 20131, Thailand

²Department of Commercial Art, Faculty of Humanities and Social Sciences, Burapha University, Saensuk, Muang, Chonburi, 20131, Thailand

Corresponding Author E-mail: blila@eng.buu.ac.th

Received: Apr 19, 2022; Revised: Jun 16, 2022; Accepted: Aug 30, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงวิธีการทำงานของสถานีประกอบซึ่งเป็นกรณีศึกษาเพื่อให้บรรลุเป้าหมายหลักด้านการเพิ่มอัตราการผลิตต่อกะ การลดความเสี่ยงจากวิธีการปฏิบัติงานและการลดภาระงานในการจัดส่งชิ้นส่วน ด้วยการดำเนินการตามขั้นตอนของวงจรพีดีซีเอโดยกำหนดให้พนักงานของแผนกที่เกี่ยวข้องมีส่วนร่วมผ่านการประชุมหลักการทำงานข้ามสายงาน ทั้งนี้ข้อมูลก่อนการปรับปรุงบ่งชี้ว่าสถานีประกอบนี้เป็นจุดคอขวดที่ทำให้สายการประกอบมีอัตราการผลิตต่ำกว่าเป้าหมายที่กำหนดเท่ากับ 1100 ชิ้นต่อกะ จึงมีการจัดตั้งทีมข้ามสายงานเพื่อทำการศึกษาและปรับปรุง จากการศึกษาของสมาชิกพบว่าพนักงานประจำสถานีต้องหยุดงานประกอบเพื่อรับและขนย้ายชิ้นส่วนซึ่งส่งมาจากแผนกจัดส่งวัตถุดิบทุก 24 รอบการประกอบ ส่งผลให้รอบเวลาการประกอบเท่ากับ 23.20 วินาทีต่อชิ้น มีอัตราการผลิต 990 ชิ้นต่อกะ ประกอบกับการที่พนักงานปฏิบัติงานรับและขนย้ายชิ้นส่วนด้วยท่าทางที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดการปวดเมื่อยของกล้ามเนื้อสูง ทีมงานจึงศึกษาวิธีปฏิบัติงาน วิเคราะห์สาเหตุ กำหนดแนวทางและดำเนินการปรับปรุงด้วยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการรับและขนย้ายชิ้นส่วนเข้าสู่สถานีประกอบอัตโนมัติ แทนการปฏิบัติงานโดยพนักงานส่งผลให้รอบเวลาการประกอบลดลงเหลือ 19.63 วินาทีต่อชิ้น ทำให้อัตราการผลิตของสถานีเพิ่มจาก 990 ชิ้นต่อกะ เป็น 1169 ชิ้นต่อกะ หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.08 สามารถกำจัดความเสี่ยงด้านความเมื่อยล้าจากวิธีปฏิบัติงานรับและขนย้ายชิ้นส่วนของพนักงาน และลดภาระการจัดส่งชิ้นส่วนลงร้อยละ 50 จากวิธีการจัดส่งแบบเดิม จึงเห็นได้ว่าการประชุมหลักการทำงานข้ามสายงานและกรอบการดำเนินการตามวงจร PDCA ช่วยให้โครงการกรณีศึกษานี้บรรลุเป้าหมายของการปรับปรุงทั้งด้านอัตราการผลิตและความต้องการของแผนกที่เกี่ยวข้อง ความรู้ที่ได้จากการดำเนินโครงการสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกับสถานการณ์ที่คล้ายคลึงกันได้ต่อไป

คำสำคัญ: การปรับปรุงสถานีการประกอบ, ทีมข้ามสายงาน, วงจรพีดีซีเอ, อุปกรณ์ขนย้ายชิ้นส่วนอัตโนมัติ

Abstract

This paper presents the improvement method of operations for the case-studied assembly station to increase the production rate per shift, reduce the risk from working methods, and reduce the part supplying workloads. The improvement process follows the procedure of the PDCA cycle. Employees from relevant departments participated in the study via the use of the Cross-Functional Team (CFT) approach. The existing data indicated that the assembly station was a bottleneck causing the production rate of the assembly line to be less than the target of 1100 units per shift. The CFT and responsibility of the team members were set to improve the situation. The study revealed that operators at the station had to pause their assembly tasks to receive the parts from the material supply department every 24 units of the assembly operations and move them to the pre-setting positions. This resulted in the assembly cycle time of 23.20 seconds per unit and the production rate of 990 units per shift. In addition, these steps were non-regular activities and were performed with body positions that could cause a high risk of muscle aches. The work method was studied, analyzed, and an Automated Parts Handling Device (APHD) was set as a countermeasure. The APHD was designed, built, and utilized to receive and move parts, automatically. Implementation of the APHD has led to the cycle time reduction of the assembly station to 19.63 seconds per unit, and the increment of productivity to 1169 units per shift (or 18.08% increment). The health risk of operators from lifting and handling the parts has been eliminated with 50% reduction of the material supply workloads. From the results of this case study, it can be seen that the implementation of the CFT following the steps of the PDCA approaches contributes to the project success in meeting both the productivity target and requirements of involved parties. Furthermore, knowledge gained from this case study can be used as a guideline for the improvement of similar circumstances.

Keywords: Assembly Station Improvement, Cross Functional Team (CFT), PDCA Cycle, Automated Parts Handling Device.

1. บทนำ

อัตราการผลิตของสายการประกอบที่ผลิตสินค้าหรือชิ้นงานมาตรฐานเป็นจำนวนมากจะกำหนดด้วยรอบเวลา (Cycle Time, CT) มากที่สุดของสถานีงานหรือพนักงานในสายการประกอบ ซึ่งถ้ามีค่ามากกว่ารอบเวลาเป้าหมาย (Takt Time, TT) ก็จะไม่สามารถผลิตสินค้าหรือชิ้นงานได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ และอาจส่งผลต่อระยะเวลาการส่งมอบ และ/หรือ ต้นทุนในการทำงานล่วงเวลาได้ [1]

ในกรณีที่ผลิตไม่ทันตามเป้าหมายหรือต้องการเพิ่มอัตราการผลิต สถานีงานที่ใช้เวลาทำงานมากที่สุดจะถูกระบุเป็นจุดคอขวด (Bottleneck) ของสายการประกอบ การปรับปรุงจะต้องศึกษา วิเคราะห์ขั้นตอนการปฏิบัติงานย่อย ซึ่งนิยมแจกแจงเป็น 3 ประเภทตามแนวคิดของปรัชญาการบริหารการผลิต [1],[2] ได้แก่ กิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่ม (Value Added Activity, VA), กิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่ม

(Non-Value Added Activity, NVA) และ กิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มแต่จำเป็นต้องทำ (Necessary but Non-Value Added, NNVA) โดย VA จะเป็นกิจกรรมหลักของกระบวนการเพื่อผลิตสินค้าหรือชิ้นงานมีคุณลักษณะที่ตอบสนองความต้องการของลูกค้า NVA จะเป็นกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่าจึงเป็นการใช้ทรัพยากรไปอย่างสูญเปล่า (Waste) มักเกิดจากการออกแบบวิธีการปฏิบัติงานที่ยังไม่ดีพอ ในขณะที่ NNVA เป็นกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่าเช่นกันแต่จำเป็นต้องมีอยู่เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติกิจกรรม VA เช่นการขนย้าย การส่งต่อ การนับ การเตรียมชิ้นงาน เป็นต้น งานวิจัยเชิงประยุกต์ด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานจึงเน้นการปรับปรุงกิจกรรม VA ให้มีประสิทธิภาพ ลด NNVA หรือทำให้สะดวกขึ้น และกำจัด NVA ด้วยหลักการศึกษาและปรับปรุงงานด้วยเครื่องมือที่เหมาะสมกับปัญหาต่าง ๆ [1], [3]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานของสถานีประกอบสำคัญซึ่งเป็นคอขวดที่กำหนดอัตราการผลิตของทั้งสายการประกอบเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนชนิดหนึ่ง การสำรวจเบื้องต้นพบว่า CT ของการประกอบเป็นผลมาจากวิธีการปฏิบัติงานที่ออกแบบให้พนักงานต้องเสียเวลาทำ NNVA นอกเหนือจากกิจกรรมซึ่งเป็น VA แนวทางการปรับปรุงจะดำเนินการตามขั้นตอนของวงจรพีดีซีเอ (Plan, DO, Check, Act หรือ PDCA) ด้วยทีมงานที่คัดเลือกสมาชิกเพื่อส่งเสริมประสิทธิภาพการดำเนินการตามแนวทางของทีมข้ามสายงาน (Cross-Functional Team, CFT) ได้แก่การส่งเสริมให้สมาชิกในทีมร่วมกันศึกษาและกำหนดแนวทางการปรับปรุง โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องอย่างรอบด้าน เพื่อตอบสนองต่อทั้งเป้าหมายหลักและเป้าหมายรอง ภายใต้เงื่อนไขของแต่ละหน่วยงานหรือแผนกที่เกี่ยวข้องกับวิธีปฏิบัติงานของสถานีกรณีศึกษา

2. การปรับปรุงวิธีการทำงานและทีมข้ามสายงาน

การปรับปรุงวิธีการทำงานเป็นกิจกรรมที่มีความจำเป็นทั้งเพื่อการเพิ่มผลผลิต การลดต้นทุน และเป้าหมายอื่น ๆ แนวทางที่พบว่ามีการประยุกต์อยู่เสมอได้แก่ ลีน (Lean) [1],[4-6] เพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการและทำให้การไหลของงานมีความราบรื่น ซึ่งส่งผลต่อรอบเวลาการผลิตของการปฏิบัติงาน โดยเฉพาะงานที่ทำโดยพนักงานและด้วยวิธีการที่กำหนดเป็นมาตรฐาน ทิศทางการปรับปรุงส่วนใหญ่จะเน้นการลดเวลาการทำงานซึ่งมักจะเป็นเป้าหมายของแผนกประกอบ (Assembly Line, AL) แผนกวางแผนการผลิต (Production Planning, PP) อย่างไรก็ตามการปรับปรุงควรพิจารณาเป้าหมายของแผนกอื่นที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของพนักงาน จำนวนโครงการปรับปรุงต่อช่วงเวลา และภาระงานของการจัดส่งชิ้นส่วนเพื่อสนับสนุนการผลิต ซึ่งอาจเป็นเป้าหมายของแผนกสุขภาพและความปลอดภัย (Health and Safety, HS) แผนกการปรับปรุงต่อเนื่อง (Continuous Improvement, CI) และแผนกจัดส่งวัสดุ (Material Supply, MS) ตามลำดับ ดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาและกำหนดแนวทางการปรับปรุง จึงควรดำเนินการโดยผู้ที่เกี่ยวข้องจากแต่

ละแผนกเพื่อบูรณาการแนวทางการปรับปรุงที่สอดคล้องกับเป้าหมายและเงื่อนไขของแผนกต่าง ๆ อย่างครบถ้วนตั้งแต่เริ่มต้นโครงการปรับปรุง [7],[8]

CFT เป็นเทคนิคการทำงานเป็นทีมที่เชื่อว่าการบูรณาการทักษะที่แตกต่างกันของสมาชิกจะส่งเสริมซึ่งกันและกัน เพื่อร่วมทำโครงการที่มีทั้งเป้าหมายหลักและเป้าหมายรอง ๆ มีการจัดสรรหน้าที่รับผิดชอบและมอบหมายให้เป็นผู้ดำเนินการหน้าที่ที่สมาชิกมีความถนัด (Shared Leadership) สื่อสารและสนับสนุนกันซึ่งจะทำให้ได้การดำเนินการโครงการบรรลุเป้าหมายได้เร็วและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น [8],[9] CFT ส่งเสริมการทำงานเป็นทีม ภายใต้ความท้าทายที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่าง ความขัดแย้งระหว่างสมาชิกและ/หรือระหว่างหน่วยงาน [7] สมาชิกต้องทำงานร่วมกันเพื่อตอบสนองเป้าหมายของทีม ไม่ใช่เป้าหมายของหน่วยงานที่ตนเองเป็นตัวแทน [8] ทั้งนี้การดำเนินการในรูปแบบของ CFT ต้องมีสมาชิกเพียงพอ แต่ละคนได้รับการมอบหมายหน้าที่อย่างเป็นทางการ เข้าใจเป้าหมายหลักและเป้าหมายรองต่าง ๆ ชัดเจนเพื่อการร่วมมือกันทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ใช้แนวคิดดังกล่าวของ CFT มาประยุกต์เพื่อจัดตั้งทีม แบ่งหน้าที่ในโครงการปรับปรุงโดยพิจารณาจากความคิดเห็นของพนักงานต้นสังกัดของสมาชิก ทั้งนี้แผนกต่าง ๆ ที่อ้างถึงเป็นแผนกที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตด้านใดด้านหนึ่งแต่มีหน้าที่รับผิดชอบที่แตกต่างกันไป

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจวรรณกรรมเบื้องต้นพบว่ามีการวิจัยเชิงประยุกต์ที่นำเสนอเกี่ยวกับการปรับปรุงกระบวนการของกรณีศึกษาต่าง ๆ ด้วยแนวทางการดำเนินการที่คล้ายคลึงกัน [1-6], [10] เครื่องมือที่นำเสนอในการปรับปรุงได้แก่การวิเคราะห์ด้วยหลักการ กำจัด-รวม-จัดลำดับ-ทำให้ง่าย (Eliminate-Combine-Rearrange-Simplify หรือ ECRS), การลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรให้เป็นเวลาเลขหลักเดียว (Single Minute Exchange of Die หรือ SMED) และเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อ ลดความสูญเปล่า [2],[4],[10] และ [11] โดย [2] ปรับปรุงประสิทธิภาพ

ของสายการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เพื่อลดสัดส่วนงานที่ส่งไม่ทันกำหนด โดยใช้แผนผังก้างปลา ร่วมกับการวิเคราะห์ ECRS ในการบ่งชี้และกำจัดความสูญเปล่าในกระบวนการ ส่งผลให้สามารถลดสัดส่วนงานค้างส่งจากร้อยละ 16.50 ลงเหลือร้อยละ 13.22 เช่นเดียวกับ [4] ซึ่งประยุกต์หลักการ ECRS กับกระบวนการบรรจุผงซักฟอก สามารถบ่งชี้ความสูญเปล่าจากวิธีการทำงานซ้ำซ้อน ระยะทางการขนย้าย ไกลเกินความจำเป็น นำไปสู่การปรับรวมขั้นตอนการทำงาน การย้ายตำแหน่งการจัดตั้งเครื่องจักร ส่งผลให้ลดพนักงานได้ 3 คน ระยะทางการขนย้ายลดลง 9.02 เมตร ประสิทธิภาพสายการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 [10] ปรับปรุงกระบวนการผลิตจักรยานด้วยการประยุกต์วิธีการศึกษา งาน การศึกษาเวลา ซึ่งส่งผลให้สามารถลดเวลาการประกอบจักรยานจาก 837 วินาทีต่อคันเหลือเพียง 595 วินาทีต่อคัน [11] ประยุกต์หลักการ SMED และ ECRS เพื่อลดการสูญเสียเวลาไปกับการเปลี่ยนชนิดก้อนเชื้อเห็ดที่ต้องเตรียมส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 120 ก้อนต่อวัน และลดต้นทุนแรงงานได้ 3600 บาทต่อเดือน [5] ใช้แผนภูมิ กระบวนการไหล และแผนภูมิ why-why เพื่อปรับปรุงขั้นตอนการผลิตไม้กวาดทางมะพร้าว สามารถบ่งชี้ความสูญเปล่าที่มาจากกระบวนการคัดแยกทางมะพร้าว และกระบวนการตัดลวด นำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์จับยึดที่ช่วยให้ทำงานได้สะดวกและเร็วขึ้น ส่งผลให้ลดรอบเวลาการผลิตจาก 46 นาทีต่อลำเหลือ 40 นาทีต่อลำ [3] ใช้แผนผังสายธารคุณค่า (Value Stream Mapping, VSM) ร่วมกับ ECRS ในการกำจัดความสูญเปล่าในกระบวนการบรรจุขวดน้ำดื่มซึ่งพบว่ามีความสูญเปล่าจากการเก็บสินค้าคงคลังมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น จึงนำเสนอตัวแบบการส่งผลิตที่ประหยัดในการวางแผนการผลิตซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้ลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้ถึงร้อยละ 73.36 จากเดิม ในขณะที่ [1],[6],[12] และ [13] นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาด้วยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ขนย้ายชิ้นงาน โดย [1] นำเสนอการใช้รางส่งชิ้นส่วนระหว่างสถานีงานด้วยแรงโน้มถ่วง [6] เสนอการออกแบบอุปกรณ์ขนย้ายโครงประกอบแผ่นวงจรแม่พิมพ์ด้วยอุปกรณ์อัตโนมัติราคาต่ำ (Low Cost Automation Equipment) [12] สร้างรางลำเลียง

ชิ้นงานระหว่างสถานี และ [13] ออกแบบอุปกรณ์เพื่อลดเวลาและความเสี่ยงของการขนย้ายเครื่องจักรขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้านความปลอดภัยในการทำงานตามหลักการยศาสตร์ มีงานวิจัยที่นำเสนอการปรับปรุงการทำงานเพื่อลดความเสี่ยงจากการเกิดการปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ ความเมื่อยล้า และความเสี่ยงต่อสุขภาพ เช่น [14–16] วิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงท่าทางและลักษณะการเคลื่อนไหวของผู้ปฏิบัติงานด้วย Rapid Upper Limb Assessment (RULA) นำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ช่วยการทำงานที่เหมาะสมยิ่งขึ้น [17] พัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานด้านต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมการทำงานและชีวอนามัยตามเกณฑ์ มอก. 18001 ทั้งแบบ RULA และ Rapid Entire Body Assessment (REBA) ในรูปแบบของโปรแกรมที่ใช้กับอุปกรณ์ประเมินความเสี่ยงเคลื่อนที่ [18] ประยุกต์การประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของคณงานท่าไม้ในสวนป่าสักด้วยการประเมินทั้ง RULA และ REBA ซึ่งสามารถนำไปสู่การเพิ่มอุปกรณ์ การออกแบบท่าทางการทำงานของคณงานเพื่อช่วยลดความเสี่ยงจากความเมื่อยล้า

งานวิจัยที่กล่าวมานี้มุ่งเน้นการปรับปรุงดัชนีหลักด้านใดด้านหนึ่งซึ่งเป็นเป้าหมายของแผนกผลิต ดำเนินการปรับปรุงในรูปแบบทีมซึ่งประกอบด้วยพนักงานจากหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการปรับปรุงโดยตรงเช่น ทีมไคเซน (Kaizen) ทีมซิกซ์ซิกม่า (Six Sigma) เป็นต้น โดยทีมงานจะประสานงานกับหน่วยงานเจ้าของพื้นที่ (Process Owner) เป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงใด ๆ จะมีแผนกอื่นที่เกี่ยวข้องอีก และแผนกเหล่านี้มักจะมีเป้าหมายและเงื่อนไขของแผนกเองซึ่งอาจจะสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับเป้าหมายหลักของการปรับปรุงที่ทีมกำหนดก็ได้ กรณีที่ไม่สอดคล้อง ทีมปรับปรุงอาจต้องใช้เวลามากขึ้นในการดำเนินการ ดังนั้นการศึกษาปรับปรุงที่ให้พนักงานของแต่ละแผนกที่เกี่ยวข้องมีส่วนร่วมจะทำให้รับรู้ถึงเป้าหมาย และข้อจำกัดของแต่ละแผนกทั้งยังสามารถบูรณาการความเชี่ยวชาญที่แตกต่างกันได้ด้วยงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์แนวคิด CFT เพื่อเน้น

ความร่วมมือกันของพนักงานระหว่างแผนกที่เกี่ยวข้องกับวิธีการปฏิบัติงานจุดที่จะทำการปรับปรุงแต่รับผิดชอบหน้าที่ (Function) ที่แตกต่างกันตามเป้าหมายของแต่ละแผนก โดยให้มีสมาชิกต้องได้รับการแต่งตั้ง รับทราบหน้าที่ อุทิศเวลากับทำหน้าที่สำเร็จ ตลอดจนให้ความร่วมมือ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันผ่านกระบวนการสื่อสารและรูปแบบการทำงานที่กำหนดร่วมกันอย่างชัดเจน [7–9] และ [19] ภายใต้กรอบขั้นตอนการดำเนินการของวงจร PDCA ในรูปแบบโครงการเพิ่มอัตราการผลิตของสถานีประกอบที่เป็นกรณีศึกษา โดยงานวิจัยนี้กำหนดนิยามขั้นตอนของวงจร PDCA ดังนี้ [20]

Plan (P): ตระหนักถึงการคงอยู่ของปัญหาซึ่งเป็นโอกาสของการปรับปรุง และการวางแผนการดำเนินการเพื่อแก้ไขปัญหา

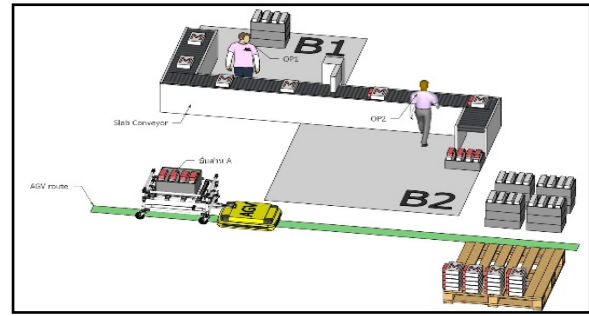
Do (D): ปฏิบัติตามแผนการดำเนินการ ทดลองกับงานที่มีขอบเขตดำเนินการให้บรรลุเป้าหมายได้

Check (C): ติดตามประเมินผลการดำเนินการ วิเคราะห์ผล และบ่งชี้การเรียนรู้ที่ได้

Act (A): จัดทำมาตรฐานการทำงานตามผลการทดลอง หากไม่ได้ผลตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ ดำเนินการตามวงจร PDCA ซ้ำด้วยการปรับเปลี่ยนแผนการดำเนินการ กรณีที่ได้ผลตามเป้าหมายแล้ว ให้ใช้วงจร PDCA ในการปรับปรุงอย่างสม่ำเสมอต่อไป

4. ข้อมูลสถานีกรณีศึกษา

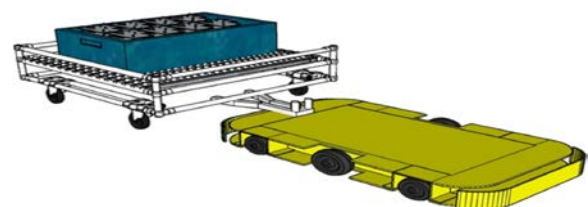
ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงนอกและโครงใน ซึ่งผ่านกระบวนการขึ้นรูปและนำมาประกอบเป็นโครงหลัก M ที่สายการประกอบชิ้นส่วน ซึ่งมีการจัดเป็น 22 สถานี สถานี B เป็นหนึ่งในสถานีประกอบทั้งหมด รับผิดชอบการประกอบชิ้นส่วน A เข้ากับชิ้นส่วนโครงหลัก M ก่อนส่งไปยังขั้นตอนต่อไป แบบจำลอง Lay-Out ของสถานี B มีดังแสดงในรูปที่ 1 การประกอบที่สถานี B ทำโดยพนักงาน 2 คน, แทนด้วย OP1 และ OP2, ปฏิบัติงานที่สถานีย่อย B1 และ B2 ตามลำดับ โครงหลัก M จะถูกวางบน Slap Conveyor ที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 11.60 วินาทีต่อเมตร



รูปที่ 1 แบบจำลอง Lay-Out ของสถานี B

ชิ้นส่วน A จะถูกส่งมาครั้งละ 1 กระบะจำนวน 24 ชิ้น น้ำหนักรวมกระบะประมาณ 22 ปอนด์ โดย MS ด้วยรถพ่วงที่ขับเคลื่อนด้วย Automated Guided Vehicle (AGV) ขนาดเล็ก (ภาพจำลองดังรูปที่ 2) แต่ด้วยข้อจำกัดของเส้นทาง AGV ที่ออกแบบไว้ AGV จะมาถึงสถานี B ด้านสถานีย่อย B2 ดังนั้น OP2 จึงเป็นผู้ยกกระบะชิ้นส่วน A แล้วส่งข้าม Slab Conveyor ซึ่งสูง 70 เซนติเมตร ไปให้ OP1 เพื่อจัดวางในตำแหน่งที่กำหนด เมื่อต้องการใช้ OP1 จะหยิบชิ้นส่วน A และนำไปจัดตำแหน่งเพื่อประกอบเข้ากับ M ที่สถานีย่อย B1 เมื่อใช้ชิ้นส่วนหมด OP1 จะส่งกระบะชิ้นส่วน A (กระบะเปล่า) กลับมาให้ OP2 เพื่อนำไปวางลงบนรถพ่วงก่อนที่ AGV จะเคลื่อนที่กลับไป MS

เวลาทำงานของสถานี B เริ่ม 8.00 น. ถึง 17.00 น. 5 วันต่อสัปดาห์ เมื่อหักเวลาพักกลางวันและพักย่อยแล้วจะมีเวลาปฏิบัติงานจริง 450 นาที หรือ 27000 วินาทีต่อกะ PP ต้องการอัตราการผลิต 1100 ชิ้น แต่ละสถานีจึงต้องมี CT ไม่เกินรอบเวลาการผลิตเป้าหมาย 20.86 วินาทีต่อชิ้น แต่รอบเวลาการประกอบของสถานี B เท่ากับ 23.20 วินาทีต่อชิ้น สถานี B จึงเป็นคอขวดของแผนกประกอบที่ต้องการปรับปรุง

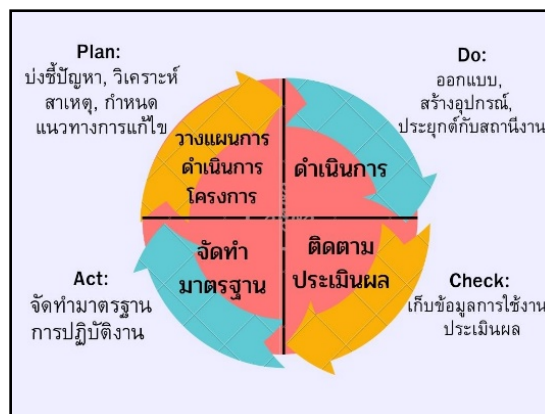


รูปที่ 2 รูปจำลอง AGV และรถพ่วงกระบะชิ้นส่วน A

5. ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินการปรับปรุงทำโดยทีมข้ามสายงานมีสมาชิก 6 คน ประกอบด้วยตัวแทน จาก AL, PP, HS, MS แผนกละ 1 คน และจาก CI จำนวน 2 คน (หัวหน้าแผนกซึ่งทำหน้าที่เป็นหัวหน้าทีม และ พนักงานในแผนกอีก 1 คน) ทั้งหมดร่วมกันกำหนดแนวทางการดำเนินโครงการปรับปรุงด้วยกรอบขั้นตอนการดำเนินการของวงจร PDCA ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อป้องกันความล้มเหลวจากการไม่ทุ่มเทและการร่วมมือปฏิบัติงานของสมาชิกในทีม การแต่งตั้งสมาชิกต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้บังคับบัญชาโดยตรง จัดสรรเวลาที่เหมาะสมกับการะงานที่ตนมีส่วนร่วม [9],[18] และให้ถือเป็นหน้าที่ที่สมาชิกต้องร่วมปฏิบัติหน้าที่ให้สำเร็จอย่างเหมาะสม มีการประชุมร่วมกันเพื่อ

ติดตามความก้าวหน้าและร่วมกันแก้ปัญหาต่างๆ อย่างน้อยสัปดาห์ละ 2 ครั้ง แนวทางการดำเนินการปรับปรุงมีรายละเอียดกิจกรรมและผู้รับผิดชอบดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 กรอบการดำเนินโครงการด้วยวงจร PDCA ด้วย CFT

ตารางที่ 1 รายละเอียดการดำเนินการโครงการ

ขั้นตอน	กิจกรรม	สมาชิก
Plan (P): วางแผนดำเนินการโครงการ	P1: เก็บข้อมูล/บ่งชี้ปัญหา	PP, AL, CI
	P2: วิเคราะห์สาเหตุ:	
	-ศึกษาวิธีการทำงาน	CL, AL
	-ศึกษาเวลา	CI, AL
	-ศึกษาการยศาสตร์การทำงาน	HS, AL
	-การจัดส่งชิ้นส่วน	CI, MS
	P3: กำหนดแนวทางการแก้ไข	ร่วมกันทั้งทีม
Do (D): ดำเนินการ	D1: ออกแบบและสร้างอุปกรณ์	CI, AL, MS
	D2: ประยุกต์กับสถานีงาน	CI, AL, MS
Check (C): ติดตามประเมินผล	C1: เก็บข้อมูลเวลา	CI
	C2: ประเมินผล (อัตราการผลิต, ความปลอดภัยในการทำงานตามหลักการยศาสตร์, จุดคุ้มทุน)	PP, CI, HS
Act (A): จัดทำมาตรฐาน	A1: จัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน	CI, AL, MS
	A2: สรุปโครงการ	ร่วมกันทั้งทีม

จากขั้นตอนการดำเนินการโครงการดังตารางที่ 1 โดยทุกคนต้องมีส่วนร่วมในขั้นตอน Plan ขั้นตอน Do กำหนดให้สมาชิกจาก CI และ AL เป็นผู้รับผิดชอบเนื่องจากอาจต้องมีการปรับปรุงวิธีการทำงานและ/หรือ จัดทำอุปกรณ์ สนับสนุนการ

ทำงาน และประยุกต์กับสถานีกรณีศึกษาจริง ในขั้นตอน Check กำหนดให้เป็นความรับผิดชอบของสมาชิกจาก CI, PP, MS และ HS ในการติดตามประเมินผลในส่วนที่เป็นดัชนีบ่งชี้ผลลัพธ์ของแผนกที่ตนเองสังกัด และในขั้นตอน Act ถ้าการปรับปรุง

บรรลุป้าหมายกำหนดให้สมาชิกจาก CI, AL และ MS ร่วมกัน กำหนดมาตรฐานการปฏิบัติงาน ก่อนสรุปผลร่วมกัน แต่ถ้าไม่ บรรลุป้าหมายหรือต้องการปรับปรุงต่อ ให้ดำเนินการต่อตาม ขั้นตอนของวงจร PDCA โดยกลับมาเริ่มที่ขั้นตอน plan

6. ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานตามขั้นตอนดังตารางที่ 1 มีดังนี้

กิจกรรม P1: เก็บข้อมูลและบ่งชี้ปัญหา

เวลาการผลิต 450 นาทีต่อกะ

อัตราการผลิตที่ต้องการ 1100 ชิ้นต่อกะ

สถานี B สามารถประกอบชิ้นส่วน A เข้ากับชิ้นส่วนหลัก M ได้จำนวน 990 ชิ้นต่อกะ ซึ่งต่ำกว่าอัตราการผลิตที่ต้องการ ร้อยละ 10.1 จึงเป็นปัญหาที่ต้องปรับปรุง

กิจกรรม P2: วิเคราะห์สาเหตุ มีผลโดยสรุปดังนี้

จากการศึกษาตามหลักการของการศึกษาวิธีการทำงาน

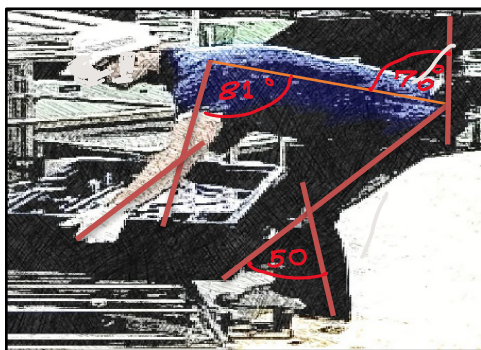
และการศึกษาเวลาของสถานี B มีผลดังแสดงในตารางที่ 2

เมื่อ RW แทนงานประจำ (Regular Work) และ NRW แทนงานที่ไม่ได้ทำประจำ (Non-Regular Work) พบว่า OP1 และ OP2 ใช้เวลากับ RW 20.38 และ 21.91 วินาทีต่อรอบ ในขณะที่ใช้เวลากับ NRW 21.90 และ 31.11 วินาทีต่อ 24 รอบ ตามลำดับ (MS จัดส่งชิ้นส่วน A จำนวน 24 ชิ้นต่อ กระบะ จัดส่งทุก 9.28 นาที) ส่งผลให้รอบเวลาเฉลี่ยของ OP1 เท่ากับ 21.25 วินาทีต่อชิ้น ($20.38 + (20.90 / 24)$) และ ของ OP2 เท่ากับ 23.20 วินาทีต่อชิ้น ($21.91 + (30.11 / 24)$) ดังนั้น CT ของสถานี B จึงเท่ากับ 23.20 วินาทีต่อชิ้น ทำให้ มีอัตราการผลิต 990 ชิ้นต่อกะ

ผลการศึกษาศาสตร์การปฏิบัติงานของ OP1 และ OP2 พบว่า OP2 ต้องยกกระบะชิ้นส่วน A หน้าประมาณ 22 ปอนด์ ขึ้นสูงจากพื้นอย่างน้อย 95 เซนติเมตร (รฟวางสูง 25 เซนติเมตร และ Slab Conveyor สูง 70 เซนติเมตร) ทุก 9.28 นาที หรือ 48.5 รอบต่อกะ ด้วยท่าทางดังรูปที่ 4

ตารางที่ 2 ขั้นตอนและเวลาของงานสถานี B

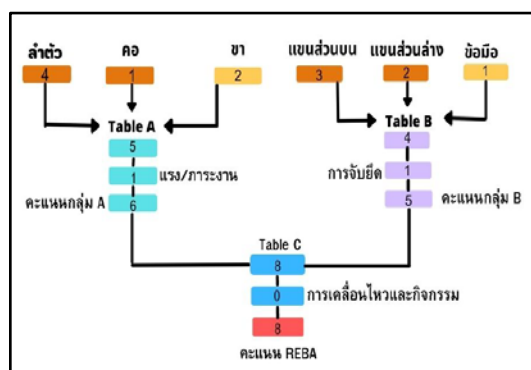
สถานี/พนักงาน	งานย่อย	ประเภท	เวลา (วินาที)
B1/OP1	1. หยิบและเตรียมชิ้นส่วน A	RW_VA	6.88
	2. ประกอบชิ้นส่วน A กับ M, จัดตำแหน่ง	RW_VA	13.50
	3. ย้ายกระบะเปล่า/รับกระบะชิ้นส่วน A จาก OP2	NRW_NNVA	10.40
	4. ส่งกระบะเปล่าข้ามสายพานให้กับ OP2	NRW_NNVA	10.50
B2/OP2	1. นิดสารประสานชิ้นส่วน A กับ M	RW_VA	9.56
	2. หยิบสกรูและจับยึดชิ้นส่วน A กับ M	RW_VA	12.35
	3. ยกกระบะชิ้นส่วน A จากรถพ่วง AGV ส่งข้ามสายพานให้กับ OP1	NRW_NNVA	22.20
	4. รับกระบะเปล่าจาก OP1 วางบนรถพ่วง AGV	NRW_NNVA	8.91



รูปที่ 4 ท่าทางการปฏิบัติงานของ OP2

การวิเคราะห์พบว่าพนักงานปฏิบัติงานด้วยท่าทางที่ลำตัวเอนไปด้านหลังเกิน 60° ไม่มีการบิดหรือก้มคอเมื่อเปรียบเทียบกับแนวของกระดูกสันหลัง ส่วนขาขึ้นแบบสมดุลมีการย่อเข่าระหว่าง $30-60^\circ$ แขนส่วนบนอยู่ด้านหลังหน้าประมาณ 81° แขนส่วนล่างเมื่อเปรียบเทียบกับแนวลำตัวอยู่ตำแหน่งยกขึ้นทำมุมมากกว่า 100° ข้อมืออยู่ในระดับเดียวกับแนวของแขนส่วนล่าง ไม่มีการหมุนหรือเอียง พนักงานจับยึดขอบกระบะ ได้นัดมือ เพราะกระบะมีขอบกว้างเพียงพอ ไม่มีความผิดปกติด้านการ

เคลื่อนไหวในการปฏิบัติงาน จากลักษณะดังกล่าวนี้สามารถประเมินคะแนน REBA ได้เท่ากับ 8 คะแนน [21] ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความเสี่ยงสูงควรวินิจฉัยและปรับปรุงวิธีการทำงาน รายละเอียดการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การประเมินคะแนน REBA

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าทำให้อัตราการผลิตต่ำกว่าที่ PP กำหนดเนื่องจากการที่ OP1 และ OP2 ต้องทำงาน NNVA ที่เป็น NRW และสาเหตุรองคือ 1) ทำทางการทำงานที่อาจส่งผลให้เกิดความปวดเมื่อยของกล้ามเนื้อของ

OP2 และ 2) มีภาระงานด้านการส่งวัตถุดิบมากเกินไปจนเกินไป ซึ่งเป็นเป้าหมายของ HS และ MS ตามลำดับ สมาชิกของทีมจึงร่วมกันกำหนดแนวทางการแก้ไข ดังอธิบายในกิจกรรม P3

กิจกรรม P3: การกำหนดแนวทางการแก้ไข

จากผลการศึกษาที่ทีมกำหนดแนวทางการปรับปรุงเพื่อให้บรรลุเป้าหมายหลักและเป้าหมายรอง ตามสาเหตุดังตารางที่ 3

กิจกรรม D1: ออกแบบและสร้างอุปกรณ์

สมาชิก CFT ร่วมวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์ขนย้ายชิ้นส่วน A จากรถพ่วง AGV อัตโนมัติ (Automatic Part Handling Device, APHD) แยกเป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย

- ส่วนที่ 1: ชุดดึงกระบะใส่ชิ้นส่วน A จากรถพ่วง AGV
- ส่วนที่ 2: ชุดยกกระบะขึ้นชิ้นส่วน A ขึ้นแนวดิ่ง
- ส่วนที่ 3: ชุดขนย้ายกระบะขึ้นชิ้นส่วน A ข้ามสายพานไปยังตำแหน่งจัดวาง
- ส่วนที่ 4: ชุดส่งกระบะเปล่าข้ามสายพาน
- ส่วนที่ 5: ชุดยกกระบะเปล่าลงและส่งขึ้นรถพ่วง AGV

ตารางที่ 3 สาเหตุและแนวทางการแก้ไข

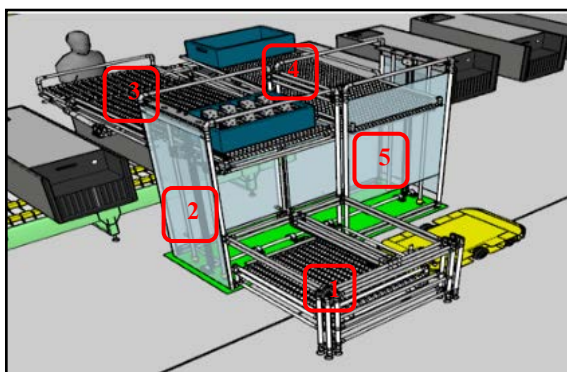
โครงการ:	เพิ่มอัตราการผลิตสถานี B
เป้าหมายหลัก:	อัตราการผลิตไม่ต่ำกว่า 1100 ชิ้นต่อกะ
เป้าหมายรอง:	1) พนักงานทำงานด้วยท่าทางที่เหมาะสมตามหลักการยศาสตร์
	2) ลดภาระการจัดส่งชิ้นส่วน A ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 25
สาเหตุ	
1. พนักงาน (ทั้ง OP1 และ OP2) เสียเวลาทำงานย่อย NRW ที่เป็น NNVA	แนวทางการแก้ไข
2. วิธีการจัดส่งและการขนย้ายกระบะขึ้นชิ้นส่วน A ทำให้ OP2 ต้องปฏิบัติงานด้วยท่าทางที่อาจเกิดปัญหาการปวดเมื่อย	
3. การจัดส่งชิ้นส่วน A จำนวน 24 ชิ้นต่อกระบะ (เพื่อไม่ให้หนักเกินไปสำหรับ OP2) ส่งผลให้ต้องจัดส่งถึง 48.5 รอบต่อกะ	

ทีมปรับปรุงให้แผนภาพต้นไม้ในการสร้างแนวคิดการออกแบบอุปกรณ์ตามหน้าที่แต่ละส่วนและประเมินเลือกแนวคิดด้วยเทคนิคการจัดลำดับแบบถ่วงน้ำหนัก เมื่อพิจารณาจากปัจจัย 1) ความปลอดภัยในการใช้งาน 2)

ต้นทุนในการสร้าง 3) ข้อจำกัดของพื้นที่ติดตั้ง 4) ประสิทธิภาพการทำงาน และ 5) ความสะดวกในการบำรุงรักษา กำหนดน้ำหนักของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 0.3, 0.2, 0.2, 0.2 และ 0.1 สำหรับปัจจัยที่ 1-5 ตามลำดับ สมาชิก

ของที่มาร่วมกันประเมินได้แนวคิด APHD ที่ออกแบบให้ทั้ง 5 ทำงานสัมพันธ์กันโดยใช้กระบอกลูกสูบควบคุมด้วยระบบนิวเมติกส์ มอเตอร์ไฟฟ้า โรลเลอร์ (Roller) และเซนเซอร์ มีแบบจำลองดังรูปที่ 6 และ ลำดับการทำงานดังแสดงในตารางที่ 4

ขั้นตอนการทำงานอธิบายได้ดังนี้ รถ AGV ลากรถพ่วงและกระบะขึ้นส่วน A มายังตำแหน่งที่กำหนด กระบะจะถูกดึงจากรถพ่วงด้วยกระบอกลูกสูบของชุดดึงกระบะ (ส่วนที่ 1) ไปยังตำแหน่งรับกระบะของชุดยกกระบะ (ส่วนที่ 2) รถ AGV เคลื่อนที่เข้าตำแหน่งรับกระบะเปล่า



รูปที่ 6 แบบจำลอง APHD

ตารางที่ 4 ลำดับการทำงานของ APHD

ลำดับ	อุปกรณ์
1. รถ AGV จอดที่ตำแหน่งส่งขึ้นส่วน A	รถ AGV
2. ดึงกระบะขึ้นส่วน A ออกจากรถพ่วง เข้าตำแหน่งชุดยก	ส่วนที่ 1
3. OP1 วางกระบะเปล่าบนถาดโรลเลอร์ของชุดส่งกระบะกลับ	OP1/ส่วนที่ 4
4. รถ AGV เคลื่อนที่เข้าตำแหน่งรับกระบะเปล่า	รถ AGV
5. กระบะขึ้นส่วน A ถูกยกขึ้นถึงจุดสูงสุด	ส่วนที่ 2
6. กระบะขึ้นส่วน A ไหลตามรางโรลเลอร์ข้าม Slab Conveyor เข้าสู่ถาดวาง	ส่วนที่ 3
7. ถาดโรลเลอร์ถูกดันให้เอียง	ส่วนที่ 3
8. รางโรลเลอร์ส่งกระบะเปล่ากลับยกเอียงกระบะเปล่าไหลข้าม Slab Conveyor กลับ	ส่วนที่ 4
9. กระบะเปล่าถูกยกลง	ส่วนที่ 5

ตารางที่ 4 ลำดับการทำงานของ APHD (ต่อ)

ลำดับ	อุปกรณ์
10. รางโรลเลอร์ส่งกระบะเปล่ากลับสู่แนวระนาบ	ส่วนที่ 4
11. กระบะเปล่าไหลเข้ารถพ่วง	รถพ่วง
12. รถ AGV เคลื่อนที่	รถ AGV

ขณะเดียวกัน OP1 จะวางกระบะเปล่าบนถาดโรลเลอร์ของชุดส่งกระบะกลับ (ส่วนที่ 4) และกดปุ่มเพื่อให้ชุดยกกระบะ (ส่วนที่ 2) ยกกระบะขึ้นถึงจุดสูงสุด ซึ่งกระบะขึ้นส่วน A จะไหลตามรางโรลเลอร์ข้าม Slab Conveyor ด้วยแรงโน้มถ่วง เข้าสู่ถาดโรลเลอร์วางกระบะ (ส่วนที่ 3)

กระบะจะถูกดันให้เอียงด้วยกระบอกลูกสูบเพื่อความสะดวกในการหยิบขึ้นส่วน A ไปใช้งาน กระบะขึ้นส่วน A จะบังเซนเซอร์ที่ติดตั้งไว้ส่งผลให้รางโรลเลอร์ของชุดส่งกระบะเปล่ากลับ (ส่วนที่ 4) ถูกยกเอียงด้วยกระบอกลูกสูบทำให้กระบะเปล่าไหลเข้าสู่ตำแหน่งของชุดยกกระบะเปล่าลง (ส่วนที่ 5) เซนเซอร์สั่งให้มอเตอร์ทำงาน กระบะเปล่าถูกยกลงด้านล่างและไหลเข้ารถพ่วง รางโรลเลอร์ของชุดส่งกระบะเปล่า (ส่วนที่ 4) เคลื่อนกลับแนวระนาบก่อนรถ AGV เคลื่อนที่ต่อไป

กิจกรรม D2: ประชุมกับสถานการณ์งาน

พนักงาน CI และพนักงานในแผนกสร้าง APHD ตามแบบ โดยใช้เครื่องมือที่มีในแผนกด้วยต้นทุนชิ้นส่วนโครงสร้าง 109,130 บาท และต้นทุนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 40,615 บาท รวมเป็นเงิน 149,745 บาท (ไม่รวมค่าแรงของพนักงานประจำที่สร้างและติดตั้ง) และติดตั้ง APHD, MS จัดส่งขึ้นส่วน A จำนวน 48 ชิ้นต่อรอบ ให้กับสถานี B ภายใต้การประสานงานของสมาชิก CFT ที่รับผิดชอบ

กิจกรรม C1: เก็บข้อมูลเวลา

APHD ช่วยทำงานในขั้นตอนซึ่งเดิมเป็น NRW_NNVA ของ OP1 และ OP2 และการเปลี่ยนตำแหน่งวางกระบะขึ้นส่วน A ที่สถานีย่อย B1 ช่วยให้ OP1 หยิบขึ้นส่วนไปใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น นอกจากนี้

ยังมีการปรับตำแหน่งการวางลาดสกรูให้ OP2 หยิบได้สะดวก ส่งผลให้ RW_VA ของทั้ง OP1 และ OP2 ลดลงสมาชิกของ CFT จาก CI ประเมินเวลาเวลาปฏิบัติงานหลังการปรับปรุงด้วยการจับเวลาการปฏิบัติงานจริงตามหลักการของการศึกษาเวลา ได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขั้นตอนและเวลางานของสถานี B หลังใช้ APHD

สถานี/ พนักงาน	งานย่อย	ประเภท	เวลา (วินาที)
B1/OP1	1. หยิบและเตรียมชิ้นส่วน A	RW_VA	6.06
	2. ประกอบชิ้นส่วน A กับ M, จัดตำแหน่ง	RW_VA	13.50
B2/OP2	1. นิดสารประสานชิ้นส่วน A กับ M	RW_VA	7.28
	2. หยิบสกรูและจับยึดชิ้นส่วน A กับ M	RW_VA	12.35

กิจกรรม C2: ประเมินผล

หลังการปรับปรุงส่งผลให้ CT ของสถานี B ลดลงเป็น 19.63 วินาทีต่อชิ้น ทำให้อัตราการผลิตเท่ากับ 1169 ชิ้นต่อกะ ภาระงานส่งชิ้นส่วน A ของ MS ลดลงเหลือ 28.66 รอบต่อกะ หรือต้องส่งทุก 15.70 นาทีต่อรอบ และพนักงานไม่มีความเสี่ยงด้านการปวดเมื่อยกล้ามเนื้อจากการยกกระเบะชิ้นส่วน เมื่อ CT ที่สถานี B ลดลงส่งผลให้ความสูญเปล่าของเวลาการรอคอยที่สถานีอื่น ๆ ในกระบวนการลดลงด้วย คิดเป็นมูลค่าด้านต้นทุนค่าแรงได้ 105,442 บาทต่อปี จึงคาดว่า การใช้ APHD จะคุ้มทุนภายในระยะเวลา 1 ปี 5 เดือน

กิจกรรม A1: จัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน

จากผลสำเร็จของการปรับปรุงและการประยุกต์ APHD ที่สถานี B หัวหน้า CFT นำเสนอผู้บริหารที่เกี่ยวข้องเพื่อพิจารณารับรอง สมาชิกจาก CI, AL และ MS จัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงานและสื่อสารกับทุกแผนกที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรม A2: สรุปโครงการ

โครงการปรับปรุงบรรลุเป้าหมายหลัก อัตราการผลิตเพิ่มจาก 990 เป็น 1169 ชิ้นต่อกะ ด้วยรอบเวลาการผลิตของสถานี B เท่ากับ 19.63 วินาทีต่อชิ้น สามารถกำจัดปัญหา

ความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการยกกระเบะชิ้นส่วน A และลดภาระการส่งชิ้นส่วนของแผนกจัดส่งชิ้นส่วนโดยเฉลี่ยจาก 48.5 เหลือ 28.66 รอบต่อกะ ทีม CFT นำเสนอและได้รับการยอมรับจากผู้เกี่ยวข้องจึงได้จัดทำเป็นมาตรฐานการปฏิบัติงานสำหรับทุกแผนกที่เกี่ยวข้อง

7. สรุปและอภิปรายผล

ผลการดำเนินการโครงการเพิ่มอัตราการผลิตของสถานีกรณศึกษา ซึ่งเป็นคอกวดของกระบวนการ ด้วยการบูรณาการความร่วมมือของสมาชิกในทีมที่มาจากแผนกที่มีหน้าที่ต่างกัน แต่มีความเกี่ยวข้องกับวิธีปฏิบัติงานของสถานีที่ปรับปรุงภายใต้กรอบขั้นตอนการดำเนินงานของวงจร PDCA สามารถเพิ่มอัตราการผลิตของสถานี B ขึ้นจาก 990 ชิ้นต่อกะเป็น 1169 ชิ้นต่อกะ คิดเป็นเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 ของอัตราการผลิตเดิม ด้วยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ขนย้ายชิ้นส่วนอัตโนมัติ (APHD) เพื่อทำงานในขั้นตอนที่ไม่สร้างมูลค่าแต่จำเป็นต้องทำและไม่ใช้งานประจำ ส่งผลให้รอบเวลาของสถานี B ลดลงจาก 23.20 เป็น 19.63 วินาทีต่อชิ้น ลดลงร้อยละ 15.41 ของรอบเวลา ก่อนปรับปรุง โดยสามารถบรรลุเป้าหมายด้านความปลอดภัยในการทำงานของพนักงานตามหลักวิทยาศาสตร์เพราะพนักงานไม่ต้องปฏิบัติงานขั้นตอนที่มีความเสี่ยงต่อการปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ และสามารถลดภาระการจัดส่งชิ้นส่วนลงจาก 48.5 เหลือ 28.66 รอบต่อกะ หรือลดลงร้อยละ 41 ของภาระงานก่อนการปรับปรุงด้วยต้นทุนที่คาดว่าจะคุ้มทุนภายในระยะเวลาไม่เกิน 1 ปี 5 เดือน

การกำหนดกรอบการดำเนินการตามขั้นตอนของวงจร PDCA ร่วมกับการประยุกต์แนวคิด CFT ในการจัดตั้งทีมทำให้โครงการปรับปรุงสถานีประกอบที่นำเสนอนี้ ทำให้มีความชัดเจนด้านขั้นตอนและได้รับความร่วมมือจากสมาชิกที่ได้รับการแต่งตั้งจากแต่ละแผนก มีการแบ่งหน้าที่รับผิดชอบตามความชำนาญอย่างสอดคล้องกับหน้าที่ที่ต้องทำของแผนกต้นสังกัด โดยเป็นงานที่ต้องทำอย่างเป็นทางการผ่านความเห็นชอบของผู้บังคับบัญชาไม่ใช่เป็นเพียงการให้ความร่วมมือกับทีมผู้เชี่ยวชาญที่เข้ามาทำการปรับปรุงเท่านั้น จึงส่งผลต่อความสำเร็จของการดำเนินโครงการตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งสอดคล้องกับคำแนะนำของ [8] และ [9] ด้านประสิทธิผลของ

การประยุกต์หลักการ CFT ซึ่งเน้นว่าสมาชิกของทีมควรมีจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและต้องได้รับการแต่งตั้งอย่างเป็นทางการ ซึ่งจะเป็แนวทางที่ส่งเสริมให้เกิดความร่วมมือกันระหว่างหน่วยงานเพื่อบรรณาการวิธีการปรับปรุงกระบวนการขององค์กรที่มีหลายหน่วยงานเกี่ยวข้องและแต่ละหน่วยงานมีเป้าหมายของตนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Chaisorn, M. Thongjua and B. Lila, "Production Rate Improvement of an Automotive Part Production Line with a Reduction of Waste from Material Handling," *The Conference of Industrial Engineering Network*, Petchburi, pp. 315-320, 2012.
- [2] A. Pinchaimool, N. Sirilak and S. Luachai, "Improvement of Car Production Line using Industrial Engineering Tools," *Journal of Industrial Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 93-105, 2018.
- [3] S. Ponpakdee, "Waste Reduction in Bottled Water Production Process," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 38, no.3, pp. 77-90, 2021.
- [4] N. Sriputtha, J. Kositwat and D. Kaewdook, "Reducing waste in Detergent Packaging Process by Using ECRS Technique," in *the 5th Rajamangala Manufacturing & Management Technology conference*, Chanthaburi, Thailand, May 28-29, 2020, pp 190-196.
- [5] K. Wajanawichakon, "Waste Reduction for Efficiency Improvement in Broom Production Processes: A Case Study of Community Enterprise BungWai, Ubon Ratchathani," *UBU Engineering Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 141-152, 2019.
- [6] W. Sornsuphap, "A Design of Automated Material Handling Equipment for PCB Jigs," B.E. project, Dept. Industrial Engineering, Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2017.
- [7] D. M. Stipp, M. L. Pimemta and D. Jugend, "Innovation and Cross-functional Team Analysis of Innovative Initiatives in a Brazilian Public Organization," *Team Performance Management*, vol. 24, no. 1/2, pp. 84-105, 2018, doi: 10.1108/TPM-12-2016-0056 .
- [8] E. Kyle, S. M. Janice, J. F. Sarah and W. H. Peter, "Examining Project Commitment in Cross-Functional Teams: Antecedents and Relationship with Team Performance," *Journal of Business and Psychology*, vol. 29, pp. 443-461, 2014, 0.1007/s10869-013-9325-6.
- [9] J. Daspit, C. J. Tillman, N. G. Boyd and V. Mckee, "Cross-Functional Team Effectiveness, An Examination of Internal Team Environment, Shared Leadership, and Cohesion Influences," *Team Performance Management*, vol. 19, no. 1/2, pp. 34-56, 2013, doi: 10.1108/13527591311312088.
- [10] T. Phannikul, D. Sangkamanee and P. Ngamsanga, "Efficiency Improvement in Manufacturing Process by Industrial Engineering Tools Case Study: Bicycle Assembly Factory," in *The 32th Conference of Industrial Engineering Network*, Samut Prakan, Thailand, Oct. 30-31, 2014.
- [11] M. Kittiyankajon, N. Phothising and T. Padpeng, "Application of Industrial Engineering Techniques to Improve Production Efficiency: a Case Study of Mushroom Grain Spawn Process," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 71-89, 2019.
- [12] N. Sangrudee and J. Rukijkanpanich, "Process Improvement of Fuel Pump Production in Automobile Component Manufacturer," *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 3, pp. 584-594, 2011.
- [13] B. Nilpan, "Case Study for Company AAA Ltd: Arranging Equipment to Minimize Machinery Transportation Time," *SAU Journal of Science & Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 56-68, 2021

- [14] O. Yomkerd, P. Trevittaya and N. Charoenchai, "The Improvement of Worker's Sitting Postures in Knife Forging Industry by Ergonomics Principles," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 22, no. 3, pp. 10–20, 2015.
- [15] P. Kamnuengthamkulcha and R. Chantarasa, "Design and Improvement of Work, Work Stations and Environment in the Processes of ARC Stack Medium using Ergonomic Principles," in *The 29th Conference of Industrial Engineering Network*, Ubon Ratchathani, Thailand, Oct 20–21, 2011, pp. 283–290.
- [16] M. Yusuf, N. Adiputra, I. D. Putu Sutjana and K. Tirtayasa, "The Improvement of Work Posture Using RULA Analysis to Decrease Subjective Disorders of Strawberry Farmers in Bali," *International Research Journal of Engineering, IT & Scientific Research*, vol. 2, no. 9, pp. 1–6, 2016.
- [17] N. Muangsuwan and N. Charoenchai, "The Development of an Information System for Assessing Risk Regarding to Safety and Occupational Health," presented at *the 1st Conference of Industrial Engineering and Management*, Chiang Mai Thailand, Oct 31–31, 2017, pp. 1–4.
- [18] C. Na Takuathung and P. Diloksumpan, "Ergonomic Risk Assessments of Timber Harvesting Workers in Teak Plantations, Phrae Province," *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 223–233, 2021, doi: 10.14456/tjst.2021.18.
- [19] K. N. Poh, G. G. G. Gerald and C. E. Uchena, "Concurrent Engineering Team: The Role of Cross-Functional Teamwork in Engineering Project Performance," in *International Conference in Design and Concurrent Engineering*, Melaka, Malaysia, Sep. 20–21, 2010, pp. 60–65.
- [20] B. G. Dale, T. van der Wiele and J. van Iwaarden, "Policy Deployment," in *Managing Quality*, 5th ed., Singapore: Wiley-Blackwell Publishing, 2007, ch. 8, sec. 4 pp 164–165.
- [21] *Ergonomics Assessment*, Thai Ergonomics Assessment, Jul 15, 2014. [Online]. Available: <http://http://thai-ergonomic-assessment.blogspot.com/>.

การส่งเสริมประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งช่องโดยการสอดช่องที่กลางของผลิต

An Enhancement of the Ice Block Productivity by Inserting a Channel at the Middle of the Mould

ภูริช ไวยโกชน¹ และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ^{1,*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

Phurich Vaiyaphoch¹ and Anusorn Chinsuwan^{1,*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Nai Mueang, Mueang, Khon Kaen, 40002, Thailand

*Corresponding Author E-mail: anuchi@kku.ac.th

Received: Feb 03, 2022; Revised: Aug 24, 2022; Accepted: Aug 30, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาการผลิตน้ำแข็งช่องให้มีค่าไม่เกินช่วงระยะเวลาที่มีราคาค่าไฟฟ้าราคาต่ำของแต่ละวัน ซึ่งเท่ากับ 11 hrs. การวิจัยทำโดยการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของช่องผลิตแบบดั้งเดิม ของผลิตแบบมีช่องกลาง และช่องแบบมีช่องกลางที่มีการฉีดน้ำเกลือภายใน อุณหภูมิบ่อแช่ อุณหภูมิน้ำป้อน ปริมาตรน้ำป้อน และอัตราการไหลน้ำเกลือ กำหนดให้เป็น -10°C , 27°C , 180 liters และ 80 lpm ตามลำดับ พบว่าช่องผลิตแบบดั้งเดิมที่มีระยะเวลารอบผลิตเท่ากับ 44.25 hrs. การติดตั้งช่องกลางสามารถทำให้ระยะเวลารอบผลิตเป็น 33.92 hrs. และการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางทำให้ระยะเวลารอบผลิตเป็น 9.87 hrs. ทั้งนี้เนื่องจากช่องกลางเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณกลางความหนาของ และน้ำเกลือที่ถูกฉีดเข้าช่องกลางทำให้อุณหภูมิผิวของมันต่ำกว่าจุดเยือกแข็งตลอดเวลา ส่งผลทำให้การก่อตัวของน้ำแข็งแผ่ขยายออกจากทั้งผิวด้านข้างของช่องและผิวของช่องกลาง

คำสำคัญ: การแข็งตัว, การผลิตน้ำแข็งช่อง, ระยะเวลารอบผลิต

Abstract

The purpose of this study is to reduce the batch time the of the block ice production to be not longer than the duration of lower electrical cost in a day, 11 hrs. Computational fluid dynamics (CFD) was used in this study. Three types of mould were considered: conventional mold, conventional mould with a channel in its middle, conventional mould with brine injection in the channel. The pool temperature, initial water temperature, volume of feed water and channel's brine injection flow rate are -10°C , 27°C , 180 liters and 80 lpm, respectively. Comparison with the batch time of the conventional mold, which is 44.25 hrs., the channel can be reduced the batch time to be 33.92 hrs. Moreover, the injection of brine inside the channel can reduce batch time to be 9.87 hrs. This is due to at the middle of the mould, heat transfer surface is increased from the channel walls and the brine injection causing the channel wall temperature is always below the water freezing point. This leads to the ice forms from both the mould and channel walls.

Keywords: Solidification, Ice block production, Batch time reduction

1. บทนำ

น้ำแข็งของถุกนิยมนำไปใช้ในการอุปโภค บริโภค ถนอมอาหาร และรักษาความเย็นในกิจกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะในประเทศไทยที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ในปัจจุบันอุณหภูมิของโลกในมีแนวโน้มสูงขึ้นจากสภาวะโลกร้อนทำให้ความต้องการใช้น้ำแข็งสูงขึ้นในทุก ๆ ปี

กระบวนการผลิตน้ำแข็งของเริ่มจากการการเติมน้ำป้อนที่อุณหภูมิห้องเข้าไปจนเต็มของผลิต แล้วนำของผลิตไปแช่ในบ่อน้ำเกลือที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จากนั้นรอให้น้ำแข็งขึ้นรูปจากการกระบวนการแข็งตัว (Solidification) โดยน้ำแข็งของขนาดทั่วไปที่สามารถนำไปจำหน่ายได้ จะใช้ระยะเวลารอบผลิต (Batch Time) เวลาผลิตต่อเนื่องทั้งสิ้น 24 hrs. อย่างไรก็ตามต้นทุนหลักของการผลิตน้ำแข็งของคือค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีอัตราแปรผันตามช่วงเวลาที่ใช้งาน (Time of Use) โดยช่วงที่มีค่าพลังงานถูกมีระยะเวลาทั้งสิ้น 11 hrs. ในช่วงกลางคืน ดังนั้นผู้ประกอบการจึงต้องดำเนินการผลิตเฉพาะในช่วงเวลาดังกล่าว ส่งผลให้ในเชิงปฏิบัติจริงแต่ละรอบการผลิตจะใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้น 40 hrs. ถึง 70 hrs. เนื่องจากต้องมีการพักกระบวนการผลิตในเวลากลางวัน [1] จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้มีงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็ง เช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพของสารทำความเย็น การเลือกอุปกรณ์มอเตอร์ (Motor) หรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ในระบบอัดอัดไอสารทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูง

อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปน้ำแข็งของมีกระบวนการหลักคือการเปลี่ยนแปลงสถานะด้วยการแข็งตัว (Solidification) ซึ่งใกล้เคียงกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บพลังงานในรูปความร้อนแฝง (Latent Heat Thermal Energy Storage, LHTES) โดยปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะคือการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) ในสารเก็บพลังงาน เช่น [2] การติดตั้งปั๊มไหลวนน้ำภายในอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบท่อและเปลือก (Shell & Tube LHTES) โดยประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราการไหลวนของน้ำมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการไหลของสารแลกเปลี่ยนความ

ร้อน โดยระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะลดลง 8.04 hrs. หรือประมาณ 65.34% อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากสามารถทำได้เฉพาะน้ำในสถานะที่เป็นสารละลาย

ปัจจัยต่อมาคือการเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน [3] เปรียบเทียบการแข็งตัวและการละลายของน้ำในอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบท่อและเปลือก พบว่าการติดตั้งครีบบตามแนวยาว (Longitudinal fin) ให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าครีบบแบบวงกลม (Annulus fin) โดยสามารถลดระยะเวลาการแข็งตัวลง 50% และ 43% ตามลำดับเมื่อเทียบกับไม่ติดตั้ง [4] การเพิ่มความยาวของครีบบสามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารพาราฟิน (Paraffin) ประเภท RT50 (Rubitem GmbH) ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการแลกเปลี่ยนความร้อน [5] พบว่า การเพิ่มจำนวนครีบบ, เพิ่มความยาวครีบบและเพิ่มความหนาครีบบ จะส่งผลให้ระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารลดลง 26.1%, 31.5% และ 4% ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่าและการเพิ่มจำนวนและความยาวครีบบส่งผลให้ลดเวลาการละลายอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าการเพิ่มความหนาครีบบ [6] การปรับปรุง LHTES ให้มีรูปร่างขดเกลียว (Helical coiled) ส่งผลให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น การใส่ครีบบชนิดเกลียว (Spiral fin) และการลดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณท้ายเปลือก (Conical-shell design) สามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารเมื่อเทียบกับการไม่ปรับปรุงคือ 26% และ 40% ตามลำดับ

[7] การใส่วงโลหะบาง (Thin layer ring) ในอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบกลุ่มท่อ (Ice on Coiled LHTES) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มากมีผลต่อการลดเวลาการแข็งตัวของน้ำ และการจัดวางวงโลหะบางแบบไขว้ท่อสลับบนล่าง (Staggered Arrangement) ส่งผลดีกว่าการติดตั้งแบบขนาน (Parallel Arrangement) เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านช่องว่างของเหลวภายในน้ำแข็ง (Cavity) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการแข็งตัวได้ยากที่สุด ต่อมา [8] พบว่าการติดตั้งวงโลหะแบบไขว้ท่อสลับบนล่างมีประสิทธิภาพดีที่สุดและมีน้ำหนักของวัสดุที่น้อยกว่าการติดตั้งครีบบแบบวงกลม โดยที่ระยะเวลาเท่ากันการใส่วงโลหะ

บางจะเกิดมวลของน้ำแข็งเพิ่มขึ้น 34% ส่วนแบบการใส่ครีบบางจะเกิดมวลมีการเกิดมวลน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 21% เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แบบดั้งเดิม

อีกปัจจัยที่สำคัญคือผลต่างของอุณหภูมิการถ่ายเทความร้อน [9] ศึกษาผลต่างอุณหภูมิเข้าของสารทำความเย็นต่ออัตราการเกิดน้ำแข็งพบว่าทุก ๆ อุณหภูมิสารทำความเย็นที่ลดลง 1 K จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงาน (Coefficient of performance, COP) เพิ่มขึ้น 1.5%

[10] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำแข็งของขนาด $0.27\text{ m} \times 0.56\text{ m} \times 1.484\text{ m}$ ที่แช่ในบ่อน้ำเกลือ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเวลารอบผลิตมากที่สุดคือการลดค่าอุณหภูมิบ่อแช่ (Pool temperature), การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของบ่อแช่ (Pool side heat transfer coefficient) และ การปรับลดอุณหภูมิของน้ำป้อน โดยลดระยะเวลารอบผลิตได้ ประมาณ 68 hrs., 2.5 hrs. และ 1.16 hrs. ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิบ่อแช่ที่เหมาะสมที่สุดคือ -10°C

การปรับปรุงประสิทธิภาพทุกแบบที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนสถานะของสาร โดยส่วนใหญ่จะศึกษาการปรับปรุง

ประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้โดยทั่วไปสรุปได้ดังตารางที่ 1

อย่างไรก็ตามไม่มีงานวิจัยใดที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงรูปร่างของช่องผลิต ซึ่งผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเป็นตัวแปรในการศึกษาทดลองของงานวิจัยนี้ได้

2. เครื่องมือการทดลอง และเงื่อนไขการทดลอง

ทำการศึกษาทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่การจำลองทางพลศาสตร์ของไหลมีสัดส่วนเท่ากับขนาดจริงด้วย โปรแกรม Ansys Fluent 2019 R3 และเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลองกับทดลองจริง ณ สถานที่ปฏิบัติการ ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงงานน้ำแข็งมิตรภาพขอนแก่น 2002

2.1. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

การจำลองทางพลศาสตร์ของไหลในรูปแบบ 3 มิติ ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลา การแข็งตัว (Solidification) การไหลแบบปั่นป่วน (k-epsilon) และ อยู่ภายใต้เงื่อนไขของวิธีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy-porosity technique) ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม Fluent โดยให้คุณสมบัติเริ่มต้นของน้ำตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

ผู้แต่ง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาการแข็งตัวที่ศึกษา	วิธีการศึกษา	ผลที่ได้
[2]	อัตราการไหลของสารให้ความเย็น	การทดลอง	ระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะลดลง 8.04 hrs. หรือประมาณ 65.34%
[3]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานกับงานวิจัยอื่นๆ	ลดระยะเวลาการแข็งตัวลง 50% และ 43% ตามลำดับเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม
[4]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	การเพิ่มความยาวของครีบบางสามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารได้อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มจำนวนและความยาวครีบบางส่งผลให้ลดเวลาการละลายของสารอย่างมีนัยสำคัญ
[5]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	มากกว่าการเพิ่มความหนาครีบบาง สามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสาร
[6]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล	เมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิมคือ 26% และ 40% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ผู้แต่ง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาการแข็งตัวของตัวที่ศึกษา	วิธีการศึกษา	ผลที่ได้
[7]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล	การจัดวางวงโลหะบางแบบไขว้เพื่อสลับบนล่างส่งผลดีต่อการติดตั้งแบบขนาน การใส่วงโลหะบางจะเกิดมวลของน้ำแข็ง
[8]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	เพิ่มขึ้น 34% ส่วนการใส่ครีบบางวงกลมมีการเกิดมวลน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 21% เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แบบดั้งเดิม
[9]	ความต่างของอุณหภูมิของของเหลวให้ความเย็น กับ สารแช่แข็ง	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล	อุณหภูมิสารทำความเย็นที่ลดลง 1 K จะทำให้ COP เพิ่มขึ้น 1.5% ปัจจัยที่มีผลต่อการลดระยะเวลาการอบผลิตมาก
[10]	ความต่างของอุณหภูมิของของเหลวให้ความเย็น กับ สารแช่แข็ง	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	ที่สุดคือการลดค่าอุณหภูมิบ่อแช่ โดยลดระยะเวลาได้ประมาณ 68 hrs. ซึ่งอุณหภูมิบ่อแช่ที่เหมาะสมที่สุดคือ -10°C

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติเริ่มต้นของน้ำในการจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

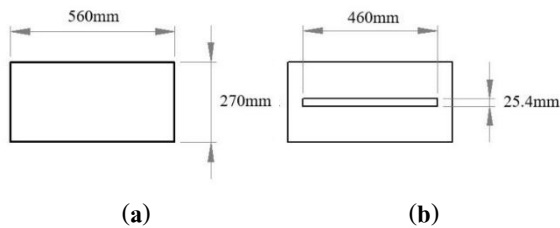
ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่น	999.8	kg/m^3
ความหนืดพลวัต	0.001003	kg/ms
ความหนืดจลนศาสตร์	1.0032×10^{-6}	m^2/s
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	0.6	W/mK
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	4182	J/kgK
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	9.81	m^2/s
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	6.734×10^{-5}	$1/K$
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	273	K
อุณหภูมิจุดแข็งตัว	273	K
ความร้อนแฝง	335,000	J/kg

แบบจำลองมีทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ ของผลิตภัณฑ์ดั้งเดิม ของผลิตภัณฑ์แบบมีช่องกลาง และของผลิตภัณฑ์ที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่อง โดยพิกัดความกว้าง ยาว สูงของช่องได้เป็น $270\text{ mm} \times 560\text{ mm} \times 1,500\text{ mm}$ ช่องกลางจะมีขนาดความกว้าง และ ยาว เป็น $460\text{ mm} \times 25.4\text{ mm}$

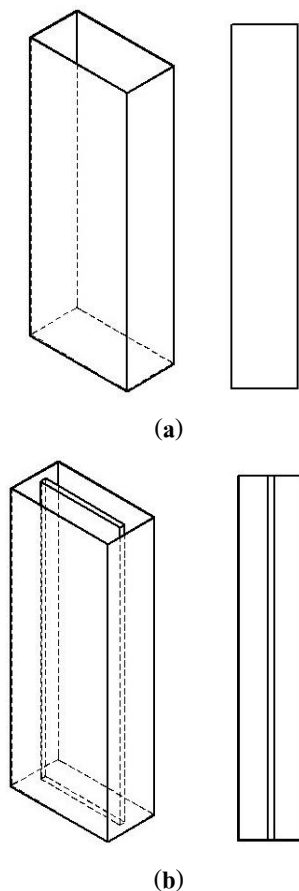
และมีความสูงเท่ากับของผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 กำหนดปริมาตรและอุณหภูมิ

เริ่มต้นของน้ำบ่อนคงที่อยู่ที่ 180 liters และ 27°C ตามลำดับ งานวิจัยที่ผ่านมา [10] พบว่า ขนาดกริด (grid) ที่เหมาะสมของโดเมน (domain) น้ำและน้ำเกลือเป็น $6.0\text{ mm} \times 6.0\text{ mm}$ และ $3.0\text{ mm} \times 3.0\text{ mm}$ ตามลำดับ พื้นผิวด้าน

นอกของโดเมนของน้ำกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ (Constant wall temperature) ยกเว้นส่วนบนที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Adiabatic wall) โดเมนของน้ำเกลือกกำหนดให้มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยอุณหภูมิขาเข้า (Inlet temperature) กำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิบ่อแช่ โดเมนของน้ำและน้ำเกลือกถูกกันด้วยเหล็กกล้า (Steel) ที่มีความหนา 2 mm



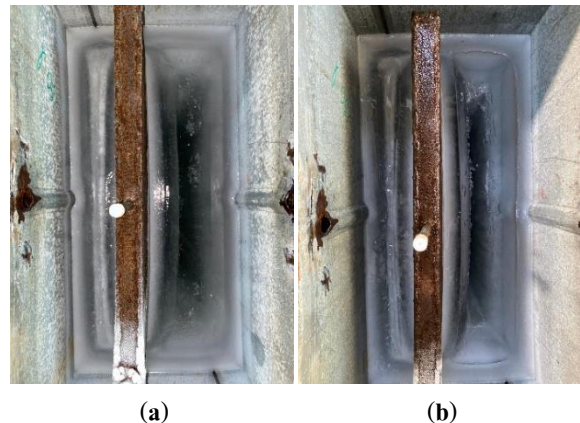
รูปที่ 1 พื้นที่หน้าตัดแสดงขนาดของ (a) ช่องน้ำแข็ง (b) ช่องกลาง



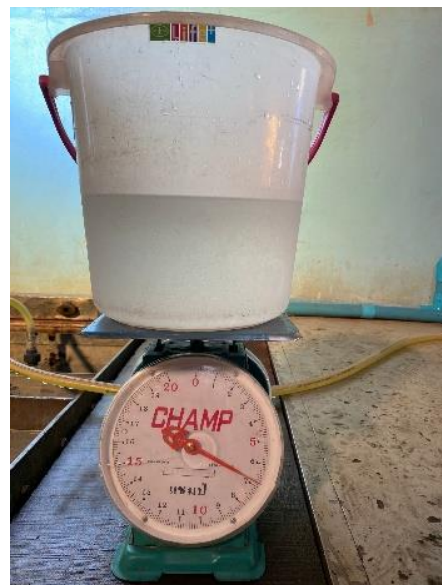
รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองของผลิตน้ำแข็งชนิด (a) ดั้งเดิม (b) ติดตั้งช่องกลาง

2.2. การทดลองในสภาวะจริง

ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขของสถานประกอบการที่อุณหภูมิของบ่อแช่มีค่าระหว่าง -7°C ถึง -12°C โดยใช้เวลาคงที่ 10 hrs. ดังรูปที่ 3 ปริมาตรและอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำบ่อนมีค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลอง อัตราการไหลของน้ำเกลือกในช่องกลางเท่ากับ 80 lpm และทำการวัดค่าสัดส่วนของเหลวโดยวิธีการชั่งน้ำหนักน้ำที่เหลืออยู่เทียบน้ำหนักเริ่มต้น ที่ระยะเวลาหลังจากเริ่มแช่ 10 hrs. ดังรูปที่ 4 เพื่อนำค่าสัดส่วนของเหลวดังกล่าวไปเทียบกับการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



รูปที่ 3 แสดงการแข็งตัวของน้ำจากด้านบนที่ระยะเวลา 10 hrs. หลังการแช่ในบ่อ (a) มีของเหลวหลงเหลืออยู่ (b) ของเหลวถูกนำออกไป



รูปที่ 4 การชั่งน้ำหนักของเหลวที่เหลืออยู่

3. ทฤษฎี

ในการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลทั้งหมด 3 โดเมน ได้แก่ โดเมนของน้ำ น้ำเกลือ และช่องผลิต โดยทำการพิจารณาการไหลในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady) และไม่อัดตัว (Incompressible) กำหนดให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ปริมาตร (Density) และ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) คงที่ และไม่คิดผลกระทบของการกระจายตัวจากความหนืด (Viscous dissipation) และ การแผ่รังสี (Radiation) โดย โดเมนของน้ำมีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และ โดเมนของน้ำเกลือมีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent)

3.1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

หาได้จากสมการที่ (1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

3.2. สมการการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (Momentum Equation)

3.2.1. การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของน้ำ

หาได้จากสมการที่ (2)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \rho g + S_M \quad (2)$$

S_M คือ ฟังก์ชันของความพรุน (Porosity function) หาได้จากสมการที่ (3)

$$S_M = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{v} \quad (3)$$

กำหนดให้ $A_{mush} = 10^5$, $\varepsilon = 0.001$, β คือ สัดส่วนของเหลว สามารถอธิบายสถานะของน้ำหาได้จากสมการที่ (4)

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 0; T < T_{solidus} \\ \beta &= 1; T > T_{solidus} \\ \beta &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}}; T_{solidus} < T < T_{liquidus} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3.2.2. การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของน้ำเกลือ

หาได้จากสมการที่ (5) โดยพิจารณาการไหลของน้ำเกลือเป็นแบบปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (5)$$

$-\rho \overline{u'_i u'_j}$ คือ ความเค้นเรโนลด์ (Reynolds Stress) หาได้จากสมการ Boussinesq's hypothesis หรือสมการที่ (6)

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_1 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

δ_{ij} คือ โครเนคเกอร์เดลต้า (Kronecker delta) สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (7)

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1; i = j \\ 0; i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

μ_t และ k คือความหนืด พลังงานจลน์ ของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถอธิบายได้โดยสมการ Standard $k - \varepsilon$ หรือสมการที่ (8) และ (9)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

ε , μ_t และ G_k คือ อัตราการกระจายตัว ความหนืดผลผลิตของพลังงานจลน์ ของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (10) และ (11)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (11)$$

ค่าคงที่ $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

3.3. สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

3.3.1. การเปลี่ยนแปลงพลังงานของน้ำ

หาได้จากสมการที่ (12)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

h, H คือ เอนทาลปีสัมผัส และ ผลรวมของเอนทาลปี
หาได้จากสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (13)$$

$$H = h + \Delta H \quad (14)$$

3.3.2. การเปลี่ยนแปลงพลังงานของน้ำเกลือ

หาได้จากสมการที่ (15)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$(\tau_{ij})_{eff}$ คือ เทนเซอร์ของความเค้นเบี่ยงเบน
(Deviatoric stress tensor) หาได้จากสมการที่ (16)

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (16)$$

μ_{eff} และ λ_{eff} คือ ความหนืด สัมประสิทธิ์การนำ
ความร้อนเชิงประสิทธิภาพ ของการไหลแบบปั่นป่วน หา
ได้จากสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (17)$$

$$\lambda_{eff} = \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (18)$$

โดย $Pr_t = 0.85$

3.4. การนำความร้อนภายในของผลิต

กำหนดวัสดุหลักหุบสังกะสี ค่าสัมประสิทธิ์การนำ
ความร้อน (λ) ความหนาแน่น (ρ) และค่าความจุความร้อน

จำเพาะ (c_p) มีค่าคงที่ การนำความร้อนภายในของผลิต
สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (19)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (19)$$

4. การสอบทวนผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ

ทำการวัดค่าสัดส่วนของแข็งของน้ำ โดยการชั่งน้ำหนัก
ของน้ำที่เหลือในช่อง เทียบกับน้ำหนักตอนเริ่มต้น ที่
ช่วงเวลา 10 hrs. หลังเริ่มปฏิบัติการทดลอง เพื่อยืนยันผล
กับการจำลองทางพลศาสตร์ของไหล โดยจะเทียบจำลองที่
มีลักษณะใกล้เคียงกับของน้ำแข็งขนาดจริง การ
เปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำส่วนที่เหลือ ระหว่างการจำลอง
ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ต่อการทดลองจริงจะมี
ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ -6.23% ถึง 8.14% โดยช่วงความ
คลาดเคลื่อนในลักษณะดังกล่าวจะเป็นแนวโน้มในการ
ทำนายผลที่จะให้ความถูกต้องของการจำลอง ซึ่งมีผลมา
จากจากความผันผวนของอุณหภูมิบ่อแช่ ที่เกิดจากความไม่
แน่นอนของภาระการทำงานของระบบทำความเย็นใน
กระบวนการผลิตที่มีการสลับการแช่ของผลิตใหม่อยู่
สม่ำเสมอ ดังตารางที่ 3 ดังนั้นแล้วผู้นำไปประยุกต์ใช้ควร
คำนึงค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงค่าความคลาดเคลื่อนนี้ด้วย

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบเพื่อแสดงความคลาดเคลื่อน
ของการทดลองต่อการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิง
คำนวณ ที่ระยะเวลา 10 hrs.

	ครั้งที่ น้ำหนักของเหลว		สัดส่วนของเหลว		ความคลาด เคลื่อน (%)
	[kg.]		[-]		
	ทดลอง	จำลอง	ทดลอง	จำลอง	
1	13.18	14.06	0.073	0.078	-6.23
2	14.66	14.06	0.081	0.078	4.25
3	13.34	14.06	0.074	0.078	-5.15
4	15.20	14.06	0.084	0.078	8.14

5. อภิปรายผล

5.1. อิทธิพลของการติดตั้งช่องกลางในของผลิต

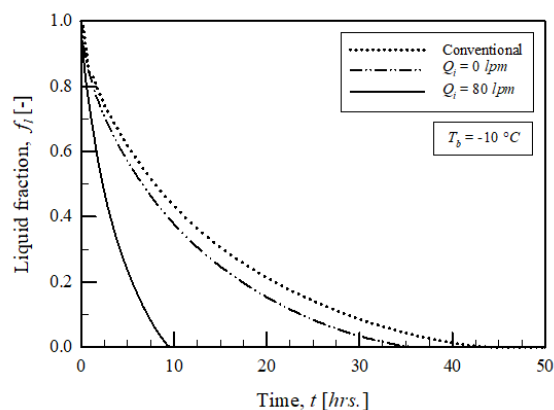
พิจารณาที่อุณหภูมิบ่อแช่น้ำเกลือ (T_b) เท่ากับ -10°C พบว่าของผลิตแบบดั้งเดิมมีระยะเวลารอบผลิตเท่ากับ 44.25 hrs. ของผลิตแบบมีช่องกลางมีระยะเวลารอบผลิตเป็น 33.92 hrs. และของผลิตแบบมีช่องกลางที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องมีระยะเวลารอบผลิตเป็น 9.87 hrs. โดยอิทธิพลจากการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางส่งผลให้ระยะเวลารอบผลิตของของผลิตแบบมีช่องกลางที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องสามารถลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญที่ 77.69% และเพิ่มอัตราการผลิตน้ำแข็งของได้มากขึ้นถึง 448.23% เมื่อเปรียบเทียบกับของผลิตแบบดั้งเดิม ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลารอบผลิต ระยะเวลารอบผลิตที่ลดลงได้ และการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

ชนิดของ ของผลิต	ระยะเวลา รอบผลิต [hrs.]	ระยะเวลารอบ ผลิตที่ลดลงได้ จากแบบดั้งเดิม [%]	การเพิ่ม ประสิทธิภาพ การผลิตจาก แบบดั้งเดิม [%]
ของผลิตแบบ ดั้งเดิม (Conventional)	44.25	-	-
ของผลิตแบบมี ช่องกลาง ($Q_i = 0 \text{ lpm}$)	33.92	23.34	130.45
ของผลิตแบบมี ช่องกลางที่มี การฉีดน้ำเกลือ ภายในช่อง ($Q_i = 80 \text{ lpm}$)	9.87	77.69	448.23

5.2. อิทธิพลของการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลาง

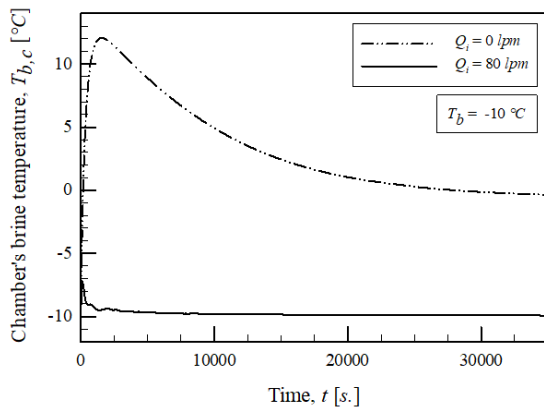
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิบ่อแช่น้ำเกลือ (T_b) ที่ -10°C ที่อัตราการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางเท่ากับ 80 lpm ($Q_i = 80 \text{ lpm}$) มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการลดลงของสัดส่วนของเหลวในของผลิตแบบดั้งเดิม (Conventional) และของผลิตแบบมีช่องกลางแต่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือภายใน ($Q_i = 0 \text{ lpm}$) ดังรูปที่ 5 เนื่องจากการการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) จากการฉีดน้ำเกลือ ส่งผลให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Transfer rate) ภายในช่องกลางมีค่าสูงกว่าแบบที่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือ



รูปที่ 5 สัดส่วนของเหลวในช่องต่อเวลา ที่อุณหภูมิบ่อแช่เท่ากับ -10°C ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในช่องกลาง ($T_{b,c}$) ต่อเวลา ที่อุณหภูมิบ่อแช่เท่ากับ -10°C พบว่าในช่วงเริ่มต้นแช่ของผลิตเป็นช่วงอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวของช่องกลางสู่น้ำเกลือสูงที่สุด เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำและน้ำเกลือมีมาก ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำเกลือในของผลิตที่ไม่มีการไหลวนจะสูงขึ้นจาก -10°C เป็น 12°C จากนั้นอุณหภูมิของน้ำและผิวช่องกลางจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) จนถึงอุณหภูมิคงที่ประมาณ 0°C ที่ระยะเวลาประมาณ 20,000 s. อย่างไรก็ตาม ผลของการฉีดน้ำเกลือส่งผลให้มีการไหลวนของน้ำเกลือในบ่อแช่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ามาแลกเปลี่ยนความร้อนอย่าง

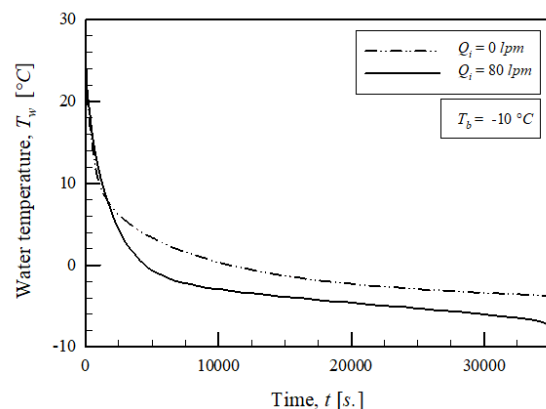
สม่ำเสมอ อุณหภูมิของน้ำเกลือในช่องกลางจะสูงขึ้นไปถึงเพียงแค่ว่า -7.2°C แล้วจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบ่อแช่ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 อุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในช่องกลางต่อเวลา ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเกลือในช่องกลางและอุณหภูมิน้ำในช่วงเวลาเดียวกันมีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนที่พื้นผิวช่องกลาง หากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำเฉลี่ย (T_w) ต่อเวลา (t) ของของผลิตที่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลาง ($Q_i = 0$ lpm) จะพบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิน้ำมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำเกลือภายในช่องกลางในช่วงเวลาเดียวกันเนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในช่องกลางมีค่าน้อยมาก อีกทั้งอุณหภูมิของน้ำและน้ำเกลือภายในช่องกลางมีค่าใกล้เคียงกันจึงสามารถอธิบายได้ว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนได้น้อย อย่างไรก็ตามการติดตั้งช่องกลางสามารถลดระยะเวลารอบผลิต (t_b) ได้เนื่องจากการลดขนาดของช่องว่าง (Cavity) ที่อยู่บริเวณแกนกลางของน้ำแข็ง ซึ่งบริเวณนี้ จะเกิดการแข็งตัวได้ช้าที่สุดเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ของชั้นน้ำแข็ง (Thickness of ice) ที่ก่อตัวขึ้นก่อนหน้าบริเวณผิวแต่ละด้านของของผลิตมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ ยิ่งน้ำแข็งมีความหนามากก็ส่งผลให้ขัดขวางการถ่ายเทความร้อนของน้ำสู่พื้นผิวของผลิตในช่วงระยะเวลาหลังจากนั้น

เมื่อเปรียบเทียบกับของผลิตที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลาง ($Q_i = 80$ lpm) พบว่า แนวโน้มอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำเกลือ เนื่องจากการฉีดน้ำเกลือทำให้ค่าการพาความร้อนของพื้นผิวภายในช่องกลางสูงกว่า รวมถึงการไหลวน (Circulate) เข้ามาแทนที่ของน้ำเกลือภายในบ่อแช่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่งผลให้เกิดการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนได้อย่างดี และมีการเกิดน้ำแข็งได้รวดเร็วกว่า รวมถึงลดระยะเวลารอบผลิตลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยภายในช่องผลิตต่อเวลา ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

6. สรุปผล

การปรับปรุงประสิทธิภาพของผลิต โดยการติดตั้งช่องกลางส่งผลให้ลดระยะเวลารอบผลิตลงได้เนื่องจากการลดขนาดของช่องว่างที่อยู่บริเวณแกนกลางของน้ำแข็ง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเกิดน้ำแข็งได้ช้าที่สุดเนื่องจากอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนจากผนังของผลิตถูกขัดขวางจากการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชั้นน้ำแข็งที่ก่อตัวขึ้นก่อนหน้า อย่างไรก็ตามของผลิตที่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางจะไม่ส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความร้อนในพื้นผิวช่องกลางอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเกลือภายในช่องกลางและอุณหภูมิน้ำภายในช่องผลิตมีค่าน้อย อย่างไรก็ตามอิทธิพลของการฉีดน้ำเกลือไหลวนภายในช่องกลางนั้นส่งผลต่อการลดระยะเวลารอบผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญถึง 77.69% เนื่องจากเกิดการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับ

ระหว่างพื้นผิวช่องกลางกับน้ำเกลือภายใน อีกทั้งยังทำให้น้ำเกลือที่มีอุณหภูมิต่ำภายในบ่อแช่ไหลเข้ามาแทนที่น้ำเกลือในช่องกลางที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่พื้นผิวกับน้ำอย่างสม่ำเสมอทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้ 448.23%

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ หรือการศึกษาอิสระ สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คำสัญลักษณ์

A_{mush}	ค่าคงที่ในสถานะสารละลาย [—]
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะ [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
E	ผลรวมของพลังงาน [J]
f_l	สัดส่วนของเหลว [—]
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [ms^{-2}]
G_k	ผลผลิตของพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน [$kg s^{-3} m^{-1}$]
h	เอนทาลปีสัมผัส [Jkg^{-1}]
h_{ref}	เอนทาลปีสัมผัสอ้างอิง [Jkg^{-1}]
H	ผลรวมของเอนทาลปี [Jkg^{-1}]
k	พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน [Jkg^{-1}]
p	ความดัน [Pa]
Pr_t	ตัวเลขพรีนัมเบอร์ของการไหลแบบปั่นป่วน [—]
Q_i	อัตราการฉีดน้ำเกลือในช่องกลาง [lpm]
S_M	ฟังก์ชันของความพรุน สมการที่ (3)
t	ระยะเวลา [$hrs.$], [$s.$]
t_b	ระยะเวลารอบผลิต [$hrs.$]
T	อุณหภูมิ [$^{\circ}C$]
T_b	อุณหภูมิบ่อแช่ [$^{\circ}C$]
$T_{b,c}$	อุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในช่องกลาง [$^{\circ}C$]
$T_{liquidus}$	อุณหภูมิจุดหลอมเหลว [$^{\circ}C$]
$T_{solidus}$	อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง [$^{\circ}C$]
T_{ref}	อุณหภูมิอ้างอิง [$^{\circ}C$]

T_w	อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย [$^{\circ}C$]
u	ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาค ในทิศทางแกน x [ms^{-1}]
u'	ความเร็วผันผวนของอนุภาค ในทิศทางแกน x [ms^{-1}]
$\vec{v}$	เวกเตอร์ของความเร็ว [ms^{-1}]

ตัวอักษรกรีก

β	สัดส่วนของเหลว [—]
δ_{ij}	โครเนกเคอร์เดลต้า [—]
ΔH	เอนทาลปีแฝง [J], [kgm^2s^{-2}]
ε	อัตราการกระจายตัว ของการไหลแบบปั่นป่วน [m^2s^{-3}]
λ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน [$Wm^{-1}K^{-1}$]
λ_{eff}	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเชิงประสิทธิภาพของการไหลแบบปั่นป่วน [$Wm^{-1}K^{-1}$]
μ	ความหนืดพลวัต [Pas]
μ_{eff}	ความหนืดเชิงประสิทธิภาพ ของการไหลแบบปั่นป่วน [Pas]
μ_t	ความหนืด ของการไหลแบบปั่นป่วน [Pas]
ρ	ความหนาแน่น [kgm^{-3}]
$(\tau_{ij})_{eff}$	เทนเซอร์ของความเค้นเฉือน [Nm^{-2}]

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Lertpiya, "Energy management system for block-ice factory using TOD and TOU tariff," M.S. thesis, Dept. Electrical. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2005.
- [2] J. Gasia, N. H. Steven Tay, M. Belusko, L. F. Cabeza and F. Bruno, "Experimental investigation of the effect of dynamic melting in a cylindrical shell-and-tube heat exchanger using water as PCM," *Applied Energy*, vol. 185, no. 1, pp. 136–145, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.042
- [3] M. A. Dekhil, J. V. S. Tala, O. Bulliard-Sauret and D. Bougearda, "Numerical analysis of the performance enhancement of a latent heat storage shell and tube unit

- using finned tubes during melting and solidification,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 192, 2021, Art. no. 116866, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116866.
- [4] M. J. Hosseini, A. A. Ranjbar, M. Rahimia and R. Bahrampoury, “Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems,” *Energy and Buildings*, vol. 99, pp. 263–272, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.045.
- [5] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman and A. Th. Mohammada, “Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 147–156, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.01.011.
- [6] J. Wołoszyn, K. Szopa and G. Czerwiński, “Enhanced heat transfer in a PCM shell-and-tube thermal energy storage system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 196, 2021, Art. no. 117332, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117332.
- [7] J. Xie and C. Yuan, “Numerical study of thin layer ring on improving the ice formation of building thermal storage system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 69, no. 1–2, pp.46–54, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.053.
- [8] H. Jannesari and N. Abdollahi, “Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems,” *Applied Energy*, vol. 189, pp. 369–384, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.064.
- [9] T. Yang, Q. Sun and R. Wnnersten, “The impact of refrigerant inlet temperature on the ice storage process in an ice-on-coil storage plate,” *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 82–87, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.04.014.
- [10] P. Sukborom and A. Chinsuwan, “Effects of feed water temperature, pool temperature, and pool side heat transfer coefficient on freezing time of the conventional block ice production,” *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 63–68, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.052.

การคัดเลือกรูปแบบการปรับปรุงทางแยกที่เหมาะสมด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพใน แบบจำลองการจราจรร่วมกับ Analytical Hierarchical Process (AHP)

The Selections of Appropriate Alternative Intersection Improvements Base on Effectiveness Measures of Traffic Models and Analytical Hierarchical Process (AHP)

พชร ศรีสุโพธิ์¹, วุฒิไกร ไชยปัญญา¹, ธนพล พรหมรักษา¹ และปฏิภาณ แก้ววิเชียร^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ในเมือง เมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Patchara Srisupoh¹, Wuttikrai Chaipanha¹, Thanapol Promraksa¹ and Patiphan Kaewwichian^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen
Campus, Nai Muang, Muang, Khon Kaen, 40000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: patiphan.ka@rmu.ac.th

Received: Jun 20, 2022; Revised: Sep 06, 2022; Accepted: Sep 08, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกรูปแบบทางแยกที่เหมาะสมบริเวณจุดตัดโครงการก่อสร้างทางหลวงชนบท ม.4040 กับทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพจากแบบจำลองการจราจรร่วมกับ Analytical Hierarchical Process (AHP) ผลการศึกษาพบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักด้านวิศวกรรมจราจรสูงสุด (0.5327) รองลงมา คือด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (0.2482) และด้านเศรษฐศาสตร์ (0.2191) ตามลำดับ โดยความล่าช้าบริเวณทางแยกเป็นปัจจัย รองที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญสูงสุด (0.2278) ผลการให้คะแนนสรุปว่ารูปแบบทางเลือกที่ 2 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทล.12 เป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมสูงสุดซึ่งได้คะแนน 0.9736 หรือ 97.36% โดยมีความโดดเด่นในปัจจัยวิศวกรรม จราจรและราคาก่อสร้าง แต่มีข้อด้อยในปัจจัยด้านการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นรองรูปแบบ ทางเลือกที่ 3 และ 4 ทั้งนี้ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพจากแบบจำลองที่ใช้เป็นค่าตัวคูณของทุกปัจจัย สามารถให้ผลการคำนวณที่สมเหตุสมผล ตัดปัจจัยเชิงคุณภาพ ลดความยุ่งยากในการสำรวจ รวบรวมข้อมูล และการคำนวณ รวมทั้งจะเป็นอีกทางเลือกในการพิจารณาตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่อไป

คำสำคัญ: ทางแยก, แบบจำลองการจราจร, Analytical Hierarchy Process (AHP)

Abstract

This study was aimed at selecting the appropriate intersection alternative at the crossing of Rural Road construction project, MH.4040, and Highway No. 12, using the Measure of Effectiveness from the traffic simulation and the analytical hierarchical process. The study results showed that the experts gave the highest weight to traffic engineering (0.4327), the second highest weight to environmental impact (0.2482), followed by economics (0.2191). The delay at the intersection is the secondary factor that receives the highest weight (0.2278). It has been concluded that the second alternative, the overpass along Highway 12, is the most appropriate alternative, receiving the score of 0.9736 or 97.36%. This alternative is outstanding in terms of traffic engineering and construction

cost. However, there are the drawbacks in the fuel consumption and environmental impact of Alternative 2, which are worse than those of Alternatives 3 and 4. The results of the study indicated that the Measure of Effectiveness used in the traffic model, which included the multiplying parameters of all factors, could yield reasonable calculated outcomes. It omits the qualitative factor, reduces complexity in surveying and calculative, and will be another alternative for selection of an intersection system in the future.

Keywords: Intersection, Traffic simulation model, Analytical Hierarchy Process (AHP)

1. บทนำ

มุกดาหารเป็นเมืองศักยภาพในด้านการท่องเที่ยว และการค้าระหว่างประเทศ จากการที่มีพรมแดนติดเขตแดนริมฝั่งแม่น้ำโขงประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยมีจุดผ่านแดนบริเวณสะพานมิตรภาพไทย-ลาว จึงเป็นหนึ่งในจังหวัดที่มีการเติบโตทางเศรษฐกิจสูงอย่างมากของประเทศ ทั้งนี้ยังส่งผลให้ความต้องการในการเดินทางและปริมาณการใช้รถใช้ถนนในเขตเมืองเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ในปี พ.ศ.2563 จังหวัดมุกดาหารมีปริมาณรถจดทะเบียน 128,690 คัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ.2562 กว่าร้อยละ 4.1 [1] ในขณะที่ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากปริมาณ

จราจรบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ซึ่งเป็นเส้นทางหลักเข้าสู่เมืองมุกดาหารมีปริมาณจราจรเฉลี่ยทั้งวันตลอดทั้งปี (AADT) ในปี พ.ศ.2564 กว่า 16,134 คันต่อวัน [2]

กรมทางหลวงชนบทได้เล็งเห็นถึงปัญหาด้านการขนส่งและจราจรที่เกิดขึ้นกับเมืองมุกดาหาร จึงมีแผนดำเนินการก่อสร้างโครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมสาย ง2 และ ง3 พังเมืองรวมเมืองมุกดาหาร หรือทางหลวงชนบท มห.4040 (รูปที่ 1) เพื่อให้บรรลุดัตุประสงค์ตามแผนงานบูรณาการพัฒนาพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษโครงการพัฒนาทางหลวงชนบทเพื่อสนับสนุนเขตเศรษฐกิจพิเศษชายแดน เพื่อรองรับการขยายตัวของชุมชนและการเติบโตของตัวเมืองมุกดาหาร



รูปที่ 1 สภาพปัจจุบันของโครงการก่อสร้างทางหลวงชนบท มห.4040

จากผลคาดการณ์ปริมาณการจราจรในอนาคตและระดับการให้บริการในปีที่ 20 (พ.ศ.2578) จากรายงานรายงานผลการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลในการคาดการณ์ปริมาณจราจร งานสำรวจออกแบบรายละเอียดและศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น(IEE) โครงการก่อสร้างถนนตามผังเมือง

รวม ถนนสาย ง2 และ ง3 พังเมืองรวมมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร [3] พบว่า ทางแยกถนนโครงการฯ ตัดกับทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 มีระดับการให้บริการอยู่ในระดับ D และเป็นทางแยกที่มีปริมาณจราจรเข้าสู่ทางแยกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทางแยกอื่นๆ

ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้างต้นสะท้อนถึงโอกาสในการเกิดปัญหาการจราจรติดขัดที่ทางแยกในอนาคต ถึงแม้ว่าในการศึกษาดังกล่าวจะได้กำหนดแนวแก้ไขปัญหาการจราจรเบื้องต้นโดยการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจร แต่ด้วยสภาพการขยายตัวของเมืองและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากจากการศึกษาที่ได้ดำเนินการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 จึงอาจมีความจำเป็นที่จะต้องทำการกำหนดรูปแบบใหม่ในการปรับปรุงทางแยกให้มีความเหมาะสมเพื่อรองรับปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

การวิเคราะห์และประเมินทางเลือกในการพัฒนาโครงข่ายถนนที่อยู่ในความรับผิดชอบของทั้งกรมทางหลวง (ทล.) และกรมทางหลวงชนบท (ทช.) ในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่นอกจากจะพิจารณาตัวชี้วัดด้านการจราจรแล้ว จะประเมินและตัดสินใจโดยพิจารณาจากทางเลือกที่มีค่าคะแนนสูงสุด ด้วยวิธีการ Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) ซึ่งใช้ปัจจัยต่างๆ ร่วมในการให้คะแนนโดยตัวแปรและปัจจัยเหล่านี้จะถูกกำหนดให้เป็นเกณฑ์ในรูปแบบเชิงคุณภาพ (ไม่สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของทางเลือกในเชิงตัวเลขได้) บางปัจจัยมีความยุ่งยากในการสำรวจและรวบรวมข้อมูล หรือมีความซับซ้อนในประเมินหรือการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ต้องการ

การศึกษานี้ได้ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Traffic Micro Simulation Model) เป็นเครื่องมือเพื่อใช้วิเคราะห์ ประเมินผล และเสนอแนะรูปแบบทางแยก โดยใช้ทั้งตัวชี้วัดด้านการจราจร ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเพื่อให้ครอบคลุมการวิเคราะห์ในทุกมิติ ร่วมกับการประยุกต์ใช้ Analytical Hierarchy Process (AHP) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการ Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) เพื่อให้เป็นแนวทางเสนอแนะอีกรูปแบบหนึ่งในการจัดลำดับความสำคัญและการคัดเลือกรูปแบบของทางแยกที่มีความเหมาะสมมากที่สุด ซึ่งจะสามารถลดทอนความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์และการรวบรวมข้อมูล ตลอดจนสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ทางเลือกรูปแบบทางแยกที่เหมาะสมจากตัวชี้วัดประสิทธิภาพจากแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคร่วมกับ Analytical Hierarchy Process (AHP)

3. ทบทวนการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

3.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)

3.1.1 คำนวณน้ำหนักความสำคัญ

Saaty (1980) [4] โครงสร้างการวิเคราะห์ AHP เป็นรูปแบบของเมตริกซ์ เมื่อ w_i และ w_j เป็นค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยสัมพัทธ์ของการตัดสินใจสำหรับหลักเกณฑ์ i และ j ตามลำดับ (สมการที่ (1)) และเมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นคู่เพื่อหาน้ำหนักความสำคัญ $a_{ij} = w_i / w_j$ และค่าของส่วนกลับ $a_{ji} = 1 / a_{ij}$ จะอยู่ในเมตริกซ์ $A = \{a_{ij}\}$ แสดงดังสมการที่ (2)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = \sum_{j=1}^n w_i = n w_i \quad (2)$$

ในเมตริกซ์คู่ A องค์ประกอบตามแนวเส้นทแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนการเปรียบเทียบเป็นคู่ขององค์ประกอบการตัดสินใจในส่วนล่างของเส้นทแยงมุมจะเป็นส่วนกลับของการเปรียบเทียบเป็นคู่ขององค์ประกอบส่วนบนของเส้นทแยงมุม

3.1.2 การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนนของรูปแบบทางเลือก

การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักคะแนนของรูปแบบทางเลือกสามารถหาได้จากการสังเคราะห์ข้อมูลแต่ละรูปแบบทางเลือก ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4)

$$W_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1.0 \quad (4)$$

เมื่อ

W_i คือ น้ำหนักคะแนนของแต่ละหลักเกณฑ์

V_i คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

n คือ จำนวนตัวเลขที่นำมาหาค่าเฉลี่ย

3.1.3 การวิเคราะห์ความสอดคล้องกัน

การคำนวณหาความสอดคล้องกันของเหตุผลในการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนทำได้โดยการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ทั้งหมด แล้วนำผลรวมของค่าวิญจน์ของแต่ละหลักเกณฑ์ในแนวนอนแต่ละแถวคูณด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยในแนวนอนแต่ละแถว แล้วนำเอาผลคูณที่ได้มารวมกัน ผลลัพธ์จะเท่ากับจำนวนหลักเกณฑ์ทั้งหมดที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลรวมนี้ของค่าวิญจน์นี้เรียกว่า Largest Eigenvalue ($\lambda_{\max}$) ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \{ (\sum_{j=1}^n a_{ij}) * w_i \} \quad (5)$$

เมื่อ

$\lambda_{\max} = n$ คือ ตารางเมตริกซ์มีความสอดคล้องกัน

$\lambda_{\max} > n$ คือ ไม่มีความสอดคล้องกัน

ดัชนี ความ สอด ค ลั ง (Consistency Index; CI) วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (6)

$$C.I. = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad (6)$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio; CR) วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (7)

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.C.I.} \quad (6)$$

เมื่อ

R.C.I. = ดัชนีความเที่ยงตรงสุ่ม (Random Consistency Index) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีความสอดคล้องจากการสุ่มตัวอย่าง

จำนวนปัจจัย	1	2	3	4	5
R.C.I	0.00	0.00	0.52	0.90	1.12

เกณฑ์การวิเคราะห์ความสอดคล้องกันของเหตุผลสามารถทำได้โดยพิจารณาจากจำนวนปัจจัย ถ้าจำนวนหลักเกณฑ์เท่ากับ 3 ค่า C.R. ไม่ควรเกิน 7% และถ้าจำนวนหลักเกณฑ์เกินกว่า 4 ค่า C.R. ไม่ควรเกิน 10% ทั้งนี้ถ้าหาก C.R. มีค่าเกินกว่ามาตรฐานดังกล่าว แสดงว่าเหตุผลนั้นไม่มีความสอดคล้องกัน ต้องทบทวนการวินิจฉัยใหม่ [5]

3.2 แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Traffic Micro Simulation Model)

3.2.1 หลักการพื้นฐานของแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

Dowling et al. [6] การจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคมีหลักการพื้นฐานมาจากแบบจำลอง Car-Following Model และ Lane-Changing Model เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนยานแต่ละคัน Burghout [7] สามารถอธิบายสภาพการจราจรระดับพฤติกรรมของขบวนยานแต่ละคันที่มีปฏิสัมพันธ์กับขบวนยานคันอื่นๆ และสภาพถนนและสิ่งอำนวยความสะดวก The Institution of Highways & Transportation (2006) [8] ซึ่งมักถูกใช้สำหรับทดสอบปัญหาการจราจรที่มีความซับซ้อน สามารถแสดงทั้งในรูปแบบสองมิติและสามมิติ ตัวอย่างซอฟต์แวร์ของแบบจำลองระดับกึ่งจุลภาค เช่น Paramics VISSIM และ Aimsun เป็นต้น

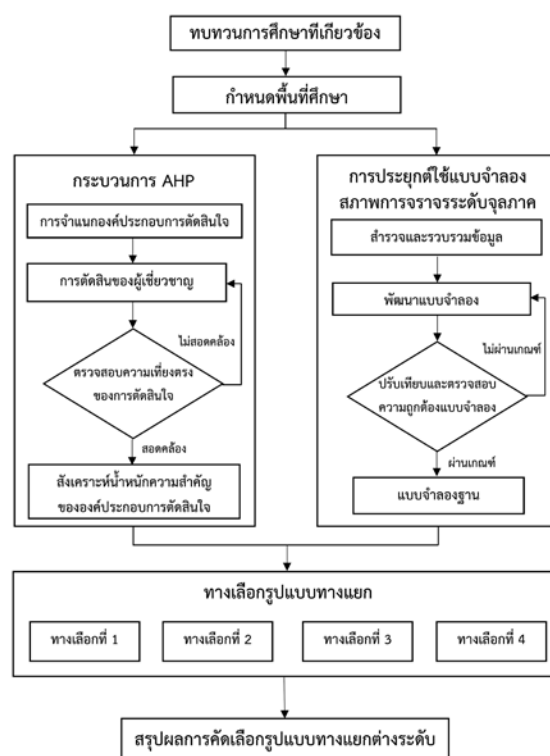
3.2.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ทางแยก

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ทางแยกหลายๆ รูปแบบในประเทศไทย เช่น Kojima et al. [9] ศึกษาเรื่องการประเมินผลการใช้วงเวียนด้วยแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค ในเขตอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งพบว่า เวลาในการเดินทางก่อนติดขัดและหลังติดขัดวงเวียน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ วราศักดิ์ ปะสังคิโย [10] วิเคราะห์การจัดการจราจรสำหรับรถจักรยานยนต์บริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจร โดยกำหนดมาตรการกำหนดพื้นที่เฉพาะหยุดรอสัญญาณไฟจราจรสำหรับรถจักรยานยนต์ และการกำหนดช่องทางเฉพาะสำหรับรถจักรยานยนต์ด้านซ้าย ร่วมกับการกำหนดให้รถจักรยานยนต์วิ่ง Hook Turn (การขับตรงไปก่อน แล้วจึงเลี้ยวผ่านทางแยก) ซึ่งทั้งสองมาตรการ

สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระดับการให้บริการที่ทางแยกได้ ชัยวัฒน์ ไชยบุค และประเมศวร์ เหลือเทพ [11] เสนอแนวทางการวิเคราะห์การจัดการจราจรของชุดทางแยกต่อเนื่อง โดยใช้ถนนกาญจนาภิเษยช่วงระหว่างแยกคลองเรียนถึงแยกหน้ามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค โดยพบว่า การจัดการจราจรแบบชุดทางแยกสามารถลดเวลาในการเดินทาง ความล่าช้า และความยาวแถวคอยของทุกทางแยก ได้เฉลี่ยร้อยละ 31.27 และ 32 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีอีกหลายการศึกษา [12–14] ที่กล่าวถึงการประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคในการวิเคราะห์หรือจัดการจราจรบริเวณทางแยก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคเป็นเครื่องมือที่มีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพ ในการประเมินตัวชี้วัดด้านการจราจรบริเวณทางแยก และเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาในครั้งนี้เช่นกัน

4. วิธีการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการทบทวนการศึกษาที่เกี่ยวข้อง รวมถึงผลการศึกษาและคาดการณ์ปริมาณการจราจรในอนาคตโครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมถนนสาย ง2 และ ง3 ผังเมืองรวมเมืองมุกดาหาร (ทางหลวงชนบท มห. 4040) จังหวัดมุกดาหารที่จัดทำโดยกรมทางหลวงชนบท ในปี พ.ศ.2552 และนำข้อมูลปริมาณการจราจรบริเวณทางแยก ในปี พ.ศ. 2578 (ปีที่ 20 หลังจากเปิดโครงการ) ที่ได้จากรายงานดังกล่าวมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองระดับจุลภาค จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลในแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคมาร่วมกับ Analytical Hierarchy Process (AHP) โดยการคัดเลือกบุคคลที่มีความรู้และประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ ในการทำการเปรียบเทียบน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ที่กำหนดให้โดยจะต้องปราศจากความโน้มเอียง ซึ่งนำมาสู่ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ วิธีการดำเนินการวิจัยครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 2 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 พื้นที่ศึกษา

ทางแยกถนนโครงการฯ ตัดกับทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 มีจุดเริ่มต้นที่ถนนวิวิธสุการ บรรจบกับถนนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 2034 ระยะทางประมาณ 7.5 กิโลเมตร ลักษณะทางกายภาพของทางแยกเป็นจุดตัดกันของทางหลวงหมายเลข 12 ซึ่งมีขนาด 4 ช่องจราจร ตัดกับถนนโครงการฯ ผิวจราจรเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 4 ช่องจราจรเช่นกัน โดยกำหนดให้มีการควบคุมการจราจรบริเวณทางแยกด้วยระบบสัญญาณไฟจราจรเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาและคาดการณ์ปริมาณการจราจรในอนาคต โครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมถนนสาย ง2 และ ง3 ผังเมืองรวมเมือง มุกดาหาร [3] ระบุว่าหลังจากบริการจะมีระดับการให้บริการอยู่ในระดับ D ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาการจราจรติดขัดพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 พื้นที่ศึกษา

4.2 การประยุกต์ใช้หลักการ AHP ในการตัดสินใจ

4.2.1 การจำแนกองค์ประกอบและโครงสร้างการตัดสินใจลำดับชั้น

องค์ประกอบการตัดสินใจหรือปัจจัยที่ใช้การคัดเลือกรูปแบบทางแยกด้วยวิธี AHP ในการศึกษาี้ ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจร ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดปัจจัยรองที่มีลักษณะเป็นอันดับ ซึ่งทำให้การให้

ค่าตัวคูณของปัจจัยขึ้นอยู่กับมุมมองของผู้ให้ค่าตัวคูณจนอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้อยู่ภายใต้ข้อคิด งานวิจัยนี้จึงกำหนดหลักปัจจัยรองด้านต่างๆ โดยพิจารณาจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาคทั้งหมด อย่างไรก็ตามเนื่องจากมูลค่าในการก่อสร้างนับเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการพิจารณาคัดเลือกรูปแบบทางแยกหรือโครงการ มูลค่าในการก่อสร้างจึงถูกนำมาพิจารณาดูเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่ใช้การคัดเลือกรูปแบบทางแยกจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาค

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง	คำอธิบาย	ค่าผลลัพธ์ที่ใช้จากแบบจำลอง PTV Vissim (หน่วย)
ด้านวิศวกรรมจราจร	ระยะเวลาในการเดินทางผ่านทางแยก (Travel Time)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่ใช้ในการขับขี่หรือเดินทางผ่านทางแยกตั้งแต่จุดเริ่มต้นถึงจุดสิ้นสุดเฉลี่ยทุกคู่ทิศทาง	Travel time [sec]
	ความล่าช้าบริเวณทางแยก (Delay)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงความคล่องตัว การชะลอตัวหรือความติดขัดบริเวณทางแยกเฉลี่ยทุกคู่ทิศทาง	Vehicle delay [sec/veh]
	ความยาวแถวคอย บริเวณทางแยก (Queue Length)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงระดับของความติดขัดของทางแยกจุดที่สะท้อนในแง่ของความยาวแถวคอย	Queue length [m.]

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่ใช้การคัดเลือกรูปแบบทางแยกจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาค(ต่อ)

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง	คำอธิบาย	ค่าผลลัพธ์ที่ใช้จากแบบจำลอง PTV Vissim (หน่วย)
ด้านเศรษฐศาสตร์	การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของยานพาหนะ	Fuel consumption [US liquid gallon]
	เวลาและปริมาณการเดินทางบนช่วงทาง (VHT)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงเวลาที่ใช้ในการเดินทางทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากยวดยานที่ขับขี่ในโครงข่าย	All Vehicle × All Travel time (veh-sec)
	งบประมาณในการก่อสร้าง	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงงบประมาณที่ใช้ในการดำเนินการทั้งหมดได้แก่ ค่าก่อสร้าง ค่าเวนคืน และค่าร้อยละสาธารณูปโภค (อ้างอิงจากโครงการก่อสร้างที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน)	-
ด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม	การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการขับขี่ในโครงข่าย	EmissionsCO [grams]
	การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขับขี่ในโครงข่าย	[grams/s]
	การปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงปริมาณการปลดปล่อยก๊าซจำพวกไนโตรเจนออกไซด์ จากการขับขี่ในโครงข่าย	EmissionsNOx [grams]
	การปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC)	เป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงปริมาณการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากการขับขี่ในโครงข่าย	EmissionsVOC [grams]

โดยค่าก่อสร้างจากตัวอย่างโครงการอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยรูปแบบทางแยกแบบสะพานข้ามทางแยก (Overpass) ใช้งบประมาณในการก่อสร้างประมาณ 320 ล้านบาท และรูปแบบทางแบบแบบทางลอด (Underpass) ใช้งบประมาณในการก่อสร้างประมาณ 700 ล้านบาท [15] ในขณะที่การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หน่วยเป็นกรัม/วินาที (grams/sec) คำนวณจากสมการอรรถประโยชน์ [16] ดังสมการที่ (8)–(10)

$$\ln (ER_{MC}) = -0.269 + 0.005u - 0.548a \quad (8)$$

$$\ln (ER_{Gasoline}) = -1.003 + 0.005u - 0.51a \quad (9)$$

$$\ln (ER_{Diesel}) = -0.269 + 0.028u - 0.193a \quad (10)$$

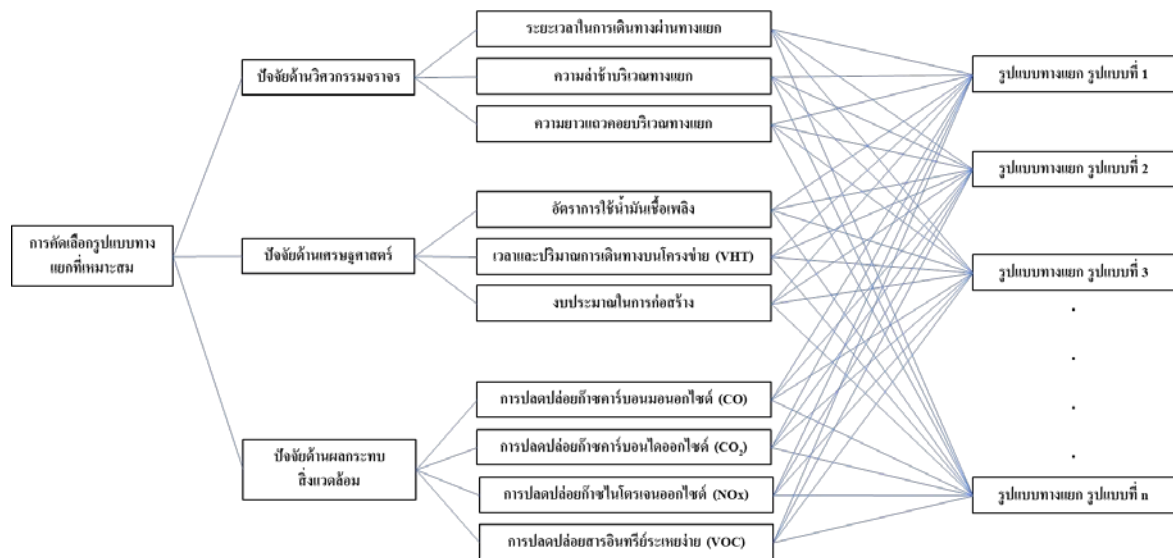
เมื่อ

ER = อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของยานพาหนะ (Emission Rate) (grams/sec)

u = ความเร็ว (km/hr)

a = อัตราเร่ง (m/s²)

จากปัจจัยที่ใช้การคัดเลือกรูปแบบทางแยกข้างต้น การศึกษาได้จำแนกองค์ประกอบต่างๆ ออกเป็นส่วนย่อยเป็น โครงสร้างการตัดสินใจ (Hierarchy Structure) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์กันขององค์ประกอบในการตัดสินใจแบบลำดับชั้นจากซ้ายไปขวา ตามแผนภูมิโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับชั้น แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภูมิโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับชั้น

4.2.2 การจัดลำดับความสำคัญ

การให้น้ำหนักความสำคัญในแต่ละองค์ประกอบ การตัดสินใจในแต่ละระดับชั้น โดยอาศัยการเปรียบเทียบ น้ำหนักความสำคัญในระดับชั้นเดียวกันเป็นคู่จากการ สัมภาษณ์ผู้ตัดสินใจหรือผู้เชี่ยวชาญแต่ละคน ข้อดีที่สำคัญ ประการหนึ่งของ AHP คือ ขนาดตัวอย่างหรือจำนวน ผู้เชี่ยวชาญที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องมีนัยสำคัญ ทางสถิติ โดยจำนวนผู้เชี่ยวชาญไม่ได้มีความสำคัญเท่ากับ คุณภาพของผู้เชี่ยวชาญ [17] Greenbaum (1993) and Melon et al. (2008) [18–19] ระบุว่าผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5-7 คน ถือว่าเชื่อถือได้ เนื่องจากการมีข้อมูลมากเกินไปทำให้การ จัดการข้อมูลยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายสูงเกินความจำเป็น

ในการศึกษาได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์ ผู้เชี่ยวชาญ ทั้งสิ้น จำนวน 15 ท่าน ซึ่งเป็นผู้ที่มีความรู้และ ประสบการณ์ครอบคลุมทุกมิติในการวิเคราะห์และ พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกรูปแบบทางแยก โดย กำหนดสัดส่วนของผู้เชี่ยวชาญให้มีความใกล้เคียงกัน แยก เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมจราจร จำนวน 5 คน ด้าน เศรษฐศาสตร์ จำนวน 5 คน และด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จำนวน 5 คน โดยการพิจารณาค่าคะแนนระดับความสำคัญ ของปัจจัยหลักสำหรับการเปรียบเทียบเป็นคู่เพื่อให้ค่า คะแนนน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการ คัดเลือกรูปแบบทางแยก ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคะแนนระดับความสำคัญของปัจจัยหลัก สำหรับการเปรียบเทียบเป็นคู่ [4]

ค่าคะแนน ความสำคัญ เปรียบเทียบ	ค่าจำกัด ความ	คำอธิบาย
1	สำคัญ เท่ากัน	ทั้งสองปัจจัยมีผลเท่ากัน
3	สำคัญกว่า ปานกลาง	ปัจจัยหนึ่งสำคัญมากกว่า ปัจจัยหนึ่งปานกลาง
5	สำคัญกว่า มาก	ปัจจัยหนึ่งสำคัญมากกว่า ปัจจัยหนึ่งมาก
7	สำคัญกว่า มากมาก	ปัจจัยหนึ่งสำคัญมากกว่า ปัจจัยหนึ่งมากมาก
9	สำคัญ สูงสุด	มีหลักฐานสนับสนุน ความพึงพอใจในปัจจัย หนึ่งสำคัญกว่าปัจจัยหนึ่ง มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
2, 4, 6, 8	เพื่อลดช่วง การ พิจารณา ให้มีความ เหมาะสม	เพื่อลดช่องว่างในการ วินิจฉัยเปรียบเทียบใน ลักษณะที่กำกวม และ ไม่ สามารถอธิบายด้วยคำพูด ที่เหมาะสม

4.2.3 การสังเคราะห์น้ำหนักความสำคัญ

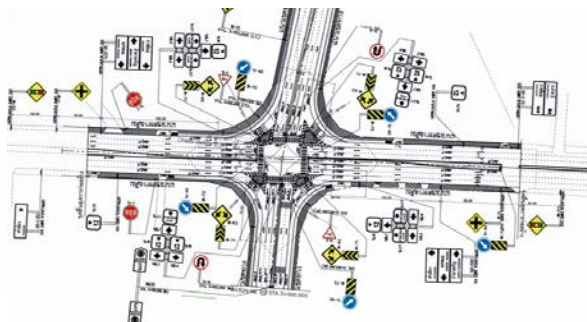
เมื่อได้ค่าน้ำหนักความสำคัญแต่ละปัจจัยรอง จะทำ ประยุกต์ใช้ “Principle of Hierarchy Composition” ในการ ประมวลผลการให้น้ำหนักความสำคัญแต่ละค่าของปัจจัย เป็นน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์รวม เพื่อนำไปพิจารณาหา รูปแบบทางเลือกที่ดีที่สุด โดยพิจารณาค่าคุณสมบัติหรือ ประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบทางเลือกจากผลลัพธ์ที่ได้ จากแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค ซึ่งจะกล่าวถึงใน หัวข้อถัดไป

4.3 พัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

4.3.1 การสำรวจและรวบรวมข้อมูล

1) ข้อมูลกายภาพทางแยก

การศึกษานี้ทำการรวบรวมลักษณะทางกายภาพบริเวณ ทางแยกจากแบบแปลนก่อสร้างในโครงการฯ (รูปที่ 5) เพื่อนำข้อมูลไปสร้างแบบจำลอง ในโปรแกรม PTV VISSIM เช่น ความกว้างช่องจราจร จำนวนช่องจราจร และ เกาะกลางถนน เป็นต้น



รูปที่ 5 แบบแปลนบริเวณทางแยกโครงการฯ [3]

2) ข้อมูลปริมาณจราจร

การศึกษานี้ทำการกำหนดปริมาณจราจรนำเข้า จากผล การศึกษาและคาดการณ์ปริมาณการจราจรในอนาคตของ ถนนโครงการฯ ในปี 20 โดยมีการปรับแก้ปริมาณจราจร ให้สอดคล้องกับสภาพการจราจรและการเติบโตของเมือง ในปัจจุบัน

3) ความเร็วเฉพาะจุด (Spot Speed)

ความเร็วเฉพาะจุด (Spot Speed) คือ ความเร็วขณะใด ขณะหนึ่งของรถที่วิ่งผ่าน ณ จุดใดจุดหนึ่งบนถนน โดยการ สำรวจข้อมูลแยกประเภทรถเป็น 3 ประเภท ได้แก่

รถจักรยานยนต์ (MC) รถยนต์ส่วนบุคคล (PC) และรถขนาดใหญ่ (HV) การสำรวจความเร็วเฉพาะจุดใช้ปืนจับความเร็ว (Radar Speed Gun) เพื่อใช้กำหนดเป็นความเร็วที่ต้องการ (Desired Speed) จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมควรเก็บข้อมูล อย่างน้อยจำนวน 50 คัน หรือโดยทั่วไปที่นิยม คือ จำนวน 100 คัน Choudhury [20] โดยการสำรวจข้อมูลควรดำเนินการ ในช่วงที่ไม่มีอิทธิพลของสภาพอากาศ อุบัติการณ์ และปัจจัย อื่นที่รบกวนการไหลของกระแสจราจร WSDT [21] ใน การศึกษาจะทำการสำรวจความเร็วเฉพาะจุด แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความเร็วในการไหลอิสระ (Free Flow Speed) และความเร็วในการเลี้ยว (Turning Speed)

4) ระยะหยุดนิ่งเฉลี่ย (Average standstill distance)

ในการปรับเทียบตัวแปรสำคัญในแบบจำลอง Following model กรณีที่เป็นทางแยกในเขตเมืองใน โปรแกรม VISSIM ขึ้นอยู่กับตัวแปรในแบบจำลอง Wiedemann 74 Model Parameters (แบบจำลองนี้ปรับปรุง จากแบบจำลอง Wiedemann's 1974 car following model) โดยมีตัวแปรสำคัญ คือ Average standstill distance หรือ ระยะหยุดนิ่งเฉลี่ย ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความอ่อนไหวและมี ผลทำให้แบบจำลองเกิดคลาดเคลื่อนได้ [22] การศึกษานี้จึง ได้ทำการสำรวจระยะหยุดนิ่งเฉลี่ย ซึ่งเป็นระยะห่าง ระหว่างรถสองคันโดยวัดจากกันชนหลังของรถคันหน้าถึง กันชนหน้าของรถคันหลัง Tony [23] การกำหนดหรือ ปรับเปลี่ยนค่า CC0 (Standstill Distance) มีสองทางเลือก คือ (1) การเก็บสำรวจข้อมูลในพื้นที่ศึกษาด้วยวิธีบันทึก วิดีโอในบริเวณที่การหยุดและเคลื่อนที่ของขบวน และ วัดค่าระยะห่างระหว่างขบวนที่หยุดสนิท อย่างน้อย 100 ตัวอย่าง Park and Schneeberger [24] ค่าเริ่มต้นของ Average Standstill Distance เท่ากับ 2.0 เมตร ช่วงที่ยอมรับ ได้คืออยู่ระหว่าง 1.0–3.0 เมตร ค่าที่น้อยหรือมากกว่านี้ถือว่า ไม่มีความสมเหตุสมผล โดยในการศึกษานี้ได้ผลการ สำรวจระยะหยุดนิ่งเฉลี่ย เท่ากับ 2.5 เมตร

4.3.2 การสร้างแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

การสร้างแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคมีขั้นตอน ที่สำคัญ เช่น การสร้างโครงข่ายถนนในแบบจำลองการ กำหนดความเร็ว การกำหนดชนิดของยานพาหนะ การ

นำเข้าปริมาณจราจร กำหนดเส้นทางวิ่งของยานพาหนะ การสร้างพื้นที่ลดความเร็ว การสร้างพื้นที่ระงับการตัดกันของยานพาหนะ การติดตั้งระบบสัญญาณไฟจราจร และการกำหนดค่าที่ต้องการเก็บผลลัพธ์ เป็นต้น

4.3.3 การเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นกระบวนการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรบางตัวในแบบจำลองการตรวจสอบความสอดคล้องของผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงที่สุด ซึ่งผลที่ได้ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในการศึกษานี้ได้ใช้ปริมาณจราจรเป็นตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งมีผลค่า GEH 0.11–1.12 และมีร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยร้อยละ 4.75 โดยแบบจำลองฐานที่ได้พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองฐานที่ได้ทำการเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องแล้ว

4.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

การศึกษานี้ได้ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคที่ได้ทำการเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องแล้วในการสร้างรูปแบบทางแยก โดยได้นำเสนอรูปแบบทางแยกทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังนี้

4.4.1 รูปแบบที่ 1 ทางลอดทางแยก (Underpass) ตามแนวถนนทางหลวงหมายเลข 12

เป็นรูปแบบทางแยกต่างระดับแบบทางลอดทางแยกตามแนวถนนทางหลวงหมายเลข 12 ขนาด 4 ช่องจราจร (รูปที่ 7) รูปแบบนี้สามารถก่อสร้างได้โดยไม่ต้องมีการ

เวนคืนเพิ่มเติม และยังไม่บังคับทัศนียภาพ แต่อาจส่งผลกระทบต่อการจราจรระหว่างก่อสร้าง การบำรุงรักษาค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง



รูปที่ 7 รูปแบบที่ 1 ทางลอดตามแนว ทล.12

4.4.2 รูปแบบที่ 2 สะพานข้ามทางแยก (Overpass) ตามแนวทางหลวงหมายเลข 12

เป็นรูปแบบทางแยกต่างระดับแบบสะพานข้ามทางแยก ก่อสร้างในแนวทางหลวงหมายเลข 12 ขยะดับข้ามบริเวณทางแยก ขนาด 4 ช่องจราจร (รูปที่ 8) รูปแบบนี้ไม่จำเป็นต้องเวนคืนที่ดินเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 นอกจากนี้ยังง่ายต่อการบำรุงรักษาในอนาคต ข้อเสียของรูปแบบนี้คือลักษณะทางกายภาพของสะพานข้ามแยกที่มีความสูงเสียด้านสะพานทำให้บังคับทัศนียภาพ



รูปที่ 8 รูปแบบที่ 2 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทล.12

4.4.3 รูปแบบที่ 3 ทางลอดทางแยก (Underpass) ตามแนวถนนทางหลวงชนบท มท.4040

เป็นรูปแบบทางแยกต่างระดับแบบทางลอดทางแยกตามแนวถนนทางหลวงชนบท มท.4040 ขนาด 4 ช่องจราจร (รูปที่ 9) รูปแบบนี้มีผลกระทบ ค่าก่อสร้าง และการบำรุงรักษาเช่นเดียวกันกับรูปแบบที่ 1 ซึ่งจะแตกต่างในด้านของทิศทางในการรองรับปริมาณจราจรและให้บริการ

สัญญาณ เปลี่ยนมาเป็นตามแนวถนนทางหลวงชนบท มห.
4040



รูปที่ 9 รูปแบบที่ 3 ทางลอดตามแนวทางหลวงชนบท มห.
4040

4.4.4 รูปแบบที่ 4 สะพานข้ามทางแยก (Overpass) ตามแนวทางหลวงชนบท มห.4040

เป็นรูปแบบทางแยกต่างระดับแบบสะพานข้ามทาง
แยก ก่อสร้างในแนวทางหลวงชนบท มห.4040 ขยกระดับ
ข้ามบริเวณทางแยก ขนาด 4 ช่องจราจร (รูปที่ 10) รูปแบบ
นี้มีผลกระทบ ค่าก่อสร้าง และการบำรุงรักษาเช่นเดียวกัน
กับรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะแตกต่างในด้านของทิศทางการ
รองรับปริมาณจราจรและให้บริการสัญญาณ เปลี่ยนมาเป็น
ตามแนวถนนทางหลวงชนบท มห.4040



รูปที่ 10 รูปแบบที่ 4 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทาง
หลวงชนบท มห.4040

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญตามวิธี AHP

หลังจากทำการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 15 คน ที่ให้ค่า
น้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยตามวิธี AHP และได้ทำ
การตรวจสอบความสอดคล้องด้วยอัตราส่วนความสอดคล้อง
(Consistency Ratio, C.R.) ซึ่งต้องมีค่า C.R. น้อยกว่า 0.10 และ
สอดคล้องของข้อมูลแบบกลุ่มด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเรขาคณิตที่มี
อัตราส่วนความสอดคล้องของกลุ่มมีค่า G.C.R. (Group
Consistency Ratio) น้อยกว่า 0.10 เช่นกัน ก่อนนำไปสู่การ
คำนวณหาค่าคะแนนในกระบวนการคัดเลือกรูปแบบทางแยก
ต่อไป โดยการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักและ
ปัจจัยรอง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 น้ำหนักความสำคัญของตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้ในการพิจารณาคัดเลือกรูปแบบทางแยก

ปัจจัยหลัก	ค่าน้ำหนัก ปัจจัยหลัก(1)	ปัจจัยรอง	ค่า น้ำหนัก ปัจจัยรอง (2)	ค่าน้ำหนัก (1) × (2)
ด้านวิศวกรรมจราจร	0.5327	ระยะเวลาในการเดินทางผ่านทางแยก	0.3184	0.1696
		ความล่าช้าบริเวณทางแยก	0.4277	0.2278
		ความยาวแถวคอย บริเวณทางแยก	0.2539	0.1353
ด้านเศรษฐศาสตร์	0.2191	การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง	0.2303	0.0505
		เวลาและปริมาณการเดินทางบนช่วงทาง (VHT)	0.2735	0.0599
		งบประมาณในการก่อสร้าง	0.4962	0.1087
ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	0.2482	การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.3244	0.0805
		การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	0.1893	0.0470
		การปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x)	0.2726	0.0677
		การปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC)	0.2137	0.0530
รวม	1.0000	รวม		1.0000

5.1.1 ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญปัจจัยหลัก

ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญปัจจัยหลัก พบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักด้านวิศวกรรมสูงสุดเท่ากับ 0.5327 (53.27%) รองลงมาคือ ปัจจัยหลักด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากับ 0.2482 (24.82%) และปัจจัยหลักด้านเศรษฐศาสตร์ มีค่าน้ำหนักต่ำสุด เท่ากับ 0.2191 (21.91%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญของปัจจัยทางด้านวิศวกรรมเป็นลำดับแรกในการพิจารณาคัดเลือกรูปแบบทางแยก

5.1.2 ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจร

สำหรับการพิจารณาให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านวิศวกรรมจราจร พบว่า ความล่าช้าบริเวณทางแยก มีค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากับ 0.2278 (22.78%) รองลงมาคือ ระยะเวลาในการเดินทางผ่านทางแยก และความยาวแถวคอยบริเวณทางแยก โดยมีค่าคะแนนความสำคัญ เท่ากับ 0.1696 (16.96%) และ 0.1353 (13.53%) ตามลำดับ

5.1.3 ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์

ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของงบประมาณในการก่อสร้าง มีค่าเท่ากับ 0.1087 ซึ่งมีค่าสูงกว่าปัจจัยอื่นๆ อย่างมาก ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าน้ำหนักความสำคัญใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 0.0505–0.0599

5.1.4 ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญปัจจัยด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ผลการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม พบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยด้านการปลดปล่อยก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงสุด เท่ากับ 0.0805 รองลงมา เป็นปัจจัยด้านการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) มีค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากับ 0.0677 โดยการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีค่าน้ำหนักความสำคัญเป็นลำดับต่ำสุด เท่ากับ 0.0470

5.2 ผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพจากแบบจำลอง

ในหัวข้อนี้ ได้นำค่าผลลัพธ์ที่ใช้จากแบบจำลอง PTV VISSIM ของปัจจัยรองต่างๆ มาวิเคราะห์ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์แบบลำดับชั้น (AHP) โดยมีค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพจากการประมวลผลในแบบจำลองสรุปได้ดังนี้

5.2.1 ผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจร

ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจรจากการประมวลผลในแบบจำลอง พบว่า รูปแบบทางเลือกที่ 2 เป็นทางเลือกที่มีค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด โดยมีค่าระยะเวลาในการเดินทางผ่านทางแยก และความล่าช้าบริเวณทางแยกต่ำกว่า รูปแบบทางเลือกอื่น แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากความยาวแถวคอยบริเวณทางแยก รูปแบบทางเลือกที่ 2 ยังเป็นรองรูปแบบทางเลือกที่ 3 และ 4 เล็กน้อย

ทั้งนี้ด้วยลักษณะทางกายภาพของทางหลวงชนบท มท. 4040 ซึ่งมีจำนวนช่องจราจรที่เข้าสู่ทางแยกที่น้อยกว่า ทล.12 เมื่อไม่มีทางต่างระดับตามแนวทางหลวงชนบท มท.4040 จึงทำให้ความยาวแถวคอยโดยภาพรวมสูงกว่ารูปแบบทางเลือกที่ 3 และ 4 อย่างไรก็ตามการมีทางต่างระดับตามแนว ทล.12 ของรูปแบบทางเลือกที่ 1 และ 2 จะทำให้ความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรและการลดการชะลอตัวของของขบวนโดยรวมน่าได้ดีกว่า โดยทุกรูปแบบทางเลือกมีค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจรที่ดีกว่าสภาพปัจจุบันอย่างมาก ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจรจากการประมวลผลในแบบจำลอง

รูปแบบทางเลือก	Travel time [sec]	Vehicle delay [sec/veh]	Queue length [m.]
สภาพปัจจุบัน ติดตั้งสัญญาณไฟจราจร	190.08	58.96	65.41
รูปแบบทางเลือกที่ 1 ทางลอดตามแนว ทล.12	169.45	38.54	50.82
รูปแบบทางเลือกที่ 2 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทล.12	167.98	36.97	49.92

ตารางที่ 5 ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจรจากการประมวลผลในแบบจำลอง(ต่อ)

รูปแบบทางเลือก	Travel time [sec]	Vehicle delay [sec/veh]	Queue length [m.]
รูปแบบทางเลือกที่ 3 ทางลอดตามแนว ทางหลวงชนบท มท.4040	173.60	42.50	45.64
รูปแบบทางเลือกที่ 4 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทางหลวงชนบท มท.4040	173.10	42.04	44.62

5.2.2 ผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านเศรษฐกิจ

ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัด ประสิทธิภาพปัจจัยด้านเศรษฐกิจจากการประมวลผลในแบบจำลอง พบว่า รูปแบบทางเลือกที่ 3-4 เป็นทางเลือกที่มีค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีที่สุดใกล้เคียงกัน แต่หากพิจารณา

จากค่า VHT รูปแบบทางเลือกที่ 2 มีค่าต่ำที่สุด โดยทุก รูปแบบทางเลือกมีค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านเศรษฐกิจที่ดีกว่าสภาพปัจจุบัน ประมาณร้อยละ 8.5-12.6 สำหรับการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และร้อยละ 10.3-15.3 สำหรับค่า VHT ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านเศรษฐกิจจากการประมวลผลในแบบจำลอง

รูปแบบทางแยก	Fuel consumption [US liquid gallon]	VHT = All Vehicle × All Travel time [veh-sec]
สภาพปัจจุบัน	120.66	50972.35
รูปแบบทางเลือกที่ 1	110.44	45745.59
รูปแบบทางเลือกที่ 2	110.04	45327.49
รูปแบบทางเลือกที่ 3	105.72	46053.12
รูปแบบทางเลือกที่ 4	105.41	45925.49

5.2.3 ผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการประมวลผลในแบบจำลอง พบว่า รูปแบบทางเลือกที่ 4 เป็นทางเลือกที่มีค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพดีที่สุดในทุกตัวชี้วัดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบทางเลือกอื่น โดยมีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

(CO₂) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) ต่ำสุด ทั้งนี้ทุกรูปแบบทางเลือกมีค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ดีกว่าสภาพปัจจุบัน ประมาณร้อยละ 8.4-12.5 สำหรับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) และร้อยละ 5.4-9.3 สำหรับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการประมวลผลในแบบจำลอง

รูปแบบทางแยก	Emissions CO [grams]	Emissions CO ₂ [grams/sec]	Emissions NO _x [grams]	Emissions VOC [grams]
สภาพปัจจุบัน	8433.97	3133.66	1640.94	1954.65
รูปแบบทางเลือกที่ 1	7719.43	2964.89	1501.92	1789.05
รูปแบบทางเลือกที่ 2	7691.53	2933.36	1496.49	1782.59

ตารางที่ 7 ค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพปัจจัยด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการประมวลผลในแบบจำลอง(ต่อ)

รูปแบบทางแยก	EmissionsCO [grams]	Emissions CO2 [grams/sec]	Emissions NOx [grams]	Emissions VOC [grams]
รูปแบบทางเลือกที่ 3	7389.54	2860.14	1437.74	1712.60
รูปแบบทางเลือกที่ 4	7368.35	2841.61	1433.61	1707.69

5.3 ผลการให้ค่าตัวคูณและค่าคะแนน และการจัดลำดับ

ความสำคัญตามวิธีวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

สำหรับการระบุค่าตัวคูณใช้วิธีสัดส่วนของสมการเชิงเส้น (Linear Equation) ซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของรูปแบบทางแยกที่ดีที่สุด (ค่าต่ำที่สุด) ให้มีค่าตัวคูณเท่ากับ 1.00 ส่วนรูปแบบทางเลือกอื่นๆ จะมีค่าตัวคูณตามสัดส่วน

ผลจากการพิจารณาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยโดยผู้เชี่ยวชาญ จะถูกนำมาคูณกับค่าตัวคูณแต่ละปัจจัยซึ่ง

ได้จากวิธีการวิเคราะห์ข้างต้น และสรุปเป็นค่าคะแนนของแต่ละทางเลือก พบว่า รูปแบบทางเลือกที่มีค่าคะแนนสูงสุด คือ รูปแบบที่ 2 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทล.12 มีคะแนนเท่ากับ 0.9736 (97.36%) รองลงมาคือ รูปแบบที่ 4 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทางหลวงชนบท มห.4040 รูปแบบที่ 3 ทางลอดตามแนว ทางหลวงชนบท มห.4040 และรูปแบบที่ 1 ทางลอดตามแนว ทล.12 โดยมีคะแนนเท่ากับ 0.9670, 0.9012 และ 0.9003 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการให้คะแนนและจัดลำดับความสำคัญรูปแบบทางแยกที่เหมาะสม

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง	ค่าคะแนนรูปแบบทางเลือก			
		1	2	3	4
วิศวกรรมจราจร	ระยะเวลาในการเดินทางผ่านทางแยก	0.1682	0.1696	0.1641	0.1646
	ความล่าช้าบริเวณทางแยก	0.2194	0.2278	0.1982	0.2006
	ความยาวแถวคอย บริเวณทางแยก	0.1185	0.1209	0.1325	0.1352
เศรษฐศาสตร์	การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง	0.0482	0.0483	0.0503	0.0505
	เวลาและปริมาณการเดินทางบนช่วงทาง (VHT)	0.0594	0.0599	0.0590	0.0591
	งบประมาณในการก่อสร้าง	0.0497	0.1087	0.0497	0.1087
ผลกระทบสิ่งแวดล้อม	การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)	0.0768	0.0771	0.0803	0.0805
	การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	0.0450	0.0455	0.0467	0.0470
	การปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx)	0.0646	0.0648	0.0675	0.0676
	การปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC)	0.0506	0.0508	0.0529	0.0530
รวม		0.9003	0.9736	0.9012	0.9670

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

การเติบโตทางเศรษฐกิจส่งผลให้ความต้องการในการเดินทางและปริมาณการใช้รถใช้ถนนในเขตเมืองเพิ่มสูงขึ้น โครงการก่อสร้างโครงข่ายถนนเพื่อรองรับการขยายตัวของชุมชนและการเติบโตของตัวเมืองจึงมีจำนวนมากขึ้นอย่าง

ต่อเนื่องเช่นกัน จึงอาจมีความจำเป็นที่จะต้องทำการพิจารณาหรือกำหนดรูปแบบในการปรับปรุงทางแยกให้มีความเหมาะสมเพื่อรองรับปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตไปพร้อมกัน

การวิเคราะห์และคัดเลือกรูปแบบทางแยกในปัจจุบัน จะทำการตัดสินใจโดยพิจารณาจากรูปแบบทางเลือกที่มีค่า

คะแนนสูงสุดด้วยวิธีการ MCDA (เช่น Multi Criteria Analysis, MCA และ AHP เป็นต้น) ซึ่งใช้ปัจจัยต่างๆ ร่วมในการให้คะแนน อย่างไรก็ตามปัจจัยบางปัจจัยอาจถูกกำหนดให้เป็นรูปแบบเชิงคุณภาพ ยุ่งยากในการสำรวจและรวบรวมข้อมูล หรือมีความซับซ้อนในประเมินหรือการคำนวณค่าได้

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์คัดเลือกรูปแบบทางแยกที่เหมาะสมมากที่สุด บริเวณจุดตัดโครงการก่อสร้างทางหลวงชนบท มห.4040 ตัดกับทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร ด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพจากแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคร่วมกับ AHP ซึ่งจะสามารถลดทอนความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์และการรวบรวมข้อมูล ตลอดจนสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจต่อไป

ผลจากการศึกษา พบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักด้านวิศวกรรมจราจรสูงที่สุด (0.5327 หรือ 53.27%) ซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกับหลายการศึกษาที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบทางแยกที่เหมาะสม [25–27] รองลงมาคือด้านสิ่งแวดล้อม (0.2482 หรือ 24.82%) และด้านเศรษฐศาสตร์ (0.2191 หรือ 21.91%) ตามลำดับ สำหรับปัจจัยรองในด้านวิศวกรรมจราจรซึ่งเป็นปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญสูงสุด คือ ความล่าช้าบริเวณทางแยก ซึ่งมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.2278 หรือ 22.78% ทั้งนี้เนื่องจากผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นว่าความล่าช้าบริเวณทางแยกเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพสำคัญที่แสดงถึงความคล่องตัวในการสัญจรผ่านทางแยกที่ควรคำนึงถึงเป็นลำดับแรกในการคัดเลือกรูปแบบทางแยก

เมื่อพิจารณาผลการให้คะแนนและจัดลำดับความสำคัญรูปแบบทางแยกที่เหมาะสม สรุปได้ว่า รูปแบบทางเลือกที่ 2 สะพานข้ามทางแยกตามแนว ทล.12 เป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมสูงสุดสำหรับเป็นรูปแบบเสนอแนะในลำดับแรก ซึ่งได้ค่าคะแนน เท่ากับ 0.9736 หรือ 97.36%

โดยรูปแบบทางเลือกที่ 2 มีความโดดเด่นอย่างมากในปัจจัยด้านวิศวกรรมจราจร (เวลาในการเดินทาง และความล่าช้า) โดยมีค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ดีที่สุดใกล้เคียงกับ

รูปแบบทางเลือกที่ 1 ซึ่งสะท้อนถึงความคล่องตัวและประสิทธิภาพในการให้บริการการจราจร รวมทั้งมีราคาก่อสร้างที่ต่ำกว่ารูปแบบทางเลือกที่ 1 และรูปแบบทางเลือกที่ 3 อย่างไรก็ตามรูปแบบทางเลือกที่ 2 มีข้อด้อยด้านการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และปัจจัยรองด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นรองรูปแบบทางเลือกที่ 3 และรูปแบบทางเลือกที่ 4 เล็กน้อย

เนื่องจากงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะเกณฑ์การตัดสินใจที่สามารถประมวลผลได้จากจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาคเท่านั้น ในการวิจัยในอนาคตอาจมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยรองให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีการอื่นๆ และอาจใช้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ใช้รถใช้ถนนในพื้นที่ เพื่อให้การออกแบบสอดคล้องกับความต้องการและวิสัยทัศน์ของพื้นที่ไปพร้อมกันด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Transport data and statistics– Office of Mukdahan land transport*, Jun 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.dlt.go.th/site/mukdahan/m-news/11533/view.php?did=34250> (accessed Jun. 20, 2022).
- [2] *Average annual daily traffic (AADT) – Open Government Data of Thailand*, Jun 20, 2022. [Online]. Available: <https://data.go.th/dataset/aadt64>
- [3] Department of Rural Road (DRR). “Report on survey results and analyze data for forecasting traffic volumes, Survey Detailed Design and Environmental Impact Assessment (IEE) for the road construction of the principle city plan, Route NG.2 and NG.3 Road, Mukdahan principle city plan”, DRR. , Bangkok, Thailand. 2009,
- [4] T. L. Saaty, “The analytic hierarchy process,” in *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York, NY, USA: McGraw-Hill International Book Co., 1980, ch. 1, sec. 1, pp. 3–34.

- [5] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 83–98, 2008, doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- [6] K. Wunderlich, M. Vasudevan and P. Wang, "TAT Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software 2019 Update to the 2004 Version," U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, Rep. FHWA-HOP-18-036, 2019.
- [7] W. Burghout, H. Koutsopoulos, and I. Andréasson, "Hybrid Mesoscopic- Microscopic Traffic Simulation," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1934, no. 1, pp. 218–255, 2005, doi: 10.3141/1934-23.
- [8] The Institution of Highways & Transportation, "Traffic microsimulation modeling," *Network Management Notes*, pp. 1–4, 2006. [Online]. Available: https://www.ciht.org.uk/media/4365/traffic_microsimulation_modelling.pdf
- [9] T. Kojima, A. Fukuda, T. Ishizaka and P. Luatthep, "Study on the Evaluation of the Roundabout Utilizing Micro Traffic Simulation Model" in *7th ATRANS Symposium: Young Researcher's Forum*, Bangkok, Thailand, Aug. 22, 2014, pp. 242–247.
- [10] P. Warasak, S. Thanet, S. Wichuda and D. Atthaphon, "Analysis of traffic management for motorcycles at traffic signal junctions," in *proceeding the 18th National Civil Engineering Conference*, Chiang Mai, Thailand, May 8–10, 2013, pp. TRP 236–TRP 242.
- [11] Y. Chaiwat and L. Paramet, "An Analysis of Traffic Management of Multiple Consecutive Intersections: A Case Study of Hat Yai Municipality," *Journal of Engineering and Innovation*, vol. 8, no. 1, pp. 103–114, 2015.
- [12] R. Chayada and K. Noppadol, "Energy and Environmental Assessment for Intersection Design Control in University Campus," in *proceeding the 25th National Civil Engineering Conference*, Chonburi, Thailand, Jul. 15–17, 2020, pp. ENV051–ENV059.
- [13] K. Wanwisa and P. Jumrus, "Traffic Operational Analysis of Continuous Flow Urban Interchange Using Micro Simulation Modeling Technique : A CaseStudy of Dat Daruni School, Chachoengsao," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 35, no. 1, pp. 23–32, 2018.
- [14] W. Muanmas, H. Phongtorn and S. Sittiwat, "Recommendation for improvement of traffic circulation during Kaset fair," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 72–77, 2016.
- [15] Department of Rural Road (DRR). Survey project designed to solve traffic problems at the intersection on CR.5023, Rob Wiang Subdistrict, Mueang District, Chiang Rai Province.", DRR. BKK, Thailand. 2019,
- [16] P. Thanapol, S. Thaned and S. Wichuda, "Vehicle actuated signal control for low carbon society," *International Journal of GEOMATE*, vol. 16, no. 55, pp. 56–91, 2019, doi: 10.21660/2019.55.4766.
- [17] J. A. Gómez Romero, R. Soto Flores and S. Garduño Román, "Determination of the Weightings of Hydroelectric Sustainability Criteria by Combining AHP and GP Extended Methods," *Ingeniería*, vol. 24, no. 2, pp. 116–142, 2019, doi: 10.14483/23448393.14469.
- [18] J. Greenbaum, "A design of one's own: Towards participatory design in the United States" . in *Participatory Design*, D. Schuler and A. Namioka Eds., Hillsdale, NJ, USA: Lawrence Erlbaum, 1993, ch. 3, pp. 27–37.

- [19] M. G. Melón, P. A. Beltran and M. C. G. Cruz, “An AHP- based evaluation procedure for Innovative Educational Projects: A face-to-face vs. computer-mediated case study,” *Omega*, vol. 36, no. 5, pp. 754–765, 2008, doi: 10.1016/j.omega.2006.01.005.
- [20] Ewing R, “Traffic Calming: State of the practice,” Institute of Transportation Engineering, Washington D. C., USA, 1999.
- [21] *Protocol for Vissim Simulation*, Washington State Department of Transportation, Olympia, WA, USA, 2014, pp. 13–21.
- [22] *VISSIM 6 User manual*, PTV AG. , Karlsruhe, Germany, 2014.
- [23] W. Tony, “Calibrating Freeway Simulation Models In Vissim,” M. S. Thesis, Dept. Civil Engineering, Washington Univ., Seattle, WA, USA, 2006.
- [24] B. (Brian) Park and J. D. Schneeberger, “Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1856, no. 1, pp. 185–192, 2003, doi: 10.3141/1856-20.
- [25] S. Somkane, “Factor Priority Analysis used in considering the improvement of the Department of Highways for the improvement of the junction by hierarchical analysis process,” M.E. Thesis, Dept. Engineering and Construction Management, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2005.
- [26] S. Nantawan, V. Chavalek and K. Aswin, “Evaluation of appropriate configurations for urban- grade separation intersections, a case study : Khae Rai intersection-highway 302 (Rattathibet Road) and highway 306 (Tivanon Road) ,” *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 22, no. 70, pp. 57–69, 2010.
- [27] M. Worawit and T. Kittichai, “A Study of Appropriate Configurations for Rural Service Interchange A Case Study of Highway No. 35 (Rama II Road) and Rural Road 2055 Interchange,” *Technical Education Journal King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 12, no. 3, pp. 34–46, 2021.

ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยเมชเปลี่ยนรูปร่างในการวิเคราะห์ของไหลผ่านวัตถุ สัณฐานรูปทรงกระบอกขณะหมุนที่เลขเรย์โนลด์สูง

The Finite Element with Near-Wall Deformation Mesh Method in the Prediction of Flow Past a Rotating Isolated Cylinder at High Reynolds Number

สิทธิชัย รัชชชโยธิน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช บางพุด ปากเกร็ด นนทบุรี 11120

Sitthichai Ruchayosyothin

School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University, Bangpood, Pakkret, Nonthaburi,
11120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: sitthichai.ruc@stou.ac.th

Received: Jun 02, 2022; Revised: Sep 07, 2022; Accepted: Sep 08, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงคำนวณนี้นำเสนอพฤติกรรมการไหลภายนอกแบบปั่นป่วนผ่านวัตถุสัณฐานรูปทรงกระบอกที่หมุนในระบบแกน 3 มิติ ของเลขเรย์โนลด์ที่ 100,000 ถึงอัตราหมุนไร้หน่วยที่ 2 วัตถุสัณฐานรูปทรงกระบอกนี้มีลักษณะผนังเรียบและเจาะร่อง อีกทั้งทรงกระบอกประกอบด้วยดิสก์ที่ปลายทั้งสอง โดยใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนชนิด high Re $k-\epsilon$ ซึ่งปริมาณความเค้นเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเครียดเฉื่อยของชั้นการไหลทำให้เกิดการแยกตัวกัน พฤติกรรมนี้มีผลต่อการเกิดกระแสวนขึ้น รวมถึงใช้สมการมาตรฐานของความเร็วเป็นไปตามกฎลอการิทึมที่บริเวณชั้นย่อยเนื่องการไหลปั่นป่วนที่ผนัง ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้กำหนดเพื่อทำการดิสกรีไทซ์ตัวแปรการไหลในสนามการคำนวณและรูปร่างเมชมีการเปลี่ยนรูปที่ผนังเจาะร่องตามช่วงเวลาและปรับความสมดุลการไหลต่อเนื่องสำหรับเมชที่ใกล้ผนังทรงกระบอกผลการคำนวณได้ยืนยันความถูกต้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ทำให้ได้ข้อมูลระดับความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการคำนวณและแนวโน้มของแรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นนอกเหนือช่วงการทดลองของแต่ละวัตถุสัณฐานรูปทรงกระบอก โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้อธิบายผลจากลักษณะการกระจายตัวของขอบเขตชั้นของการไหลรอบผนัง อีกทั้งลักษณะสนามการไหลของฟลักซ์ที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: ไฟไนต์อีลิเมนต์ของไหลพลศาสตร์, ทรงกระบอกเจาะร่องและปลายดิสก์ที่หมุน, แบบจำลองการไหลปั่นป่วน

Abstract

The computational study has presented the 3D convective turbulent flow past a rotating isolated cylinder at a Reynolds number of 100,000, for spin ratios growing up to 2. The rotating cylinders have plain and grooved surfaces, moreover, the combination with end discs has been purposed in the investigation. The high Re $k-\epsilon$ turbulent approach, including the linear approximated form of the viscosity equation, in which the Reynolds stresses correspond to mean strain tensors, to determine the different turbulent scales separating from the free flow. Also, the standard “log-law” near-wall function has been suggested for the strategies of resource effectiveness to capture the fully turbulent region of the inner boundary layer. The

finite element method has been provided to discretize unknown fluxes along with the computational domain. The deformation mesh has facilitated the interactive flow with the arc grooves and balanced the continuity flow in each computational element closing to the rotating walls. These predictions have been validated with available experimental work to strengthen the competence of the turbulent approach. Also, the prediction has expanded to the higher spin ratios from those earlier data, the trend is beneficial for further implementation and design work. These findings have clearly indicated that the cylinder surfaces and combination parts have significantly influenced the aerodynamic force and turbulent behavior with the spin ratios due to the distribution pattern of the boundary layer and flow domain, which has been the most considerable discrepancy in each of these tests.

Keywords: Finite Element Method of Fluid Dynamic, Rotating Grooved and Cylinder with End Discs, Turbulent Model

1. บทนำ

การขับเคลื่อนของวัตถุที่หมุนภายใต้การไหลผ่านของของไหลก่อให้เกิดการขับเคลื่อนจากแรงกระทำอากาศพลศาสตร์อันเป็นไปตามปรากฏการณ์แมกนัส [1] จากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนอากาศยานที่มีผนังโค้งและเคลื่อนที่แบบหมุนได้ โดยเฉพาะชิ้นส่วนรูปทรงกระบอกที่สามารถนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนเพื่อก่อกำเนิดแรงขับซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของแรงยกและแรงต้านส่วนใหญ่ ทำให้สามารถเคลื่อนตัวในมหาสมุทรได้ สำหรับเรือเดินสมุทร Flettner Rotor Ship รุ่น E-Ship I ในขณะที่ความเร็วในการเดินเรืออยู่ที่ 110 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อแล่นในทิศทางลมปรากฏที่มีความเหมาะสมจะสามารถลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิลได้ถึงร้อยละ 46 [2] หรือมีการใช้ชิ้นส่วนประกอบจากทรงกระบอกกับชิ้นส่วนดิสก์ที่ปลายเพื่อก่อให้เกิดแรงยกสำหรับอากาศยานขนาดเล็กไร้คนขับ (Unman Micro Air Vehicle) มีการติดตั้งปีกเครื่องบินทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร ทำให้สามารถขับเคลื่อนเกิดสัดส่วนแรงยกเทียบกับแรงต้านเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า [3] สำหรับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นถือว่าเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานอย่างมาก นอกจากวัตถุประสงค์การออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานแล้ว ยังได้มาซึ่งองค์ความรู้ของการควบคุมการไหลแบบแอคทีฟเพื่อให้ได้มาซึ่งการควบคุมการกระแสน้ำไหลที่เลขเรย์โนลด์ที่สูงซึ่งลักษณะขอบเขตชั้นของไหล (Boundary Layer) ที่ผนังและกระแสน้ำมีลักษณะ

ไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบหรืออยู่ในช่วงการไหลได้เลขเรย์โนลด์วิกฤติ (Sub-critical Reynolds Number) [4] จากสถานะการไหลที่มีความซับซ้อนนี้ทำให้เกิดข้อจำกัดในการดำเนินการวิจัยจากวิธีการทดลองหรือการคำนวณเชิงตัวเลขจากสมการการไหลทั่วไปอย่างมาก นักวิจัยจึงได้ให้ความสำคัญและดำเนินการพัฒนาระบบการและวิธีการทดลองหรือการพยากรณ์ปรากฏการณ์จากการวิเคราะห์เชิงคำนวณจากตัวแบบการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมและใช้ต่อยอดในการออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์การทำงานจากพื้นฐานวัตถุรูปทรงกระบอกหรือรูปทรงฐานทรงกระบอกที่สำคัญที่เลขเรย์โนลด์ที่สูง

งานวิจัยที่สำคัญที่มีความเกี่ยวข้องกับการพาการไหลซึ่งมีการถ่ายเทโมเมนตัม (Convective flow) เมื่อผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกหรือวัตถุฐานทรงกระบอกอื่นที่หมุนนั้น เช่น การทดลองในอดีตเพื่อพิจารณาแรงของไหลพลศาสตร์เนื่องจากการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม กากบาท และ ทรงประกอบทรงกระบอกกับแพนอากาศ ผันราบเรียบ ของ Reid (1924) [5] ที่เลขเรย์โนลด์ (Re , อัตราส่วนระหว่างแรงเนื่องจากโมเมนตัมการไหลเทียบกับแรงจากความหนืด, $\frac{\rho U_\infty D}{\mu}$) ระหว่าง 36,000–108,000 โดยมีการแปรเปลี่ยนอัตราการหมุนไร้หน่วย (α , Spin ratio: $\omega D/2$) ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสที่ผนังกับความเร็วการไหลอิสระ (U_∞) สูงสุดที่ 3.6 หรือการทดลองของ Thom (1925) [6] ที่มีการศึกษาผลของความหยาบของผนังจากการพันดัดเม็ดทราย ที่สถานะไร

หน่วยสูงสุดของเลขเรย์โนลด์ที่ 33,325 และอัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 5.5 หรือการทดลองการของ Clayton (1985) [7] ที่มีการประกอบคิส์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนที่แตกต่างกันเข้ากับทรงกระบอก ที่เลขเรย์โนลด์สูงสุด 48,941 และอัตราการหมุนไร้หน่วย ที่ 3.2 ซึ่งการทดลองทั้งหมดนี้ได้ข้อมูลผลลัพธ์ที่สำคัญส่งผลในปัจจุบันได้อาศัยข้อมูลเบื้องต้นนี้สู่การประยุกต์ใช้งานจริงและขยายผลงานวิจัยสู่เลขเรย์โนลด์ที่สูงกว่ามาก การทดลองของ Aoki & Ito (2001) [8] ได้ทำการศึกษาสนามการไหลผ่านทรงกระบอกผนังเรียบที่อัตราการหมุนไร้หน่วย 1 ที่เลขเรย์โนลด์ 140,000 หรือ Takayama & Aoki (2005) [9] ได้ศึกษาผลของแรงอากาศพลศาสตร์ผ่านวัตถุสี่เหลี่ยมทรงกระบอกผนังเรียบที่มีความลึกแตกต่างกัน ที่อัตราการหมุนไร้หน่วย 1 และที่เลขเรย์โนลด์สูงสุดที่ 180,000 อีกทั้งการสร้างรูปทรงประกอบระหว่างทรงกระบอกที่หมุนกับแผ่นอากาศของ Badalamenti, (2010) [3] ที่ทำการทดลองที่สภาวะการหมุนไร้หน่วยสูงสุด 2 ที่เลขเรย์โนลด์ 241,000 เพื่อให้ได้มาซึ่งการวัดผลแรงพลศาสตร์เช่นกัน

ข้อจำกัดของงานวิจัยเชิงทดลองข้างต้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เป็นส่วนขัดขวางสนามการไหล และความจำเป็นในการใช้ขนาดการวัดที่เล็กให้สอดคล้องกับขนาดการไหลปั่นป่วน (Turbulent Length Scale) อีกทั้งยังสูญเสียทรัพยากรการวิจัยที่มาก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของไหลพลศาสตร์ในปัจจุบันจึงมีส่วนอย่างมากในการได้มาซึ่งข้อมูลเชิงกายภาพที่ไม่สามารถดำเนินการทดลองได้ แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบไม่คงตัวจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยต่อยอดจากสมการการไหลทั่วไปและได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์การไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกและสี่เหลี่ยมทรงกระบอกที่หมุนที่เลขเรย์โนลด์ที่สูง จากแบบจำลอง Standard k- ϵ [10] RNG k- ϵ [8] หรือ LES [11] แต่อย่างไรก็ตามยังมีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วนอื่นเพื่อทดสอบรูปทรงกระบอกที่หยุดนิ่ง เช่น DES [12] หรือ PANS [13] หรือวัตถุผนังโค้งทรงกลมที่หมุนด้วยแบบจำลอง RSM [14] อย่างไรก็ตามงานวิจัยการคำนวณของไหลพลศาสตร์ข้างต้น นิยมใช้รูปแบบการประมาณค่าผลลัพธ์ของ

ปริมาตรคำนวณแบบไฟไนต์วอลุ่มถึงแม้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่ดีที่เลขเรย์โนลด์ที่สูง แต่เป็นการวิเคราะห์ในลักษณะงานที่เฉพาะสำหรับการคำนวณทางของไหลทำให้เกิดทรัพยากรด้านต้นทุนที่สูงในการวิจัย

จากข้อจำกัดเชิงกายภาพและเพื่อให้การวิเคราะห์ผลการประมาณค่าสามารถครอบคลุมกับการคำนวณเชิงวิศวกรรมอื่น เช่น การวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ของแข็ง งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการประมาณค่าตัวแปรการไหลแบบไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับเมชการไหล (mesh) ซึ่งงานวิจัยของไหลพลศาสตร์ผ่านทรงกระบอกหรือวัตถุสี่เหลี่ยมทรงกระบอกด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ก่อนหน้านี้ นิยมวิเคราะห์ที่เลขเรย์โนลด์ที่ต่ำจากสมการการไหลทั่วไปหรือราบเรียบเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ที่เลขเรย์โนลด์ที่ 100,000 ซึ่งเป็นปริมาณที่มีพลังงานการไหลแบบปั่นป่วนที่สูง โดยวิเคราะห์จากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน ชนิด high Re k- ϵ ที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stresses) และความเครียดเฉลี่ย (mean strain) ของ boundary layer เป็นแบบเชิงเส้น และแก้ไขปัญหาการไม่สมดุลของสมการความต่อเนื่องการไหลในเมชซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ได้รับผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำโดยใช้เทคนิคเมชแบบเปลี่ยนรูป (deformation mesh) รอบผนังเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ของข้อมูลกายภาพของการไหลใน 3 มิติจากวัตถุสี่เหลี่ยมทรงกระบอกแบบผนังโค้งเรียบหรือเซาะร่องที่แม่นยำ สู่การวิเคราะห์ข้อมูลกายภาพเชิงลึกและสามารถยืนยันผลความสามารถของโครงสร้างเพื่อการประมาณค่าแบบไฟไนต์อีลิเมนต์ต่อไป

2. แบบจำลองการไหลปั่นป่วน

การไหลปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลด์สูงนี้มีผลต่อ boundary layer ที่ผนังอยู่ในสภาวะปั่นป่วนเพื่อความสอดคล้องกับลักษณะกายภาพที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ผลเชิงคำนวณจึงจำเป็นต้องใช้สมการการไหลแบบปั่นป่วนที่พัฒนามาจากสมการการไหลทั่วไปในสภาวะไหลต่อเนื่อง และสมการอนุพันธ์โมเมนตัม โดยสมการการไหลปั่นป่วนนี้จะประกอบด้วยองค์ประกอบพลศาสตร์ของโมเมนตัม ได้แก่

ความเร็วเฉลี่ย (U , Mean Velocity) และ ฟลักซ์การไหลปั่นป่วน ได้แก่ พลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน (k , turbulent kinetic energy) ซึ่งเป็นพลังงานจลน์อันเกิดจากอัตราความเร็วกวัดแกว่ง (u' , Fluctuation Velocity) จากความเร็วเฉลี่ยเทียบหนึ่งหน่วยมวล และ อัตราการฟุ้งกระจายของของไหลปั่นป่วน ($\mathcal{E}$, Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate) คือ อัตราการถ่ายทอดพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลจากการจากเลเซอร์การไหลคงตัวสู่กระแสนวน (Eddy) ขนาดใหญ่ หรือจาก eddy ขนาดใหญ่สู่ขนาดเล็ก เนื่องจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันอันก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้น สำหรับตัวแปรความดันเฉลี่ย (P , Pressure) จะใช้เทคนิคการประมาณการจากความเร็ว โดยตัวแบบ “SIMPLE” จึงได้สมการการไหลปั่นป่วนแบบของไหลไม่ขุ่นตัวในสภาวะการไหลไม่คงตัวที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง (Launder and Spalding, 1974) [15] คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i k) \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma(k)} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho(P_k - \mathcal{E} - D) \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_{\mathcal{E}}} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right) + C_{\mathcal{E}1} \frac{\mathcal{E}}{k} v_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \right. \\ & \left. \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\mathcal{E}2} \frac{\mathcal{E}^2}{k} \end{aligned} \quad (2)$$

ทั้งนี้ระดับความหนืดการไหลแบบปั่นป่วน (ν_t) มีการแปรเปลี่ยนขนาดตาม turbulent length scale และอัตราก่อกำเนิดพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน (P_k , Turbulent Kinetic Energy Production Rate)

$$\nu_t = \frac{c_{\mu} k^2}{\mathcal{E}} \quad (3)$$

ค่าความเค้นเรย์โนลด์เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเคลื่อนย้ายตัวของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Transport Term) สู่บริเวณอื่น นำไปสู่การวิเคราะห์อัตรา P_k ที่เมฆการไหลนั้น โดยสามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \delta_{ij} \frac{2}{3} k \quad (4)$$

จากสมมติฐานของการกระจายตัวที่เท่ากันในทุกทิศทางของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Iso-tropic Turbulent Kinetic Energy) อีกทั้งขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ $\frac{\partial \bar{U}}{\partial x}$ $\frac{\partial \bar{V}}{\partial y}$ และ $\frac{\partial \bar{W}}{\partial z}$ มีขนาดที่น้อยมากจึงสามารถประมาณค่าความเค้นเรย์โนลด์ในองค์ประกอบทุกทิศทางตั้งฉากในสมการ (4) ได้เป็น

$$\overline{u'^2} \cong \overline{v'^2} \cong \overline{w'^2} \cong \frac{2}{3} k \quad (5)$$

เพื่อเป็นการควบคุมค่าสูงสุดของความหนืดในการไหลปั่นป่วนและสัดส่วนของขนาดที่เหมาะสมระหว่าง k กับ $\mathcal{E}$ โดย Launder and Spalding (1974) [15] ได้กำหนดค่าคงที่ของเทอมความหนืดสำหรับสมการการไหลปั่นป่วน ($C_{\mathcal{E}1}$ และ $C_{\mathcal{E}2}$) เป็น 1.44 และ 1.92 ตามลำดับ ค่าคงที่พลังงานจลน์ ($\sigma^{(k)}$) และอัตราการฟุ้งกระจายของพลังงานจลน์ ($\sigma_{\mathcal{E}}$) เป็น 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดการไหลปั่นป่วน (c_{μ}) คือ 0.09 และไว้ค่าจำแนกความเป็นเนื้อเดียวกันของไหลเนื่องจากการฟุ้งกระจายตัว (D)

การลดทรัพยากรการประมวลผลเป็นสิ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์นี้ จากพฤติกรรมของเลเยอร์ในชั้นย่อยเฉื่อย (inertial sub-layer) ใกล้ผนังที่มีลักษณะการไหลปั่นป่วนเต็มรูปแบบจึงสามารถใช้กฎลอการิทึมเพื่อระบุฟลักซ์การไหลที่เมฆติดกับผนังจากสมการการไหลใกล้ผนัง โดยระยะห่างไร้หน่วย (y^+) ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างนี้อยู่ระหว่าง 30–150 [16]

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log(Ey^+) \quad (6)$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

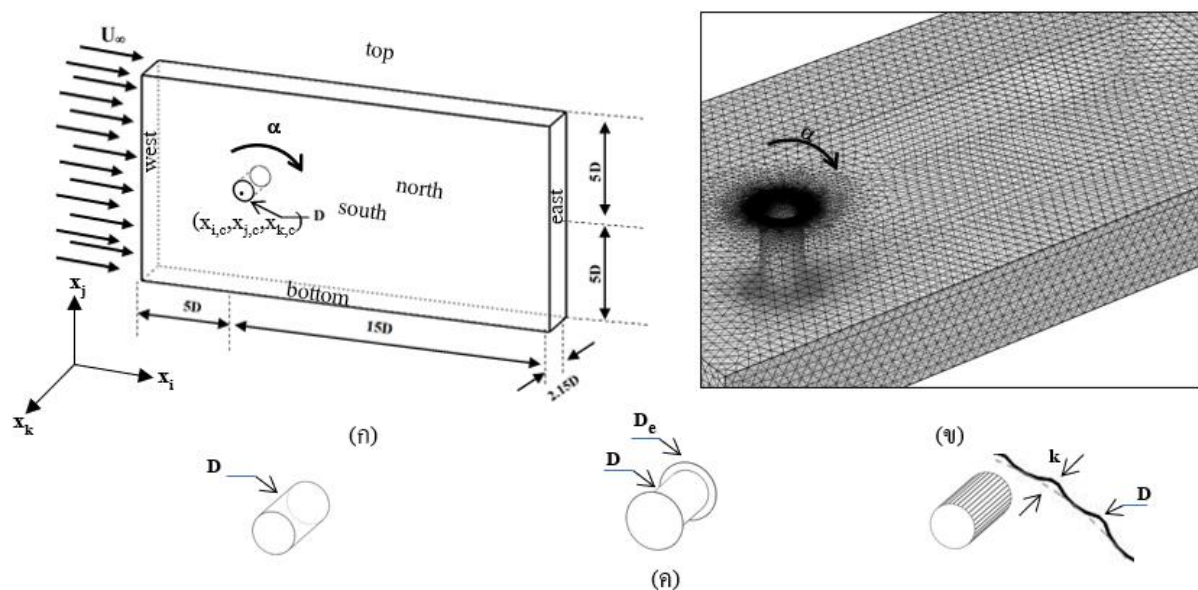
ในการศึกษาเชิงคำนวณนี้ได้ใช้โปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์ของไหลพลศาสตร์ COMSOL Multiphysics 5.6 ภายใต้การใช้งานโมดูล CFD [17] ซึ่งเป็นโปรแกรมทาง การคำนวณ ได้สิทธิ์สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยได้ ลักษณะโปรแกรมสามารถดำเนินการใช้โดยติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Linux-Ubuntu Desktop 18.04 รูปแบบที่

ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลพลศาสตร์นี้เป็นแบบการสร้างการประมาณการอนุพันธ์เชิงแบบโครงสร้างรูปทรงจตุรมุข (Tetrahedral Structure) สำหรับคำนวณแบบไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งใช้การประมาณการฟลักซ์ในเมชที่เกิดจากการฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นระหว่างจุดวิเคราะห์ที่ล้อมรอบเมชสำหรับคำนวณนั้น

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ปริมาณฟลักซ์การไหลนี้ ได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขต่างๆ เข้ามาเพื่อแก้ปัญหาจากสมการหลัก คือ การจัดรูปความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ปริมาณฟลักซ์การไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับแหล่งแจกจ่ายปริมาณการไหลแบบปั่นป่วน ได้แก่ การพิจารณาฟลักซ์การไหลแบบไม่คงตัวโดยระเบียบวิธีแควงกันโคลลัน และมีการแก้ระบบสมการโดยวิธี Geometric Multigrid (GMG) ซึ่งมีการใช้เมทริกซ์จำลองก่อนทำซ้ำด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำแบบเกาส์-ไซดอล ต่อไปเพื่อได้มาซึ่งการเข้าสู่ของคำตอบได้ดี โดยมีการใช้ตัวประกอบค่าผ่อนปรนเพื่อส่งเสริมการเข้าสู่คำตอบได้ในขณะเดียวกันมีการให้ความสัมพันธ์ควบคู่ระหว่างความดันและความเร็วในรูปแบบ the SIMPLE algorithm เพื่อใช้วิเคราะห์หาความดันจากการดิครีไทซ์ความเร็วอันเนื่องมาจากสมการหลักไม่ได้ให้ความสัมพันธ์แบบชัดเจนของปริมาณความดันที่เกิดขึ้น

3.1 สนามการคำนวณการไหล

ในการวิเคราะห์นี้ได้ใช้สนามการวิเคราะห์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีระยะความยาวตามแนวนานการไหล (x_i) ความกว้างตามแนวตั้งฉากการไหล (x_j) และแนวลึกของการไหล (x_k) เป็น 20 10 และ 2.15 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปที่ 1(ก) ได้กำหนดทิศทางการหมุนของทรงกระบอกและวัตถุพื้นฐานรูปทรงกระบอกในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และมีการระบุหน้าตัดเพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขขอบต่างๆ รูปที่ 1(ข) ได้แสดงลักษณะเมชเพื่อใช้ในการดิครีไทซ์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยมีการการปรับความละเอียดใกล้วัตถุพื้นฐานทรงกระบอกและมีขนาดคงที่ที่ระยะห่างออกไป สำหรับรูปที่ 1(ค) ได้แสดงลักษณะรูปทรงที่เป็นตัวกลางการไหลผ่านของของไหล โดยมีการเรียงลำดับจากทรงกระบอกผนังเรียบทรงกระบอกปลายตัดตั้งฉากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_c) เป็น 1.375 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก (D) และทรงกระบอกผนังเขาร่องที่มีสัดส่วนความลึกของร่อง (k) เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางพืวนอก เป็น 7.25×10^{-3} โดยวัตถุทั้งหมดมีขนาดสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (AR: Aspect Ratio) ที่ 2.15 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่สิ้นสุดระยะขอบทั้งสองด้านตามแนวลึกของสนามการไหล



รูปที่ 1 ลักษณะ (ก) สนามการคำนวณการไหล (ข) เมชแบบจตุรมุข และ (ค) ตัวกลางผนังวัตถุพื้นฐานทรงกระบอก

ตารางที่ 1 ได้แสดงจำนวนโครงสร้างเพื่อรองรับการวิเคราะห์สำหรับวัตถุพื้นฐานทรงกระบอกแต่ละแบบ ในระบบ 3 มิติ สำหรับผนังเซาะร่องจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างสำหรับสนามการไหลและเงื่อนไขขอบที่ผนังที่มากเนื่องจากเกิดพื้นที่การไหลระหว่างร่องที่เซาะเกิดขึ้น

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างความโค้งจากรูปหลายเหลี่ยมเพื่อให้ได้ความโค้งตามต้องการ และเมฆที่เกิดขึ้นนี้หากคิดผนังจะถูกระบุให้พฤติกรรมการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและสามารถดำเนินการวิเคราะห์ตามสมการที่ (6) ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 1 จำนวนโครงสร้างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สนามการไหลแต่ละวัตถุพื้นฐานรูปทรงกระบอก

ลักษณะวัตถุพื้นฐานรูปทรงกระบอก	จำนวนเมฆ	
	สนามการไหล	เงื่อนไขขอบ
ผนังเรียบ	254,210	17,708
ติดตั้งดิสก์ที่ปลายขนาด $D_0/D = 1.375$	321,166	66,292
ผนังเซาะ 32 ร่อง ขนาดร่อง $k/D = 7.25 \times 10^{-3}$	760,827	70,346

3.2 เงื่อนไขขอบ

เพื่อให้ผลการวิเคราะห์การไหลผ่านวัตถุพื้นฐานทรงกระบอกมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Takayama & Aoki (2005) [9] ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับสนามการคำนวณการไหล อีกทั้งตำแหน่ง และการวางตัวของทรงกระบอกจึงจำเป็นต้องระบุเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการมุ่งเน้นการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนรูปเมฆที่มีความเร็วการหมุนเชิงมุมเกิดขึ้น ดังนั้นนอกจากพื้นที่หน้าตัดของสนามการไหลตามรูปที่ 1(ก) แล้วจึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับโครงสร้างที่มีความเร็วเชิงมุมเกิดขึ้นด้วยดังรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับสนามการไหลนี้รายละเอียดของเงื่อนไขขอบได้แสดงดังตารางที่ 2

การกำหนดเงื่อนไขนี้ได้มีการใช้ความสัมพันธ์ตามกฎมาตราส่วน (Scaling Rule) ของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Unit) ขนาดเรย์โนลด์ 100,000 จึงสามารถระบุสภาวะการไหลเข้า (Inlet Boundary Condition) ที่หน้าตัดด้านทิศ west มีการระบุความเร็วของของไหลเฉพาะทิศทางขนานกับการไหลอิสระที่ 1 เมตรต่อวินาที สำหรับตัวแปรการไหลปั่นป่วนได้กำหนดระดับความเข้มของการไหลปั่นป่วน (I , Turbulent Intensity) ที่ร้อยละ 1 ส่งผลต่อค่าพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนตามสมการ และอัตราส่วนความหนืดการไหลปั่นป่วนต่อความหนืดจลน์ของของไหล (β , Turbulent

Viscosity Ratio) ที่ 10 เท่าซึ่งส่งผลต่อระดับการฟุ้งกระจายของการไหลปั่นป่วนเช่นกัน สำหรับตัวแปรความดันได้กำหนดให้ไม่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงในทิศทางการไหล

ที่หน้าตัดคว่ำ ทิศ south-north และ ทิศ bottom-top ได้กำหนดให้เกิดเงื่อนไขขอบเพื่อให้สภาวะการไหลไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากผนังมีความสอดคล้องกับการติดตั้งวัตถุให้ถูกระเบิดของไหลพัดผ่าน การเว้นช่องว่างขนาดเล็กที่ปลายทรงกระบอกกับผนังอุโมงค์ลมในทิศ south-north และการไม่เกิดผลกระทบของผนังอุโมงค์ในทิศ bottom-top เนื่องจากระยะห่างที่มาก จึงสามารถกำหนดเงื่อนไขขอบแบบคาบ (Periodic Boundary Condition) ให้กับสนามการวิเคราะห์ในส่วนผนัง (Wall Boundary Condition) ของทรงกระบอกและวัตถุพื้นฐานทรงกระบอกได้มีการกำหนดให้ผนังหยุดนิ่ง และไม่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานการไหลปั่นป่วนและโมเมนตัมในทิศทางตั้งฉากสำหรับอัตราการหมุนเชิงมุมจะกำหนดไว้ที่เมฆแบบปรับเปลี่ยนรูป โดยมีขนาดความหนาเป็น $0.025D$ และตัวแปรการไหลปั่นป่วนของเมฆจะมีเงื่อนไขขนาดที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างในแนวตั้งฉากเมื่อเทียบกับระยะชั้นย่อยหนืด (y_v , viscous sub-layer distance) อย่างไรก็ตามการไหลผ่านที่บริเวณรอยต่อที่เชื่อมกัน (identity pair element) ที่บริเวณรอยต่อที่สนามการไหลจากภายนอกสู่ภายในเมฆแบบเปลี่ยนรูปถือได้ว่าเป็นการอนุรักษ์การไหล (Continuity on Interior Boundary Condition) ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบการวิเคราะห์สนามการไหลด้วยเทคนิคการเปลี่ยนรูปเมช

Face	Boundary Condition	U	V	W	k	ε	P
west	inlet	1	0	0	$(U_\infty)^2$ when $I = 1\%$	$\frac{c_\mu k^2}{\beta v}$ when $\beta = 10$	$\frac{\partial P}{\partial x_i} = 0$
east	Far Field	$n \cdot \nabla U = 0$	$n \cdot \nabla V = 0$	$n \cdot \nabla W = 0$	$n \cdot \nabla k = 0$	$n \cdot \nabla \varepsilon = 0$	0
bottom	periodic I	$\phi_{j=1} = \phi_{j=Nj-1}$ and $\phi_{j=Nj} = \phi_{j=2}$ when $\phi = U, V, W, k, \varepsilon$ and P					
top							
south	periodic II	$\phi_{k=1} = \phi_{k=Nk-1}$ and $\phi_{k=Nk} = \phi_{k=2}$ when $\phi = U, V, W, k, \varepsilon$ and P					
north							
Cylinder	wall	0	0	0	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$
Deformation Mesh	Rotating Domain	$\frac{-2\alpha U_\infty \sin\theta PC }{D}$ เมื่อ P คือ จุดในโครงสร้างหมุน C คือจุดศูนย์กลาง	$\frac{2\alpha U_\infty \cos\theta PC }{D}$ เมื่อ P คือ จุดในโครงสร้างหมุน C คือจุดศูนย์กลางทรงกระบอก	0	$\frac{(\tau_w/\rho)}{\sqrt{c_\mu}}$ $y \leq y_v$ k_p $y > y_v$	$\varepsilon = \frac{2\nu k_p}{y_v^2}$ $y \leq y_v$ $\varepsilon = \frac{k_p^{3/2}}{c_l y}$ $y > y_v$	P-V Couple SIMPLE Algorithm
	Continuity on Interior Boundary	$\nabla \cdot (u_i + v_j + w_k) = 0$ at identity pair element					

การกำหนดเงื่อนไขขอบที่ทางออก (Far Field Boundary Condition) หรือที่หน้าตัดในทิศทาง east จำเป็นต้องระบุให้สอดคล้องกับการไหลผ่านภายนอกโดยทุกตัวแปรมีการกำหนดการคงตัวของขนาดในทิศทางตั้งฉากกับหน้าตัดทางออก ในขณะที่ความดันถูกกำหนดค่าสำหรับประมวลผลเป็น 0 ซึ่งแสดงถึงสภาวะความดันพิจารณาที่ 1 บรรยากาศ

3.3 การแปลงรูปเมช

เมื่อพิจารณาเมชแบบเปลี่ยนรูปนั้น จะมีการถ่ายทอดโมเมนต์กันระหว่างสนามการไหลกับเมชแบบเปลี่ยนรูป ในขณะที่เมชแบบเปลี่ยนรูปเกิดการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเมื่อของไหลผ่านผนังเจาะร่องทำให้มีการเสียรูปในแนวตั้งฉากจากกับผนังที่ปะทะ (X, Prescribed Normal Mesh Velocity) ซึ่งสนามของเมชแบบเปลี่ยนรูปจะมีพฤติกรรมไป

ตามสมการกำหนดความเร็วของเมชในแนวเสียรูปตั้งฉากกับผนังแต่ละโครงสร้าง โดยทั่วไป คือ

$$\frac{\partial X}{\partial t} \cdot n = v_0 + v_{mbs} \quad (7)$$

โดยค่าปรับค่าเพื่อให้เกิดความราบเรียบ (v_{mbs}) มีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วในแนวตั้งฉากที่ออกแบบ (v_0) คือ

$$v_{mbs} = \delta_{mbs} |v_0| hH \quad (8)$$

และขนาดค่าเฉลี่ยความโค้งของผิวโครงสร้าง (H) มีขนาด คือ

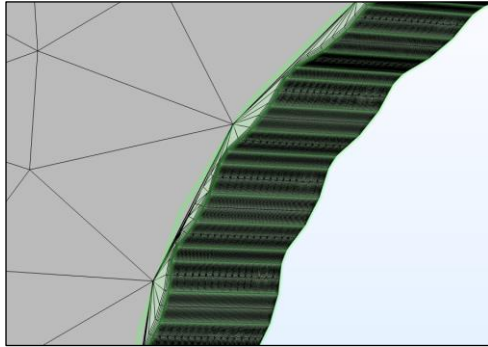
$$H = -\frac{1}{2} \nabla n_T \quad (9)$$

เมื่อ

δ_{mbs} คือ ค่าคงตัวสำหรับปรับความราบเรียบของความเร็ว (0.5)

h คือ ขนาดโครงสร้างคำนวณ

∇_T คือ กราเดียนต์ของเวกเตอร์ผิว



รูปที่ 2 บริเวณเมชแบบเปลี่ยนรูป

4. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

จากการศึกษาการไหลผ่านของของไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกและฐานทรงกระบอกที่หมุน ซึ่งข้อมูลของแรงของไหลพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเป็นข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม โดยมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะ Boundary Layer และสนามการไหลที่เกิดขึ้น รายละเอียดข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญจากผลการศึกษาเชิงคำนวณได้แสดงในรายละเอียดแต่ละส่วนต่อไป

4.1 แรงของไหลพลศาสตร์

แนวโน้มของแรงของไหลพลศาสตร์ได้แสดงดังรูปที่ 3 โดยจำแนกออกเป็นสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุผนังทรงกระบอกผนังราบเรียบและติดตั้งดิสก์ รูปที่ 3(ก) และ 3(ข) โดยเน้นการวิเคราะห์จากเมชปรับตัวหมุนรอบผนัง (Rotating Mesh) พบว่าเมื่อยืนยันผลการศึกษาเชิงคำนวณกับการทดลองก่อนหน้านี้ที่สภาวะทรงกระบอกผนังเรียบไม่มีการหมุนกับการศึกษาการทดลองก่อนหน้านี้ [9] พบว่าทั้งเมชแบบคงตัวและเปลี่ยนรูปไม่เกิดค่าสัมประสิทธิ์แรงยกซึ่งมีความสามารถในการยืนยันผล ในส่วนของเมชเปลี่ยนรูปนั้นเมื่อพิจารณาทรงกระบอกผนังเรียบที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 1 ผลการศึกษาเชิงคำนวณมี

แนวโน้มเดียวกันกับการทดลองเช่นกัน ซึ่งสามารถใช้แนวโน้มของค่าในการคาดการณ์ปรากฏการณ์ที่มีอัตราการหมุนสูงกว่าได้

อย่างไรก็ตามผลการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงยกยังมีความแตกต่างในช่วงสภาวะอัตราการหมุนไร้หน่วย 0.2–0.8 ซึ่งเกิดการปรับเปลี่ยนลักษณะของ Boundary Layer ที่ผนังจากแบบเรียบสู่ปั่นป่วน (Laminar to Turbulence Transition Boundary Layer) ทำให้เกิดแนวโน้มของแรงยกผกผัน (Reversal Lift Force) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดข้อจำกัดของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีการ RNG k- ϵ ที่ถือว่าเป็นวิธีการที่มีความสามารถในการพิจารณาผลของ Turbulent length scale ที่เล็กกว่าและแปรเปลี่ยนอัตราก่อกำเนิดการไหลปั่นป่วนตามระยะห่างจากผนังในบริเวณ viscous sub-layer [8] นอกจากนี้ ข้อจำกัดการวิเคราะห์ในช่วงปรับเปลี่ยน Boundary layer ที่ผนังนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยสมการการไหลปั่นป่วนแบบหนึ่งสมการ (One-Equation) [18] ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับการไหลภายนอกที่ boundary layer ที่ผนังไหลแบบราบเรียบเช่นกัน สำหรับแนวโน้มของสัมประสิทธิ์แรงดันเมื่อเกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการหมุนไร้หน่วยนั้น พบว่า ความสอดคล้องของการคำนวณและการทดลองจะใกล้เคียงกันที่อัตราการหมุนไร้หน่วยมากกว่า 0.75 โดยผลความแตกต่างเล็กน้อยที่เกิดขึ้นเกิดจากทิศทางระหว่างแรงพลศาสตร์ลัพธ์กับแรงดัน [14] สำหรับเมชคงตัว (Fixed Mesh) ได้ใช้วิเคราะห์ผลเพิ่มเติมที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 0 และ 0.25 ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันมีความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์กับการทดลองร้อยละ 7 ซึ่งเบื้องต้นสามารถแสดงถึงความสามารถของเมชชนิดนี้ในกรณีหยุดนิ่งหรืออัตราการหมุนไร้หน่วยต่ำดังกล่าวได้

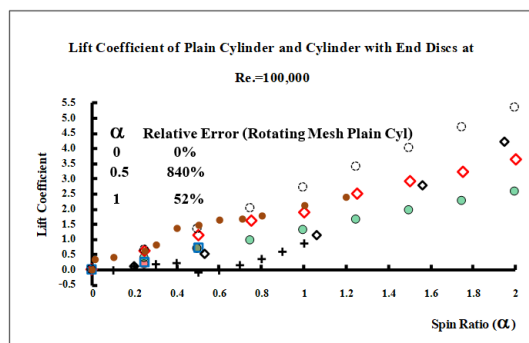
ขณะที่ทรงกระบอกติดตั้งดิสก์ $D_c/D = 1.375$ ที่ปลายทั้งสองด้านได้ทำการเทียบเคียงแนวโน้มกับการทดลองก่อนหน้านี้ [7] ที่เลขเรย์โนลด์ 48,900 โดยมีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงดันที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันที่อัตราการหมุนไร้หน่วยมากกว่า 1 แต่ยังพบค่าการวิเคราะห์ของสัมประสิทธิ์แรงยกที่สูงกว่าการทดลองไม่มากในบางช่วงอัตราการหมุนไร้หน่วยอันเนื่องมาจากตำแหน่งวิกฤติของ Boundary layer แตกต่างกัน โดยทั่วไปแรงยกจะมีขนาดมากขึ้นหากแนวโน้ม

การเคลื่อนตำแหน่งของความดันดูด (Suction Points) ที่เป็นตำแหน่งที่มีความดันลบขนามากที่สุดและแตกต่างกัน (Stagnation Point) ที่มีพลังงานศักย์ความดันเพื่อยับยั้งการไหลผ่านสูงสุด เคลื่อนเข้าใกล้ด้านตรงข้ามกันที่มุม $\pm 90^\circ$ อย่างไรก็ตามแบบจำลองการไหลปั่นป่วนและเทคนิคเชิงตัวเลขและสนามการไหลของการศึกษาเชิงคำนวณนี้ถือว่ามีความน่าเชื่อถือที่จะใช้วิเคราะห์พฤติกรรมที่ทรงกระบอกที่มีอัตราหมุนไร้หน่วยเกิดขึ้นได้

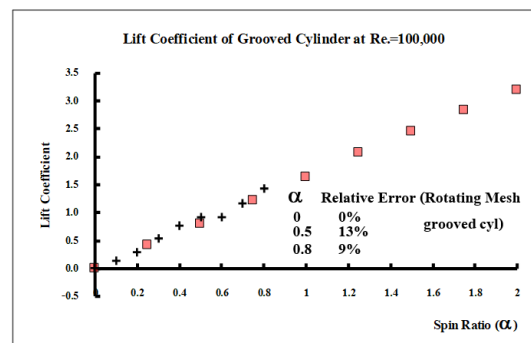
หากทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างการหมุนของทรงกระบอกหนึ่งเรียบกับการติดตั้งคิส์ พบว่าที่อัตราหมุนไร้หน่วย 2 การติดตั้งคิส์จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงยกมากกว่าทรงกระบอกหนึ่งเรียบ คือ 3.66 และ 2.56 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่อัตราหมุนเดียวกันนี้สัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างรูปทรงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ 0.79 และ 0.80 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษายังได้แสดงผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่าการ

วิเคราะห์การไหลใน 2 มิติ ซึ่งแสดงถึงการไม่สามารถละเว้นการพิจารณาผลการไหลใน 3 มิติ ได้อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่อัตราการหมุนไร้หน่วยระหว่าง 0.4-0.7 ซึ่งเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงสภาวะ Boundary Layer ที่ผนังแบบราบเรียบสู่ปั่นป่วนทำให้สัมประสิทธิ์แรงยกที่วิเคราะห์ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนกันกับการทดลองเพราะปรากฏการณ์สัมประสิทธิ์แรงยกผันกลับจากตำแหน่ง stagnation point ที่ผนังมีการเคลื่อนตัวในทิศทางต่างกัน แต่ผลการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อนนี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการศึกษาเชิงคำนวณก่อนหน้านี้ด้วยแบบจำลอง LES และ RSM [11],[14]

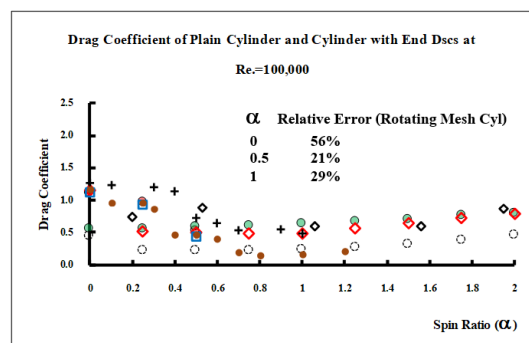
ในขณะที่ผลการวิเคราะห์เชิงคำนวณของการไหลผ่านทรงกระบอกหนึ่งเรียบร่องลึก $k/D = 7.25 \times 10^{-3}$ ตามรูปที่ 3 (ค) และ 3(ง) ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลองอย่างมาก ได้แสดงการไม่เกิดผลสัมประสิทธิ์แรงยกในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงต้านของการศึกษาเชิงคำนวณกับการทดลองใกล้เคียงกันที่ 0.80 และ 0.75 ตามลำดับ



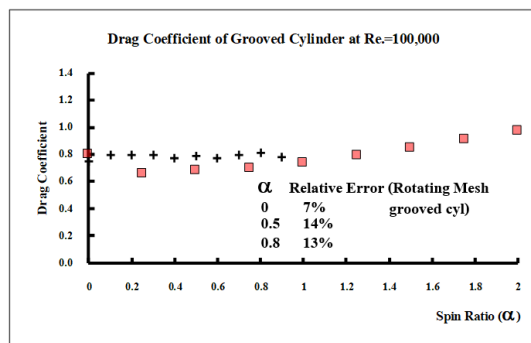
(ก)



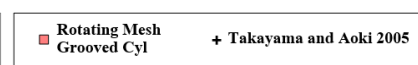
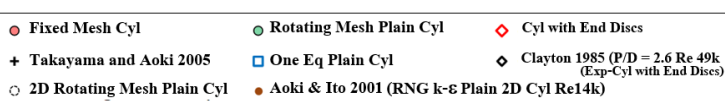
(ค)



(ข)



(ง)



รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์แรงพลศาสตร์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ของวัตถุทรงกระบอกหนึ่งเรียบและติดตั้งคิส์ที่ปลาย (ค) แรงยก และ (ง) แรงต้าน ของวัตถุเสมือนทรงกระบอกหนึ่งเรียบที่เลขเรย์โนลด์ 100,000

ในกรณีที่ทรงกระบอกผนังเซาะร่องเกิดการหมุนนั้น พบว่าแนวโน้มสัมประสิทธิ์แรงยกมีการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น โดยไม่พบช่วงการปรับเปลี่ยนสภาพการไหลของ Boundary layer และสูงสุดที่ 3.2 เมื่ออัตราการหมุนไร้หน่วยเป็น 2 และสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ยจากการคำนวณและการทดลองเป็น 0.72 และ 0.79 คิดเป็นความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) ร้อยละ 8.86 ในส่วนข้อมูลที่เกิดความสอดคล้องกับการทดลองได้ยืนยันความสามารถของแบบจำลองการไหลปั่นป่วนและเทคนิคการวิเคราะห์ในการคาดการณ์พฤติกรรมกรณีนี้ได้เป็นอย่างดี

เพื่อเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจสำหรับเลือกใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเมชแบบหมุน โดยแบบจำลองการไหลปั่นป่วนชนิดนี้ในงานวิจัยต่อไป รูปที่ 3 ได้แสดงความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เมื่อเทียบกับการทดลองสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกผนังเรียบที่อัตราการหมุนไร้หน่วย 0.5 และ 1 และผิวเซาะร่องที่อัตราการหมุน 0.5 และ 0.8 ตามลำดับ

หากพิจารณาแรงอากาศพลศาสตร์ของสัมประสิทธิ์แรงยกชั่วขณะ (instantaneous time) แต่ละเวลาไร้หน่วยที่เกิดขึ้น (t^*) ตามรูปที่ 4(ก)–(ค) นั้น ทุกวัตถุตัวกลางที่ไม่มีการหมุนได้ส่งผลต่อการเกิดระดับความกวัดแกว่งของแรงพลศาสตร์ที่สูงอันเนื่องมาจากการแผ่ขยายของกระแสไหลออกสู่บริเวณด้านหลังของวัตถุตามหลักการการแผ่ขยายกระแสไหลออกของคาร์แมน (Kármán vortex shedding) ที่ก่อกำเนิดขึ้นจาก boundary layer ที่บริเวณผนังที่สลับกันระหว่างขอบบนและขอบล่างของวัตถุทรงกระบอกนี้ อย่างไรก็ตามผลของการหมุนของทรงกระบอกทุกแบบได้ยับยั้งการกวัดแกว่งจากพฤติกรรมตามหลักการดังกล่าว

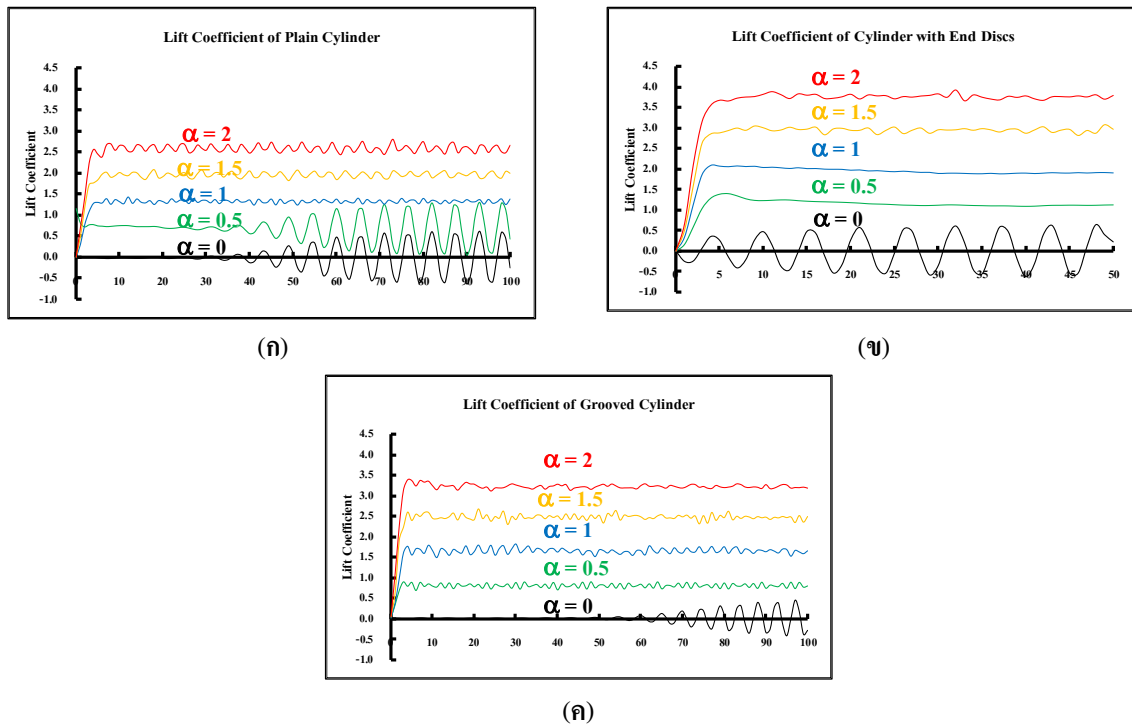
นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบความสามารถการยับยั้งความไม่คงตัวของสนามการไหลที่เกิดขึ้นโดยการหมุนของวัตถุนั้น พบว่าการติดตั้งดิสก์ที่ปลายทั้งสองของทรงกระบอกสามารถยับยั้งการแผ่ขยายของกระแสได้ดีที่สุดที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 0.5 ในขณะที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่สูงกว่า 1 พบการแกว่งของสัมประสิทธิ์แรงยกเพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวเข้าหากันของจุดวิกฤตก่อให้เกิดความไม่สมดุลพลังงานบางส่วนใน

สายธารการไหลของจุดสแตกเนชันและจุดอานม้า (Saddle Point) ที่ เป็นจุดที่เป็นค่าสุดขีดพลังงานจลน์การไหล [19]

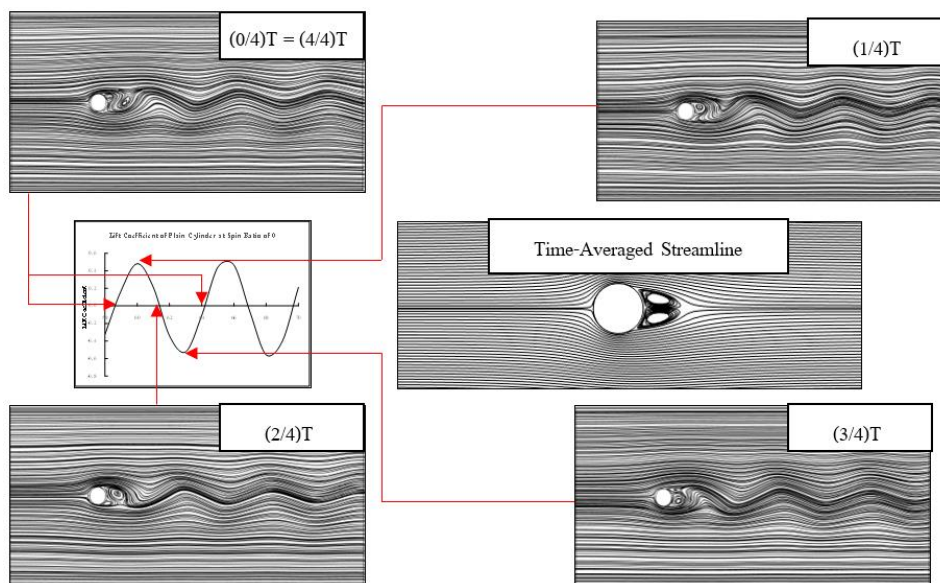
กระบวนการก่อกำเนิดกระแสวนที่มีผลต่อความกวัดแกว่งได้แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าที่เวลาเริ่มต้นที่ช่วงคาบ 0/4 นั้นกระแสวนขนาดเล็กได้ก่อกำเนิดที่บริเวณขอบหลังด้านบนและมีขนาดใหญ่ขึ้นที่ช่วงเวลา (1/4) ของคาบซึ่งขนาดที่ใหญ่ทำให้เกิดแรงยกที่เป็นขนาดบวกโดยมีการกระทำในทิศทางแนวตั้งพุ่งขึ้นและเมื่อขนาดโตมากขึ้นก็จะเคลื่อนไปปลายกระแสของสนามการไหลและสลายไปในขณะเดียวกันนั้น กระแสวนขนาดเล็กเริ่มก่อกำเนิดขึ้นที่ขอบหลังด้านล่างที่เวลา (2/4) ขอบคาบ และเช่นเดียวกันกับช่วงเวลาค้างคาบก่อนหน้านี้ รูปแบบการขยายขนาดเริ่มพัฒนาจนที่เวลา (3/4) ขอบคาบ และเคลื่อนออกพร้อมสลายตัวไป ซึ่งรูปแบบการก่อกำเนิดมีความแน่นอนทำให้เมื่อพิจารณาแผนภาพสายธารการไหลแบบค่าเฉลี่ยตามเวลา (Time-averaged Streamline) จะเกิดกระแสวนคู่ที่ด้านหลังวัตถุทรงกระบอกและมีความสมมาตรรอบแกนขนานกับทิศทางการไหล

นอกจากนี้องค์ประกอบของแรงกระทำพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นได้จำแนกได้เป็นผลจากความดัน (Pressure Force) และแรงเสียดทานที่ผนัง (Viscous–Friction rate) ดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าผลของแรงเสียดทานที่ผนังมีขนาดที่น้อยมากเมื่อเทียบกับความดัน โดยที่สภาวะหยุดนิ่งของวัตถุทรงกระบอกผนังเรียบ ติดตั้งดิสก์ที่ปลาย และ เซาะร่องคิดเป็นร้อยละ 3.93 3.45 และ 1.47 ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการหมุนเพิ่มขึ้นแนวโน้มของแรงทั้งหมดของทุกรูปแบบวัตถุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 2 สัดส่วนดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 1.91 1.02 และ 1.81 ตามลำดับ โดยทั่วไปในกรณีที่มิสัดส่วนต่ำกว่าร้อยละ 2 อาจสามารถละเว้นการพิจารณาผลของแรงเสียดทานที่ผนังเนื่องจากของไหลได้

เมื่อทำการวัดผลของ Kármán vortex shedding ในรูปของตัวแปรความถี่ไร้หน่วย (St , The Strouhal number: fD/U_∞) ดังแสดงในรูปที่ 7 นั้น พบว่าค่าความถี่ไร้หน่วยของทุกวัตถุในสภาวะหยุดนิ่งของทรงกระบอกผนังราบเรียบ และติดตั้งดิสก์ที่ปลายได้ค่าที่ 0.20 ในขณะที่



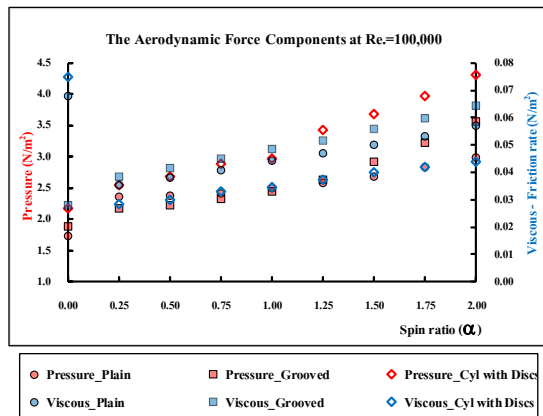
รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ชั่วขณะเวลาไว้หน่วยทรงกระบอก (ก) ผนังราบเรียบ (ข) ปลายดิสก์ และ (ค) ผนังเจาะร่อง



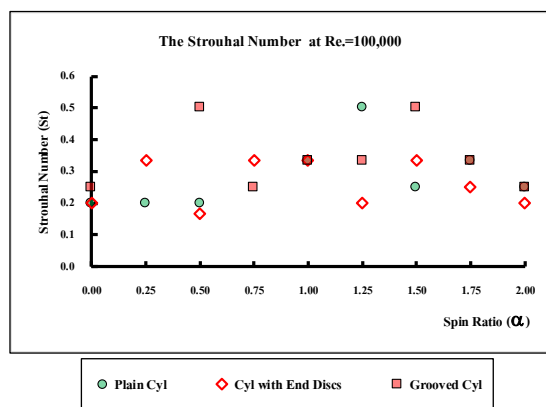
รูปที่ 5 การก่อกำเนิดกระแสวนเมื่อของไหลไหลผ่านทรงกระบอกผนังราบเรียบที่สภาวะหยุดนิ่งแต่ละช่วงคาบเวลา

ทรงกระบอกเจาะร่องมีความถี่ไว้หน่วยที่ 0.25 นอกจากนี้เมื่อวัตถุทุกชนิดมีการหมุนขึ้น ค่าความถี่ไว้หน่วยจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบไม่ขึ้นกับขนาดอัตราหมุนไว้หน่วย ซึ่งพบว่าขนาดสูงสุดในกรณีของวัตถุทรงกระบอกผนังเรียบ คือ 0.50 ที่อัตราหมุนไว้หน่วย 1.25 วัตถุทรงกระบอกปลายดิสก์ คือ 0.33 ที่อัตราหมุนไว้หน่วย 1.50 และ วัตถุ

ทรงกระบอกเจาะร่อง คือ 0.50 ที่อัตราหมุนไว้หน่วย 2 ทั้งนี้ขนาดของค่าความถี่ไว้หน่วยที่สูงเกิดจากการแผ่ขยายของกระแสวนเพียงด้านเดียวและการกวัดแกว่งของแรงพลศาสตร์จะมีแอมพลิจูดที่น้อยลงสู่ความคงตัวของการไหลผ่านวัตถุในสนามการไหลภายนอก



รูปที่ 6 องค์ประกอบของแรงกระทำพลศาสตร์



รูปที่ 7 ความถี่ไรหน่วยของการแผ่ขยายกระแสนวน

4.2 รการกระจายตัวของความดันรอบผนัง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแรงเนื่องจากความดันมีอิทธิพลต่อขนาดของอากาศพลศาสตร์ เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวความดันรอบผนังทรงกระบอกที่ระนาบกึ่งกลางวัตถุแต่ละแบบดังรูปที่ 8 ที่สภาวะหยุดนิ่งได้แนวโน้มของการกระจายตัวจะมีความสมมาตรรอบแกนมุมทิศในพิทังตรงกลม (Azimuthal angle) ที่ 180° และอัตราการหมุนไรหน่วย 2 จะพบการกระจายตัวที่มีความแตกต่างของความดันมาก โดยเฉพาะด้านส่งเสริมความเร็ว (Acceleration side) จะมีความดันที่ต่ำในขณะที่ด้านยับยั้งความเร็ว (Deceleration side) จะมีความดันที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามในกรณีของวัตถุสี่เหลี่ยม ทรงกระบอกจะรบกวนการกระจายตัวของความดันที่เส้นรอบวงในที่นี้เป็นฐานล่างของร่องและเส้นรอบวงนอกที่เป็นขอบปลายของสันโค้งมีแนวโน้มคล้ายกันแต่มีขนาดต่างกันไม่มาก อีกทั้งรูปแบบการกระจายตัวที่สันนอกมีการกวัดแกว่งที่มาก เนื่องจากการปะทะกับของไหลและมีความเร็วที่มากกว่า

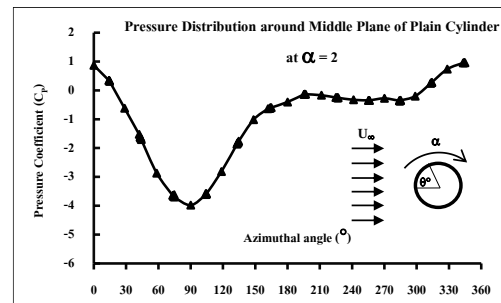
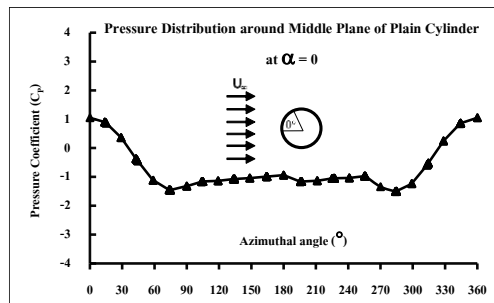
สำหรับการกระจายตัวของความดันนี้ยังสามารถระบุตำแหน่งวิกฤติของเลเยอร์ที่ผนังได้

รูปที่ 9 ได้ทำการวิเคราะห์บริเวณวิกฤติของ Boundary layer ที่ระนาบหน้าตัดกึ่งกลางทรงกระบอก โดยรูปที่ 9(ก)แสดงผลเมื่อวัตถุมีการหมุนทำให้เกิดแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของจุดสแตกนชันในทิศทางสวนทางกับการหมุนของทรงกระบอก ในขณะที่ตำแหน่งความดันดูดของผนังด้านส่งเสริมความเร็วในรูปที่ 9(ข) ได้ผลการเคลื่อนตัวของตำแหน่งดังกล่าวมีแนวโน้มเคลื่อนในทิศทางเดียวกันกับการหมุนจนถึงอัตราการหมุนไรหน่วย 1 ตำแหน่งดังกล่าวจะเริ่มคงที่สำหรับรูปที่ 9(ค) แสดงผลของจุดความดันดูดบริเวณผนังด้านยับยั้งความเร็วมีการเคลื่อนตัวเล็กน้อยเมื่อเกิดอัตราการหมุนไรหน่วยขึ้น

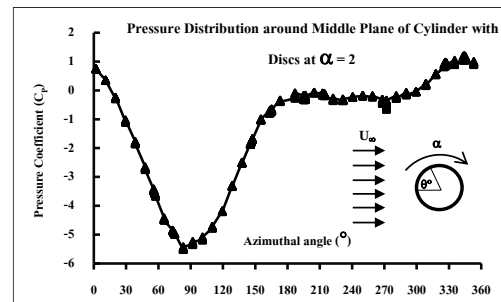
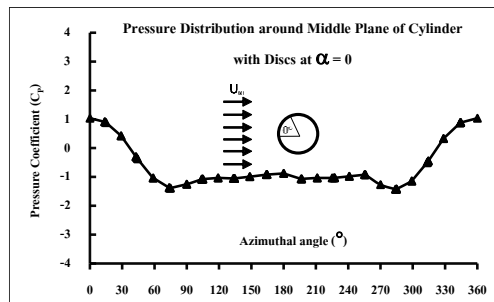
4.3 นามการไหลของฟลักซ์โมเมนตัมการไหล

และตัวแปรการไหลปั่นป่วน

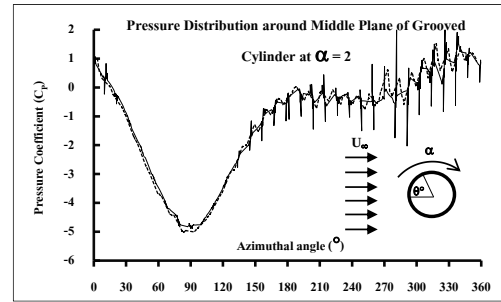
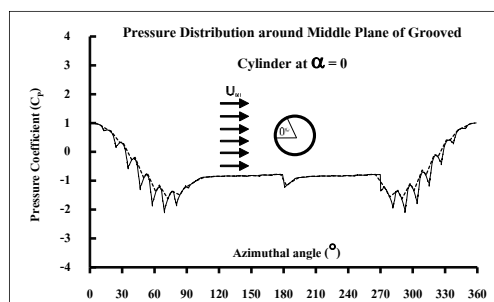
สนามการไหลของระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่กึ่งกลางระนาบของทรงกระบอกแบบค่าเฉลี่ยตามเวลาได้แสดงในรูปที่ 10 โดยระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่สูงจะพบที่บริเวณใกล้ผนังหรือบริเวณ Inertial Sub-layer ซึ่งสอดคล้องกับสมการเงื่อนไขที่เมฆแบบปรับรูปได้ถูกกำหนดและบริเวณกระแสนวนที่เกิดขึ้น สำหรับวัตถุหยุดนิ่งจะมีระดับพลังงานที่สูงกว่าวัตถุที่หมุน โดยแผนภาพได้แสดงในช่วง 0-0.05 และวัตถุหมุนด้วยอัตราการหมุนไรหน่วยที่ 2 ได้แสดงในช่วง 0-0.0003 สำหรับการลดระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนอันเนื่องจากการหมุนจะเกิดที่บริเวณไกลจากผนังออกไป นอกจากนี้ยังพบว่าวัตถุทรงกระบอกจะรบกวนส่งผลทำให้กระแสนวนหลังวัตถุมีขนาดใหญ่และมีระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่สูงสุด ผลที่ได้จากแผนภาพนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบและกำหนดตำแหน่งการติดตั้งชิ้นส่วนของอากาศยานทุกรูปแบบที่เกี่ยวข้องเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นทางกระแสการไหลที่มีระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่สูงผ่านเข้าสู่บริเวณใช้งานหรือควบคุมความปลอดภัยจากของไหลปั่นป่วนได้ รูปที่ 11 แผนภาพ Q criteria iso-surface ที่ 100 ใน 3 มิติ โดยเป็นขนาดของผลต่างเฉลี่ยระหว่างความอัตราการหมุนเฉลี่ย (Ω) กับอัตราความเครียดเฉลี่ย (S) ระหว่างเลเยอร์การไหล ซึ่ง boundary layer ของกระแสนวนนี้สามารถจำแนกออกจากการไหลที่มีความเร็วอิสระหรือคงตัวได้



(ก)



(ข)



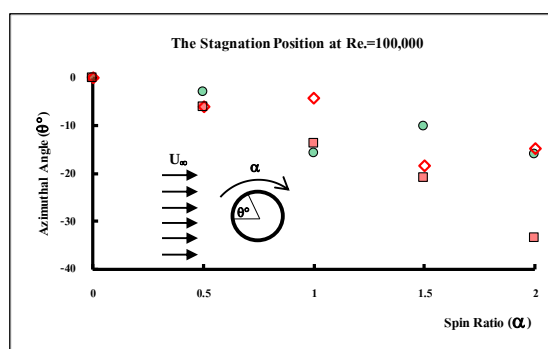
เส้นรคบางลายรค

(ค)

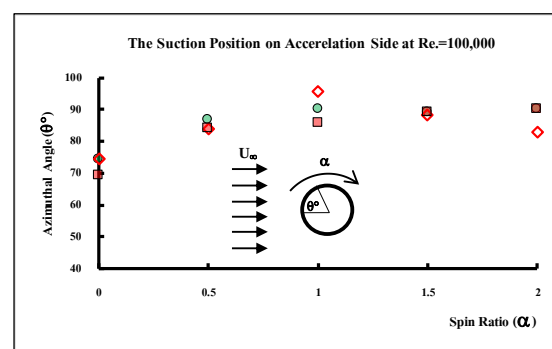
รูปที่ 8 การกระจายตัวของความดันรอบผนังที่สภาวะหยุดนิ่งและหมุนไว้หน่วย 2 ของวัตถุทรงกระบอก (ก) ผนังราบเรียบ (ข) ติดตั้งดิสก์ที่ปลาย และ (ค) เซาะร่อง

อีกทั้งการจำลองการวิเคราะห์เชิงคำนวณจากลักษณะการติดตั้งวัตถุตัวกลางในการทดลองรูปแบบนี้ได้ยืนยันผลการไม่เกิดความแปรปรวนการไหลจากกระแสน้ำที่ปลาย

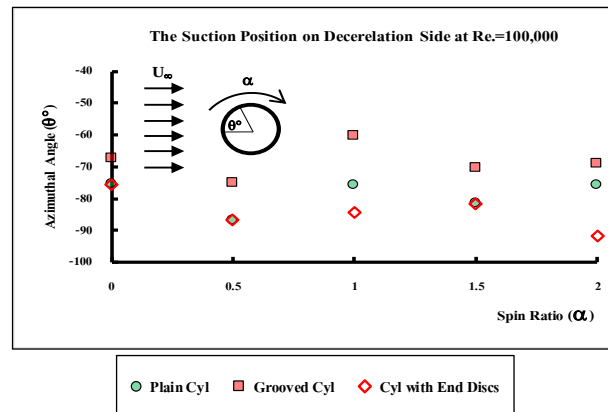
ของวัตถุ (Tip Vortices) โดยผลของการหมุนของวัตถุ สันฐานทรงกระบอกได้ส่งผลต่อการลดขนาดพื้นที่และเส้นทางแผ่ขยายของกระแสน้ำให้สั้นลงได้



(ก)



(ข)



(ค)

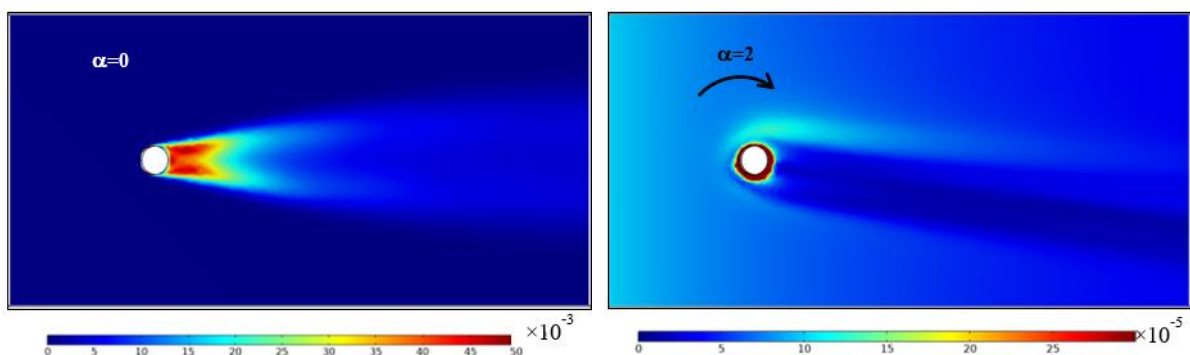
รูปที่ 9 จุดวิกฤติของ boundary layer ที่ผนัง (ก) จุดสแตกเนชัน (ข) จุดความดันดูดด้านส่งเสริม และ (ค) ด้านยับยั้งความเร็ว

5. บทสรุป

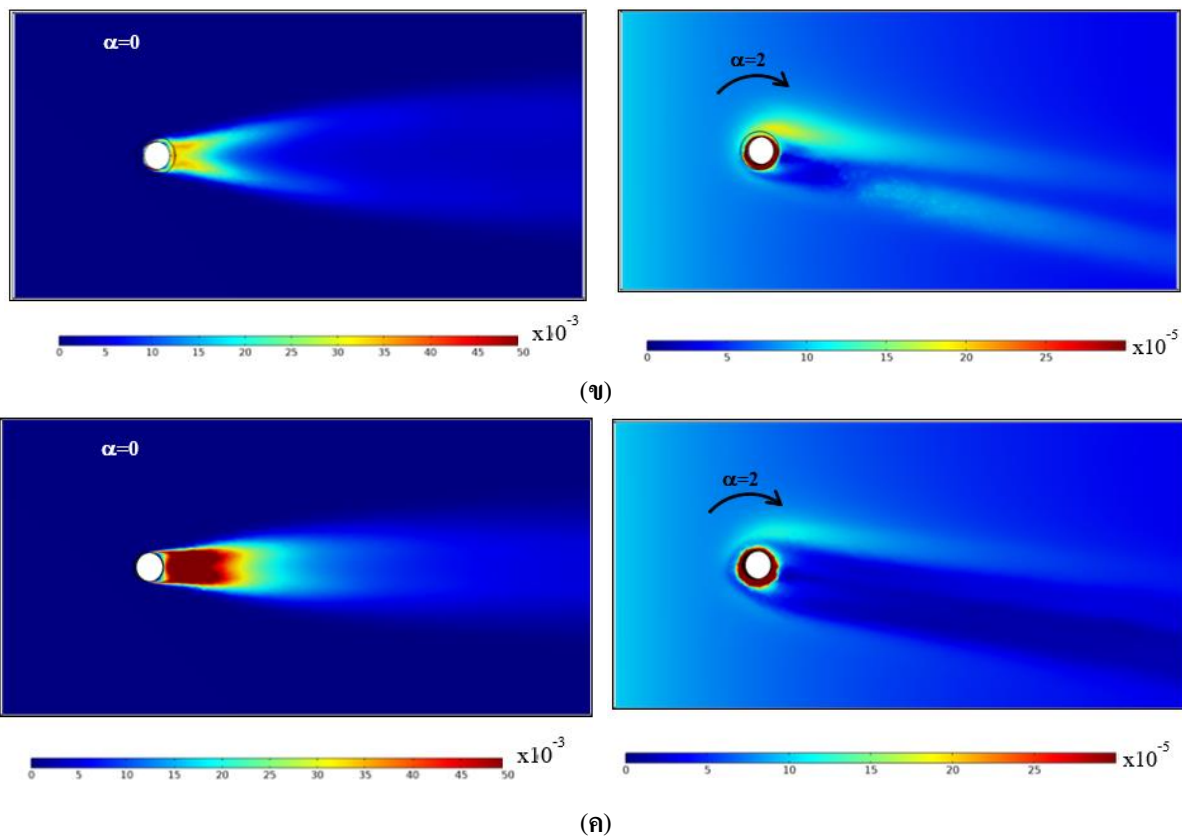
ในการไหลผ่านวัตถุตัวกลางทรงกระบอกและวัตถุฐานทรงกระบอกที่ได้ทำการศึกษาในสภาวะการหมุนและที่เลขเรย์โนลด์ที่สูงนี้ พบว่าลักษณะวัตถุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน รวมถึงพฤติกรรมกายภาพในสนามการไหลและลักษณะ boundary layer ที่ผนังล้วนมีความแตกต่าง ข้อมูลที่ได้นี้ถือว่าเป็นประโยชน์ในทางการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนทางของไหลพลศาสตร์โดยมุ่งเน้นการขับเคลื่อนจากผลของแรงยกและแรงดันได้เป็นอย่างดี

อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้ยืนยันความสามารถของเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ที่สภาวะวัตถุหมุน และนอกเหนือสภาวะ boundary layer ที่ผนังปรับตัวจาการราบเรียบสู่ปั่นป่วน ($\alpha > 0.8$)

สำหรับวัตถุทรงกระบอกและติดตั้งดิสก์ที่ปลายทรงกระบอก ซึ่งมีข้อจำกัดในช่วงการหมุนไร้หน่วยที่ boundary layer ที่ผนังยังไม่อยู่ในสภาวะการไหลปั่นป่วนสมบูรณ์แบบ สำหรับทรงกระบอกผนังเซาะร่องให้ผลวิเคราะห์ที่แม่นยำทุกช่วงอัตราการหมุนไร้หน่วยจึงเป็นการดีที่จะประมาณค่าฟลักซ์โมเมนตัม ความดัน และตัวแปรการไหลปั่นป่วนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ประกอบด้วยเมชที่เปลี่ยนรูปร่าง และวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิด high Re k- ϵ แบบ Linear Eddy Viscosity Model ประกอบกับสมการ Boundary layer ที่ผนังแบบมาตรฐานตามกฎลอการิทึม สำหรับการไหลผ่านวัตถุผนังโค้งมากหรือวัตถุที่มีร่องโค้งได้



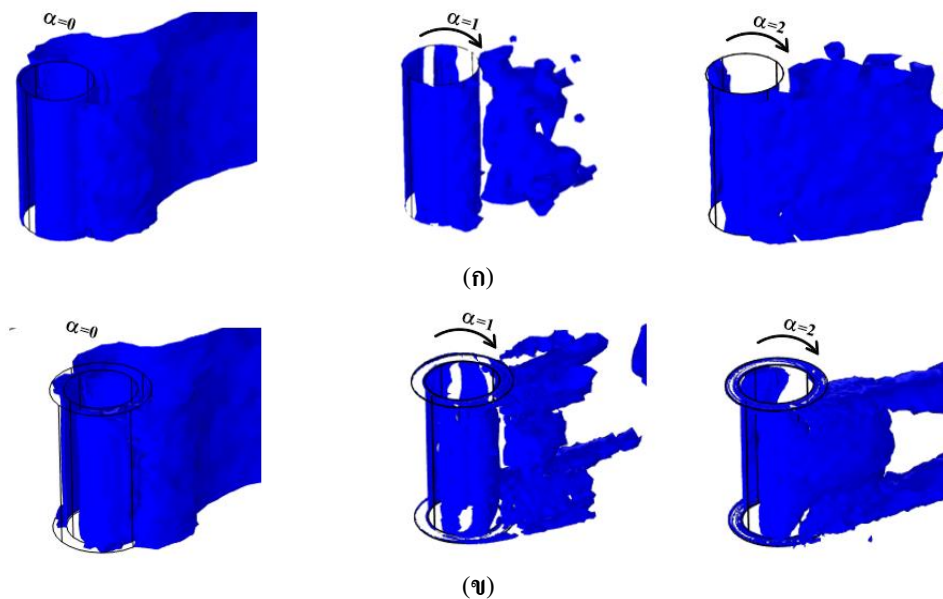
(ก)

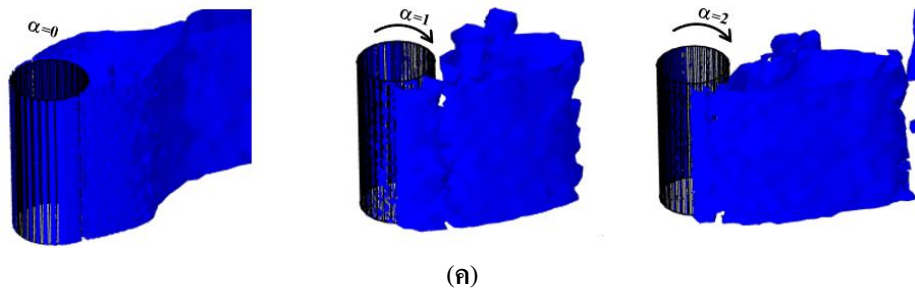


รูปที่ 10 แผนภาพพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน (ก) ของวัตถุทรงกระบอก (ข) ผนังราบเรียบ (ค) ติดตั้งดิสก์ที่ปลาย และ (ค) ผนังเซาะร่อง

ประกอบกับผลแนวโน้มขนาดแรงอากาศพลศาสตร์ได้แสดงถึงประโยชน์จากการหมุนของวัตถุที่สามารถเพิ่มแรงยกและลดระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนที่บริเวณใกล้ผนัง และระดับความรุนแรงของการกระส่ายการไหลปั่นป่วน

เพื่อใช้ออกแบบการติดตั้งชิ้นส่วนของอากาศยานทุกรูปแบบ นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้เทคนิคดิสก์ไทป์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งและของไหลในโปรแกรมที่ประมาณค่าจากเมชชนิดเดียวกัน





รูปที่ 11 แผนภาพระดับ Q-criteria iso-surface ของวัตถุทรงกระบอก (ก) ผนังราบเรียบ (ข) ติดตั้งคิส์ที่ปลาย และ (ค) ผนังเจาะร่อง ที่ระดับ 100 หน่วย

6. คำย่อและนามานุกรม

α	อัตราการหมุนไร้หน่วย	E	ค่าคงที่จากปฏิยานุพัทธ์, 0.09
β	สัดส่วนความหนืดจลน์ของความเฉื่อยกับการไหลปั่นป่วน	f	ความถี่เนื่องจากการแผ่ขยายกระแสวน
δ_{ij}	ค่าคงที่เพื่อสร้างเมทริกซ์หน่วย	H	ขนาดค่าเฉลี่ยความโค้งของผิวโครงสร้างคำนวณ
δ_{mbs}	ค่าคงตัวเพื่อความราบเรียบของความเร็ว, 0.5	h	ขนาดระยะของโครงสร้างคำนวณแบบเปลี่ยนรูป
ε	อัตราการฟุ้งกระจายของพลังงานการไหลปั่นป่วน	I	ระดับความเข้มของพลังงานการไหลปั่นป่วน
θ	มุมในการวัด	i, j, k	ตัวห้อยเพื่อระบุทิศทางในเวกเตอร์องค์ประกอบ
K	ค่าคงตัว Von Kármán, 0.41	k	พลังงานการไหลปั่นป่วน
μ, ν	ความหนืดพลศาสตร์และจลน์	k	ขนาดความลึกของการเจาะร่อง
μ_r, ν_r	ความหนืดพลศาสตร์และจลน์ของการไหลปั่นป่วน	k_p	พลังงานการไหลปั่นป่วนที่กึ่งกลางโครงสร้างติดผนัง
ρ	ความหนาแน่น	n	เวกเตอร์หน่วยตั้งฉาก
$\sigma^{(k)}$	ค่าคงที่พลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน Prandtl number, 1.0	P	ความดัน
σ_ε	ค่าคงที่อัตราการฟุ้งกระจายของพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน Prandtl number, 1.3	P_k	อัตราการทำกำไรพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน
τ_w	ความเค้นเฉือนที่ผนัง	Q	แผนภาพเสมือน 3 มิติ แบบ Q-criteria
Ω	อัตราการหมุนเฉลี่ยของกระแสวน	S	อัตราความเค้นเฉลี่ยระหว่างเลเซอร์การไหล
ω	อัตราความเร็วเชิงมุม	St	ความถี่ไร้หน่วยเนื่องจากการแผ่ขยายของกระแสวน
AR	อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	t, t*	เวลาและเวลาไร้หน่วย
C_{E1}, C_{E2}	ค่าคงที่ของเทอมความหนืดสำหรับสมการการไหลปั่นป่วน (Hanjalic and Launder, 1972), 1.44 และ 1.92	U, V, W	ความเร็วในแต่ละองค์ประกอบ
c_t	ค่าคงที่สมมูลขนาดการไหลปั่นป่วน, 2.55	U^+, y^+	ความเร็วและระยะห่างไร้หน่วย
D	เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก	U_∞	ความเร็วของไหลอิสระ
D	ค่าจำแนกความเป็นเนื้อเดียวกันของไหลเนื่องจากการฟุ้งกระจายตัว, 0	u', v'	อัตราการกวัดแกว่งจากความเร็วเฉลี่ย
		v_{mbs}	ความเร็วที่ปรับค่าความราบเรียบในโครงสร้างแบบเปลี่ยนรูป
		v_0	ค่าความเร็วในแนวตั้งฉากกับผิวที่ปะทะ
		x, y, z	ตำแหน่งในพิกัดคาร์ทีเซียน
		X	ตำแหน่งเมฆแบบเปลี่ยนรูป

y_v ความหนาของระยะชั้นย่อยหนืดของการไหล
 ∇_T การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ผิว
 DES the Detached-Eddy Simulation method
 LES the Large-Eddy Simulation method
 PANS the Partially Reynolds Averaged Navier- Stokes method
 RSM the Reynolds Stresses Equation models
 RNG the Renormalization Group method
 SIMPLE the Semi- Implicit Method for Pressure- Linkage Equation

7. กิตติกรรมประกาศ

โดยงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว) งบประมาณด้านววน. ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 แพลตฟอร์มการพัฒนากำลังคนและสถาบันความรู้รหัสโครงการ 52304

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการที่ห้องวิจัยการคำนวณทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช และการให้คำแนะนำในการใช้งานเครื่องประมวลผลสมรรถนะสูง super-micro computer และโปรแกรมเพื่อใช้วิเคราะห์โดยบริษัท ทูรูเวฟ (ประเทศไทย) จำกัด เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Magnus, “Ueber die Abweichung der Geschosse, und: Ueber eine auffallende Erscheinung bei rotirenden Körpern,” *annalen der physik*, vol. 164, no. 1, pp. 1–29, 1853, doi: 10.1002/andp.18531640102.
- [2] ENERCON, “Enercon E- Ship 1: A wind- hybrid commercial cargo ship,” presented at 4th Conference on Ship Efficiency, Hamburg, Germany, Sep. 23–24, 2013, pp. 1–26.
- [3] C. Badalamenti, “On the Application of Rotating Cylinders to Micro Air Vehicles,” PhD. Thesis, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, London, UK, 2010.
- [4] K. K. Pijush and M. C. Ira, “Boundary Layers and Related Topic,” in *Fluid Mechanics*, 3rd ed., San Diego, CA, USA: Elsevier, 2004, ch. 10, sec. 9, pp. 346–52.
- [5] E. G. Reid, “Tests of Rotating Cylinders,” NACA., Washington, DC, USA, Tech. Notes, 1924.
- [6] A. Thom, “Experiments on the Air Forces on Rotating Cylinders, Aeronautical Research Committee Reports and Memoranda,” Air Ministry, London, UK, Rep. no. 1623, Jan 1925.
- [7] B. R. Clayton, “BWEA Initiative on wind-assisted ship propulsion (WASP) ,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 19, no. 1–3, pp. 251–276, 1985, doi: 10.1016/0167-6105(85)90064-9.
- [8] K. Aoki and T. Ito, “Flow Characteristics around a Rotating Cylinder,” in *Proc. Schl. Eng. Tokai Univ.*, Tokyo, Japan, 2001, pp. 29–34.
- [9] S. Takayama and K. Aoki, “Flow characteristics around a rotating grooved circular cylinder with grooved of different depths,” *Journal of Visualization*, vol. 8, no. 4, pp. 295– 303, 2005, doi: 10.1007/BF03181548.
- [10] T. J. Craft, H. Iacovides, and B. E. Launder, “Dynamic Performance of Flettner Rotors With and Without Thom Discs,” in *TSFP7*, Ottawa, Canada, Jan. 28–31, 2012, pp. 6C13–6C18 .
- [11] S. J. Karabelas, “Large Eddy Simulation of high-Reynolds number flow past a rotating cylinder,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 31, no. 4, pp. 518–527, 2010, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.010.
- [12] A. Travin, M. Shur, M. Strelets and P. Spalart, “Detached- Eddy Simulations Past a Circular Cylinder,” *Flow, Turbulence and Combustion* ., vol. 63, pp. 293–313, 2000, doi: 10.1023/A:1009901401183.

- [13] A. Elmiligui, K. Abdol-Hamid, S. Massey and S. Pao, “Numerical Study of Flow Past a Circular Cylinder Using RANS, Hybrid RANS / LES and PANS Formulations,” in *22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit*, Providence, RI, USA, Aug. 16–19, 2004, pp. 1–18.
- [14] S. Ruchayosyothin, P. Konglerd and S. Tamna, “The computational modelling in the prediction of flow past a rotating sphere at high Reynolds number,” *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 1, 2022, Art. no. JRAME-22-10-005, doi: 10.14456/jrame.2022.5.
- [15] B. E. Launder and D. B. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974, doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
- [16] U. Piomelli, Large-eddy and direct simulation of turbulent flows, in: *9e conférence annuelle de la société Canadienne de CFD*, Ontario, Canada, May 27–19, 2001, pp. 1–60.
- [17] S. Littmarck and F. Saeidi, “About COMSOL.” COMSOL. Available: <https://www.comsol.com/>, (accessed Aug. 1, 2022).
- [18] P. R. Spalart and S. R. Allmaras, “One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows,” in *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA, Jan. 6, 1992, pp. 1–23, doi: 10.2514/6.1992-439.
- [19] S. Mittal and B. Kumar, “Flow past a rotating cylinder,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 476, pp. 303–334, 2003, doi: 10.1017/S0022112002002938.

การเปรียบเทียบผังโรงงานโดยใช้วิธี CORELAP, ALDEP และ SLP:

กรณีศึกษาโรงงานผลิตแผงวงจรพิมพ์

Comparison of Plant Layout Using CORELAP, ALDEP and SLP Methodology:

Case Study of Printed Circuit Board Manufacturing Plant

พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม¹, ศิริลักษณ์ สิทธิบูรณ์² และ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข^{2*}

¹ สาขาวิชาบริหารการปฏิบัติการ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พระบรมมหาราชวัง

พระนคร กรุงเทพมหานคร 10200

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Pichawadee Kittipanya-ngam¹, Sirirak Sitthibrun² and Kittiwat Sirikasemsuk^{2*}

¹ Department of Operations Management, Thammasat Business School, Thammasat University, Phra Barom Maha

Ratchawang, Phra Nakhon, 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: kittiwat.sirikasemsuk@gmail.com

Received: Apr 18, 2022; Revised: Sep 07, 2022; Accepted: Sep 08, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการออกแบบแผนผังโรงงาน สำหรับการผลิตอุปกรณ์ที่ยึดอยู่บนผิวแผงวงจรพิมพ์ การดำเนินงานวิจัยได้ประยุกต์ใช้แนวคิด 3 วิธี ได้แก่ การออกแบบผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning (SLP)) การออกแบบผังโรงงานด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (Computerized Relationship Layout Planning (CORELAP)) และการออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (Automated Layout Design Program (ALDEP)) โดยได้ทำการวางผังโรงงานทางเลือกทั้งหมด 12 แบบ และเปรียบเทียบระยะทางในการขนย้ายชิ้นงานต่อวัน พบว่า ผังโรงงานแบบที่ 1 SLP มีระยะทางในการขนย้ายชิ้นงานต่อวันต่ำสุด จากนั้นเปรียบเทียบผังโรงงานก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่า ผังโรงงานหลังปรับปรุงสามารถลดระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานลง 32.68% ในงานวิจัยฉบับนี้ในภาพรวมแล้วเทคนิค SLP จะมีประสิทธิภาพอันดับหนึ่งด้วยระยะทางเฉลี่ย 27,747 เมตรต่อวัน เทคนิค ALDEP จะเป็นอันดับสองด้วยระยะทางเฉลี่ย 29,627 เมตรต่อวัน และเทคนิค CORELAP จะเป็นอันดับที่ 3 ด้วยระยะทางเฉลี่ย 30,864 เมตรต่อวัน

คำสำคัญ: แผนผังโรงงาน, การออกแบบผังโรงงานอย่างเป็นระบบ, การพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์, การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ, แผงวงจรพิมพ์, อุปกรณ์ที่ยึดอยู่บนผิวแผงวงจรพิมพ์

Abstract

This research aimed to analyze plant layout options for the surface mount device (SMD) process. The research work applied the concept of the three algorithms, i.e., 1. systematic layout planning (SLP), 2. computerized relationship layout

planning (CORELAP), and 3. automated layout design program (ALDEP). A total of 12 alternative factory layouts were created and compared in terms of the distance of moving parts per day. It was found that the factory layout type 1 by SLP had the lowest distance for moving parts per day. When comparing the factory layout before and after the improvement, it was found that the moving distance for the layout type 1 by SLP was reduced by 32.68%. The results from this research showed that the SLP and ALDEP techniques ranked first and second, with an average distance of 27,747 and 29,627 meters per day, respectively, in terms of effectiveness. The CORELAP technique seemed very inferior among all three techniques, with an average distance of 30,864 meters per day.

Keywords: Factory Layout, SLP, CORELAP, ALDEP, Printed Circuit Board, Surface Mount Device

1. บทนำ

ในปัจจุบันเศรษฐกิจของโลกมีการเปลี่ยนแปลงแบบกราฟเอ็กซ์โพเนนเชียล ทำให้องค์กรต้องมองหาหนทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Productivity) เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน ดังนั้นจำเป็นต้องลดระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนกเพื่อไม่ให้เกิดระยะเวลาที่สูญเสียไปขณะการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนก เพราะเมื่อเกิดระยะเวลาที่สูญเสียไปในการผลิตน้อยลงส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Productivity) มากยิ่งขึ้น

บริษัทผลิตอุปกรณ์ที่ซึ่ดอยู่บนแผงวงจรพิมพ์ (Integrated Circuit (IC)) แห่งหนึ่งในประเทศไทย เป็นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ที่ซึ่ดอยู่บนแผงวงจรพิมพ์ประเภทวงจรรวม ได้แก่ วงจรรวมที่มีขา (Lead) วงจรรวมที่ไม่มีขา (Leadless) วงจรรวมที่เป็นชิป (Reel) และวงจรรวมที่เป็นสติ๊ก (Stick) จากการศึกษาสภาพโรงงานที่เป็นกรณีศึกษาในปัจจุบัน พบว่าชั้น E3 มีสายการผลิตวงจรรวมที่มีขา 3 ประเภท ได้แก่ วงจรที่มีขา 8 ขา (SO8) วงจรรวมที่มีขา 14 ขา (SO14) และวงจรรวมที่มีขา 16 ขา (SO16) ซึ่งชั้น E3 ประกอบด้วยหลายแผนกซึ่งมีความสัมพันธ์กันและมีเส้นทางไหลที่ซับซ้อน โดยปัญหาหลักในการออกแบบ และวางผัง คือ ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนกมีระยะเวลา และระยะทางในการขนส่งที่มากเกินไปจนจำเป็นอย่างยิ่ง จากปัญหาดังกล่าว ทางคณะผู้วิจัยจึงนำเทคนิควิศวกรรมอุตสาหการมาประยุกต์ใช้เพื่อการพัฒนาและปรับปรุงผังโรงงาน โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ระยะทางในการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน และระยะเวลาในการเคลื่อนย้าย

ชิ้นงานมีอัตราที่น้อยลง เนื่องจากระยะทางในการเคลื่อนย้ายชิ้นงานที่มีความซับซ้อน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อเปรียบเทียบการออกแบบผังโรงงาน สำหรับการผลิตอุปกรณ์ที่ซึ่ดอยู่บนแผงวงจรพิมพ์หรืออุปกรณ์ SMD (Surface Mount Device) โดยการใช้วิธี SLP, CORELAP และ ALDEP นำไปสู่การลดความสูญเสียของระยะทางในการขนส่งระหว่างแผนก

โครงสร้างบทความฉบับนี้ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้ การทบทวนวรรณกรรม การศึกษาสภาพปัจจุบัน วิธีการดำเนินงานวิจัย และสรุปผลการวิจัย

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1. ทฤษฎีการออกแบบผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (SLP)

การออกแบบผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning (SLP)) คือ การวางแผนเค้าโครงอย่างเป็นระบบเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการออกแบบผังโดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างแผนกที่ทำงานกับการวางแผนที่มีความสัมพันธ์ระดับที่จำเป็นอย่างยิ่งไว้ใกล้เคียงกัน การวางแผนผังอย่างเป็นระบบ คือ วิธีการจัดระเบียบในการวางแผนผังประกอบด้วยกรอบของเฟส รูปแบบของขั้นตอน และชุดของข้อตกลงในการระบุ การให้คะแนน การแสดงภาพองค์ประกอบ และพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนผังประกอบด้วย 9 ขั้นตอน ดังนี้

1.) สำรวจข้อมูลพื้นฐานของโรงงาน P,Q,R,S,T และกิจกรรมต่างๆ

2.) วิเคราะห์ผังโรงงานจากแผนภูมิปริมาณ – ผลผลิต (P-Q Chart)

3.) วิเคราะห์การไหลของผลผลิต

4.) วิเคราะห์และสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรม

5.) สร้างแผนภาพความสัมพันธ์ของกิจกรรม

6.) กำหนดพื้นที่ที่ต้องการ

7.) ออกแบบผังโรงงานอย่างละเอียด

8.) วิเคราะห์ผลผังโรงงานทางเลือก

9.) เลือกผังที่เหมาะสมที่สุด

การออกแบบผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning (SLP)) เริ่มต้นด้วยการเก็บข้อมูล 5 ด้าน ได้แก่ ผลผลิต ปริมาณผลผลิต ลำดับการผลิต หน่วยสนับสนุนการผลิต และเวลาผลิต ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาวิเคราะห์ การไหลของวัสดุ ด้วยแผนภูมิจากถึง (From-to Chart) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วย แผนภูมิความสัมพันธ์ (Activity Relationship Diagram) เพื่อสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ (Relationship Diagram) จากนั้นจะกำหนดพื้นที่ที่ต้องการในแต่ละกิจกรรมแล้ว นำมาสร้างเป็นแผนภาพความสัมพันธ์ของพื้นที่ (Space Relationship Diagram) หลังจากที่ได้พิจารณาข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่าง ๆ ผังโรงงานทางเลือกจะถูกสร้างขึ้น ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการประเมินผังโรงงานโดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เพื่อคัดเลือกผังโรงงานที่เหมาะสมที่สุด

2.2.ทฤษฎีการวางผังโรงงานโดยการพิจารณา

ความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP)

การวางผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (Computerized Relationship Layout Planning (CORELAP)) เป็นขั้นตอนการก่อสร้างที่เก่าแก่ และเป็นที่รู้จักดีที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างผังโรงงานที่มีความสัมพันธ์ของแผนกในระดับสูงอยู่ใกล้กัน โดยมีพื้นฐานมาจากการใช้คอมพิวเตอร์ของ SLP (Muther's Systematic Layout Planning) [2]

ขั้นตอนการจัดตำแหน่งแผนกในผังด้วย CORELAP

1.) แผนกแรก que เลือกไว้ตรงกลางผัง

2.) แผนกข้างเคียงสามารถวางได้ 2 วิธี

(1) อยู่ติดกัน (ในตำแหน่ง 1, 3, 5 หรือ 7) กับแผนก 0

(2) สัมผัสกัน (ในตำแหน่ง 2, 4, 6 หรือ 8)

3.) แผนกใหม่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของค่าการให้คะแนนการจัดวาง (PR) สูงสุด

4.) การให้คะแนนการจัดวาง (PR) คือ ผลรวมของการให้คะแนนความใกล้ชิดแบบถ่วงน้ำหนักระหว่างแผนกเพื่อเข้าสู่ผัง และแผนกใกล้เคียง

2.3.ทฤษฎีการออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP)

การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (Automated Layout Design Program (ALDEP)) ได้รับการพัฒนาโดย Seehof และ Evans นอกจากนี้ยังเป็นขั้นตอนการก่อสร้างที่มีรากฐานมาจาก CORELAP วัตถุประสงค์ คือ การสร้างผังที่มีแผนกความสัมพันธ์ระดับสูง ใกล้เคียงกัน แต่ ALDEP มีลักษณะพิเศษของการสุ่มความสามารถสูงสุดสามชั้น และแผนก (ท่าเรือ ลิฟต์ ทางเดิน) ที่สามารถแก้ไขได้ ข้อมูลที่ป้อนเข้าของ ALDEP ได้แก่ ความยาว ความกว้าง, พื้นที่ของแต่ละชั้น, ที่ตั้ง และขนาดของพื้นที่ หวงห้ามแต่ละชั้น ขนาดของเก้าอี้โครง จำนวนแผนกที่จะสร้าง จำนวนกริด พื้นที่แผนก แผนภูมิความสัมพันธ์ คะแนนขั้นต่ำที่อนุญาตสำหรับรูปแบบที่ยอมรับได้ (Minimum Closeness Rating (MCR)) โดยคะแนนของความสัมพันธ์ ค่าความกว้างในการวางแผนกเริ่มต้น (Sweep Width) [3]

ขั้นตอนการทำการออกแบบผังโรงงานด้วย ALDEP

1.) กำหนดค่าตารางความสัมพันธ์

2.) กำหนดสิ่งที่ต้องป้อนข้อมูลเข้าไป

(1) ความยาว ความกว้าง พื้นที่ แต่ละชั้น

(2) จำนวนแผนกในผังโรงงาน

(3) ตารางความสัมพันธ์แต่ละแผนก

3.) ใช้รูปแบบเรียงแบบเส้นตรง โดยเริ่มจากบนซ้ายลงมา

4.) กำหนดตารางความสัมพันธ์ของแต่ละแผนก

5.) กำหนดคะแนนจากความใกล้ชิดกันของแต่ละแผนก

2.4.การทบทวนวรรณกรรมด้านการออกแบบและปรับปรุง ผังโรงงาน

การออกแบบ และวางผังโรงงาน หมายถึง การจัดวาง เครื่องมือ เครื่องจักร วัสดุ อุปกรณ์ สิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการผลิต และการเชื่อมต่อระหว่างกัน ของกิจกรรมการผลิตภายในโรงงาน อีกทั้งคำว่าสิ่งอำนวยความสะดวก หมายถึง องค์ประกอบของโรงงาน เช่น อุปกรณ์ สถานที่การทำงาน และแผนก ซึ่งการออกแบบ และวางผังโรงงานที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงปัญหาการจัดวางสิ่งอำนวยความสะดวก ต้นทุน เวลา และทรัพยากรที่ใช้ในการสร้างผัง ซึ่งผังที่ดีนั้นย่อมทำให้ ลดการจัดการวัสดุให้เหลือน้อยที่สุด รับรองความยืดหยุ่นของการวางผัง เกิดการหมุนเวียนของงานระหว่างทำสูง ลดต้นทุนในการลงทุน อุปกรณ์ เกิดการใช้พื้นที่ และพนักงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ให้ความปลอดภัย ความสะดวก แก่พนักงานขณะปฏิบัติงาน [4]

ในงานวิจัยของ Monsupee and Paveena [5] ได้วิเคราะห์ทางเลือกการวางผังโรงงานสำหรับการติดตั้งสายการผลิตชุดบังคับเลี้ยวล้อหน้าเพิ่ม 1 สายการผลิต การดำเนินงานวิจัยได้ประยุกต์ใช้แนวคิดการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ (SLP) ในการวางผังโรงงานทางเลือก และได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการในการเลือกผังโรงงานที่เหมาะสม โดยใช้การตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพตามทฤษฎีของ Little's Law ร่วมกับการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ โดยการสำรวจความคิดเห็น และได้กำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกผังโรงงาน จากคะแนนที่มีค่ามากกว่า 80% จากผลของการวิจัยพบว่า ผังโรงงานทางเลือกที่ได้จะให้ปริมาณงานระหว่างกระบวนการผลิตต่ำสุด และค่าน้ำหนักคะแนนจากวิธี กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สูงสุด และเมื่อ พ.ศ. 2562 Jenchira and Panisara [6] ได้ออกแบบ และวางผังโรงงานของโรงงานกรณีศึกษาเฟอร์นิเจอร์ไม้ โดยใช้หลักการออกแบบผังโรงงานอย่างมีระบบ (SLP) ออกแบบผัง 3 ผัง และใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) ในการตัดสินใจเลือกผังโรงงาน โดยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) โดยมีเกณฑ์อยู่

3 เกณฑ์ คือ 1. ลดระยะทาง 2. กระบวนการผลิตไหลง่าย 3. ใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเก็บข้อมูลจากสินค้าขายดีที่สุดมา 3 ผลิตภัณฑ์ จากการวิเคราะห์พบผังโรงงานแบบที่ 3 สอดคล้องกับเกณฑ์ทั้ง 3 มากที่สุด โดยมีคะแนนรวมอยู่ที่ 58.6% และใน พ.ศ. 2563 Ruephuwan [7] ได้ประเมิน และคัดเลือกผังโรงงานที่เหมาะสม โดยการพิจารณาหลายปัจจัยจึงมีความสำคัญต่อความสำเร็จขององค์กร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ (SLP) ในการประเมินผังโรงงานแบบหลายปัจจัยด้วยการบูรณาการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) การดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ขั้นที่ 1 การประยุกต์วิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ (SLP) ในการรวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต วิเคราะห์การไหลของวัสดุ และความสัมพันธ์ของกิจกรรม เพื่อกำหนดผังทางเลือก ขั้นที่ 2 เป็นการประยุกต์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) เพื่อกำหนดปัจจัย และค่าน้ำหนักปัจจัย ขั้นที่ 3 เป็นการสร้างตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายเพื่อตัดสินใจคัดเลือกผังโรงงานทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ได้ผลลัพธ์ว่าผังโรงงานแบบที่ 2 เหมาะสมที่สุด ใน พ.ศ. เดียวกัน Gozali et al. [8] ได้ออกแบบแผนผังของโรงงานผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล โดยโรงงานต้องการเพิ่มกำลังการผลิตโดยการย้ายโรงงานไปยังที่แห่งใหม่ ซึ่งกำลังการผลิตของโรงงานแห่งใหม่มีการวางแผนเพื่อให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 20 เครื่อง/ปี ในพื้นที่การผลิตรวม 5,184 ตารางเมตร การดำเนินงานใช้วิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ (SLP) ออกแบบผังโรงงานให้มีการไหลของวัสดุที่ราบรื่น จากนั้นใช้แผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรม (Activity Relationship Chart (ARC)) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของแผนกต่าง ๆ ขึ้นต่อไปของการออกแบบแผนผัง คือ การอธิบายแผนภาพความสัมพันธ์ของกิจกรรม (Activity Relationship Diagram (ARD)) และแผนภาพการจัดสรรพื้นที่ (Activity Allocation Diagram (AAD)) จากการเปรียบเทียบส่งผลให้มีแผนผังทางเลือก 2 แบบที่ดีกว่าแผนผังปัจจุบัน ซึ่งแผนผังทางเลือกที่ดีที่สุด คือ แผนผังทางเลือกที่ 1 เนื่องจากช่วยลดเวลาในการขนส่ง และเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่

ในงานวิจัยของ Pakhwan and Hathaikan [9] ได้วิเคราะห์ทางเลือกการวางผังโรงงานสำหรับโรงงานผลิตชุดเวทสูท โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดระยะทางการเคลื่อนย้ายภายในแผนประกอบชุดเวท โดยได้ออกแบบผังโรงงานทั้งหมด 3 ผัง ผังโรงงานหลังการปรับปรุงผังที่ 1 ใช้หลักการวางผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) ผังโรงงานหลังการปรับปรุงผังที่ 2 ใช้หลักการไหลแบบตัวยู (U Flow) ผังโรงงานหลังการปรับปรุงผังที่ 3 ใช้หลักการวางผังตามลักษณะผลิตภัณฑ์ (Product Layout) จากนั้นเลือกผังด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) โดยเปรียบเทียบกับ 4 เกณฑ์ ได้แก่ 1. การให้คะแนนตามระยะทาง (Distance-Based Scoring) 2. การให้คะแนนความใกล้เคียง (Adjacency-Based Scoring) 3. ข้อดี-ข้อเสีย, ต้นทุนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยพบว่าผังที่ 3 เป็นผังที่เหมาะสมที่สุดมีคะแนน 0.689 และเมื่อผังโรงงานหลังการปรับปรุงผังที่ 3 กับผังโรงงานปัจจุบันพบว่า ระยะทางในการเคลื่อนที่ลดลงร้อยละ 60.50 และในปี ค.ศ. 2015 Hakim et al. [10] ได้ปรับปรุงการออกแบบแผนผังของบริษัทฯ แห่งหนึ่งในอินโดนีเซีย โดยแผนผังในบริษัทยังไม่เหมาะสม ซึ่งแผนผังของการผลิตสำหรับบรรจุภัณฑ์รองเท้าใช้เวลาในการจัดการวัสดุมากเกินไป เนื่องจากกระบวนการที่ต่อเนื่องกันไม่ได้ยึดติดกัน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบผังใหม่ใช้วิธีการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) จากการเก็บข้อมูล และคำนวณหาค่าคะแนนความใกล้ชิดทั้งหมด (Total Closeness Rating (TCR)) จากการคำนวณผังทางเลือกมีระยะทางขนย้ายวัสดุที่สั้นลง 9.017% เมื่อเทียบกับแผนผังปัจจุบัน และในงานวิจัยของ Sembiring et al. [11] ได้ศึกษาการเพิ่มจำนวนห้องเรียน เนื่องจากจำนวนนักเรียนที่เพิ่มขึ้น จำนวนห้องที่จำกัด ราคาที่ดิน และค่าก่อสร้างโครงสร้างที่มีราคาแพง จำเป็นต้องใช้พื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ จึงออกแบบแผนผังใหม่ทำได้โดยใช้อัลกอริทึมการวางแผนความสัมพันธ์ด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) อ้างอิงคะแนนความใกล้ชิดทั้งหมด (TCR) โดยคำนวณระยะกำลังสองระหว่างหน่วยงานตามพิกัดจุด

ศูนย์กลางของหน่วยงาน ระยะทางที่ได้จะถูกคูณด้วยกระแสของวัสดุจากเมทริกซ์แผนภูมิจากไปยัง (Form to Chart) การวิเคราะห์ทำได้โดยการเปรียบเทียบระยะทางทั้งหมดระหว่างแผนผังก่อนปรับปรุงกับแผนผังทางเลือก จากนั้นดูกิจกรรมที่ดำเนินการในแต่ละห้อง ผลลัพธ์ของการประมวลผลอัลกอริทึม CORELAP ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ห้องจาก 53.67% เป็น 93.74% และในปี ค.ศ. 2019 Tarigan et al. [12] ได้ศึกษาบริษัทที่ทำธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตคอนกรีต ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ระยะเวลาในการขนส่งของแผนกเบตซ์กับสถานีหล่อ มีกิจกรรมที่ไม่เกิดการเพิ่มมูลค่าทำให้ระยะเวลาในการรอคอยที่นาน จึงต้องมีการออกแบบแผนผัง โดยใช้การปรับปรุงแผนผังแบบการวางผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) จากการทำการทดลองก่อนการปรับปรุงพบว่า มีกิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่าในกระบวนการผลิตคอนกรีตเป็นเวลา 10,123.40 วินาทีจากการใช้อัลกอริทึมแบบการวางผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) เข้ามาช่วยส่งผลให้เวลาของกิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่าในกระบวนการผลิตคอนกรีตเหลือ 3,203.20 วินาที และในงานวิจัยของ Jati et al. [13] ได้ออกแบบแผนผังของหมู่บ้านในชอกยาคาร์ดาซึ่งสถานที่แห่งนี้มีศักยภาพในด้านการท่องเที่ยว วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อช่วยเหลือชาวบ้านในการวางแผนผังสถานที่ของหมู่บ้านการศึกษา การดำเนินงานได้ใช้การออกแบบผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) ในการออกแบบแผนผังสถานที่ท่องเที่ยวทั้ง 24 แห่ง และใช้แผนภาพความสัมพันธ์ของกิจกรรมโดยพิจารณาจากคะแนนความใกล้ชิดโดยรวม (TCR) ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพแผนผังทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์การพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) เพื่อให้ได้แผนผังที่เหมาะสมที่สุด

ในปี ค.ศ. 2020 Budianto et al. [14] ได้ปรับปรุงแผนผังของโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ โดยโรงงานนี้ได้ประสบกับปัญหาความล่าช้าในการดำเนินการเนื่องการมีเส้นทางไหลที่ซับซ้อนจากการออกแบบ และวางผังโรงงาน

โดยวิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ (SLP) ในการดำเนินงานได้ใช้ซอฟต์แวร์การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP) เพื่อแก้ปัญหาเส้นทางการไหลที่ซับซ้อนส่งผลให้ต้นทุนการจัดการวัสดุมีราคาแพง โดยการเปรียบเทียบวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในการลดต้นทุนการจัดการวัสดุ ผลการศึกษานี้ระบุว่าวิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ ลดต้นทุนการจัดการวัสดุลง 6.92% เป็น 706,372.591 รูปี ซอฟต์แวร์การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP) ลดต้นทุนการจัดการวัสดุลง 11.14% เป็น 674,379.464 รูปี จากผลลัพธ์เหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าเลย์เอาต์ที่ดีที่สุดคือซอฟต์แวร์การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP) เนื่องจากการลดต้นทุนการจัดการวัสดุที่ถูกที่สุดและในปี ค.ศ. เดียวกัน Jati et al. [15] ได้ปรับปรุงแผนผังของบริษัทผลิตซิลิโคนกริปเปอร์ บริษัทนี้ได้ประสบกับปัญหาในการเคลื่อนย้ายวัสดุซึ่งมีระยะทางการขนย้ายวัสดุที่ไกล ส่งผลให้การไหลของการผลิตหยุดชะงัก ผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) และการออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP) ซึ่งวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบผังโรงงานให้สามารถลดระยะทางการเคลื่อนย้ายวัสดุ ผลการวิจัยพบว่าการออกแบบผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) ลดระยะทางการขนย้ายวัสดุจาก 14,495.08 เมตร/เดือน เป็น 5,930.19 เมตร/เดือน และการออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP) ลดระยะทางการขนย้ายวัสดุ 7,369.7 เมตร/เดือน

จากการทบทวนวรรณกรรมส่งผลให้ผู้วิจัยได้คัดเลือกวิธีการออกแบบแผนผังโรงงานทั้งหมด 3 วิธีซึ่งจัดว่าเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง และถือว่าเป็นเทคนิคพื้นฐานที่สำคัญของการจัดผังโรงงาน ได้แก่

1. การวางผังอย่างเป็นระบบ (SLP) เป็นการวางแผนผังของโรงงานอย่างเป็นสัดส่วนและเหมาะสม โดยมีหลักการพื้นฐานที่คำนึงถึง ได้แก่ ความสัมพันธ์ (Relationship) เนื้อที่ (Space) และการปรับจัดตำแหน่งที่ตั้ง (Adjustment) ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนเองได้ง่าย [16]

2. การออกแบบผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) เป็นวิธีการวางผังที่ใช้ความสัมพันธ์ของแผนกที่มีความสัมพันธ์กันมากมาจัดอันดับในการเริ่มต้นก่อนสามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณและสร้างผังขึ้นมาเพื่อให้ได้คะแนนของระยะทางบนพื้นฐานของเส้นทแยงมุม (Rectilinear Path) ที่สุดแล้วหุ้ดการวนรูป วิธีการ CORELAP สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายกว่าวิธีการ ALDEP แต่อาจจะให้รูปร่างผังที่ไม่ใช่สี่เหลี่ยม [17]

3. การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP) จะเป็นการวางผังแบบสุ่มโดยยังไม่สนใจความสัมพันธ์ระหว่างแผนกในตอนเริ่มต้น สามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณและสร้างผังขึ้นมาเพื่อให้ได้คะแนนที่อยู่ติดกันสูงที่สุดแล้วหุ้ดการวนรูป ทำให้ได้ผังที่หลากหลายและมีลักษณะของผังเป็นสี่เหลี่ยมที่สวยงาม ข้อเสียของวิธีการ ALDEP วิธีทำแบบเหวี่ยงแหเพื่อให้ครอบคลุมงานในวงกว้างอย่างไม่จำเพาะเจาะจง จึงทำให้คุณภาพและคะแนนที่อยู่ติดกัน (Adjacency Scoring Value) ถูกจำกัด และข้อเสียอีกข้อคือไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายในแต่ละผัง [17]

ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ใช้ระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนกคูณกับจำนวนความถี่การเคลื่อนย้าย จะได้เป็นระยะทางทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมดต่อวันของแผนก ซึ่งนำไปใช้ในการพิจารณาแผนภูมิความสัมพันธ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pakhwan and Hathaikan [9], Hakim et al. [10] และ Jati et al. [15]

อนึ่ง จะเห็นว่างานวิจัยฉบับนี้จะคล้ายกับงานวิจัยของ Ruephuwan [7] ซึ่งได้ออกแบบแผนผังโรงงานทั้งหมด 3 ผัง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ออกแบบแผนผังโรงงานด้วย 3 วิธี มีทั้งหมด 12 ผัง วิธีละ 4 ผัง ซึ่งผู้จัดทำเล็งเห็นว่าแผนผังโรงงานมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ โดยแผนผังโรงงานของแต่ละวิธีสามารถดัดแปลงผังให้เกิดเป็นผังใหม่ ซึ่งมีความแตกต่างจากผังเดิมได้

3. การศึกษาสภาพปัจจุบัน

จากสภาพปัจจุบันผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการผลิตวงจรรวมประเภทอุปกรณ์ที่ยึดอยู่บนผิวแผงวงจรพิมพ์หรืออุปกรณ์ SMD (Surface Mounting Device (SMD)) ในชั้น E3 ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ได้แก่ SO8, SO14 และ SO16 ซึ่งต่อไปจะขอเรียกวางจรรวม SO14 และ SO16 เป็น SO14, 16 เนื่องจากสามารถใช้เครื่องจักรชนิดเดียวกันในการผลิตและเพื่อความสะดวกในการเขียนงานของผู้วิจัย

กระบวนการผลิตวงจรรวม SMD สามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่

- 1.) กระบวนการผลิต SO8
- 2.) กระบวนการผลิต SO14, 16
- 3.) กระบวนการสนับสนุนผลิต SO8
- 4.) กระบวนการสนับสนุนผลิต SO14, 16
- 5.) แผนก Kitting Room (กระบวนการสนับสนุนผลิต)
- 6.) กระบวนการทดสอบเวเฟอร์

กำหนดให้

อักษรตัว “A” คือ แผนกกระบวนการผลิต SO8

อักษรตัว “B” คือ แผนกกระบวนการผลิต SO14, 16

อักษรตัว “C” คือ แผนกทดสอบเวเฟอร์

อักษรตัว “D” คือ แผนกสนับสนุนการผลิต SO8, SO14, 16 และแผนก Kitting Room

3.1. กระบวนการผลิตวงจรรวมประเภทอุปกรณ์ที่ยึดอยู่บนผิวแผงวงจรพิมพ์ (หรืออุปกรณ์ SMD) ใน ชั้น E3

กระบวนการผลิต SO8 จะประกอบด้วย 10 แผนก ได้แก่

A1 Mark Led Frame (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ B1 Mark Lead Frame)

A2 Die Attach SO8

A3 Oven Room (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ B3 Oven Room)

A4 Wire Bond SO8

A5 Mold SO8

A6 Post Mold Cure (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ B6 Post Mold Cure)

A7 Dam Bar and Cut SO8

A8 Final Test (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ B8

Final Test)

A9 Mark SO8

A10 Trim Form and Cut SO8

กระบวนการผลิต SO14, 16 จะประกอบด้วย 9 แผนก ได้แก่

B1 Mark Lead Frame (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ A1 Mark Lead Frame)

B2 Die Attach SO14, 16

B3 Oven Room (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ A3 Oven Room)

B4 Wire Bond SO14, 16

B5 Mold SO14, 16

B6 Post Mold Cure (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ A6 Post Mold Cure)

B7 Dam Bar and Cut SO14, 16

B8 Final Test (ใช้พื้นที่และเครื่องจักรร่วมกันกับ A8 Final Test)

B9 Trim Form and Mark SO14, 16

ชั้น E3 มีขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 1 โดยเริ่มจากกระบวนการมาร์คหีดเฟรม (Mark Lead Frame) แผนก A1, B1 เป็นขั้นตอนการทำสัญลักษณ์ลงบนแผ่นตะกั่ว ขั้นตอนต่อไป คือ กระบวนการไดแอตแทค (Die Attach) แผนก A2, B2 เป็นขั้นตอนการประกอบได และแผ่นตะกั่วเข้าด้วยกาวอีพอกซีเงิน (Silver Epoxy) จากนั้นเข้าสู่กระบวนการอบ (Oven Room) แผนก A3, B3 เป็นขั้นตอนนำชิ้นงานไปอบด้วยเครื่องอบให้กาวอีพอกซีแห้ง ต่อไปเข้าสู่กระบวนการไวบอนด์ (Wire Bond) แผนก A4, B4 เป็นขั้นตอนเชื่อมลวดทองระหว่างไดกับขาหีดเฟรม ต่อไป คือ กระบวนการโมลด์ (Mold) แผนก A5, B5 เป็นขั้นตอนการฉีดสารคอมปาวด์ (Compound) เข้าไปในโมลด์ ถัดไป คือ กระบวนการโพสโมลด์เคียว (Post Mold Cure) แผนก A6, B6 นำชิ้นงานไปอบ (Cure) เพื่อให้สารคอมปาวด์แข็งตัว จากนั้นเข้าสู่กระบวนการแดมบาแอนคัท (Dam Bar and Cut) แผนก A7, B7 เป็นขั้นตอนการตัดเหล็กเส้นด้วยเลเซอร์ ต่อไป คือ กระบวนการไฟนอลเทส

(Final Test) แผนก A8, B8 เป็นขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติการใช้งานของวงจรรวม จากนั้นเข้าสู่กระบวนการมาร์ค (Mark) แผนก A9 เป็นขั้นตอนการทำสัญลักษณ์ลงบนวงจรรวมเพื่อป้องกันข้อมูล สุดท้ายคือกระบวนการทิมฟอร์มแอนคัท (Trim Form and Cut) แผนก A10 เป็นขั้นตอนการตัด และพับปลายขาของลวดวงจรรวม

3.2.กระบวนการสนับสนุนผลิต SO8, SO14, 16 และแผนก

Kitting Room

ในชั้น E3 ยังมีกระบวนการสนับสนุนผลิต SO8, SO14, 16 จากรูปที่ 2 โดยแผนก D1 QA ตรวจสอบเส้นลวดที่แผนก A4 Wire Bond SO8 และแผนก B4 Wire Bond SO14, 16 ต่อไปแผนก D2 Classette เป็นแผนกวางภาชนะที่ทำความสะอาดเสร็จ ถัดไปแผนก D4 Compound เป็นแผนกที่เก็บเม็ดพลาสติก (Compound) โดยพนักงานจะขนเม็ดพลาสติกไปที่ที่แผนก A5 Mold SO8 และแผนก B5 Mold SO14,16 จากนั้นแผนก D5 X-Ray จะตรวจสอบชิ้นงานทั้งหมด และแผนก D6 Kitting Room เป็นแผนกเก็บอุปกรณ์ เช่น กาว แพลงขัด เทป กระดาษ เป็นต้น

3.3.กระบวนการทดสอบเวเฟอร์

จากรูปที่ 2 แผนก C1 Wafer Test กระบวนการทดสอบแผ่นเวเฟอร์เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาคุณสมบัติ และประสิทธิภาพในการทำงานตามที่ต้องการ

3.4.แผนผังการไหลแบบรวมของกระบวนการผลิตวงจร

รวมประเภท SMD ในชั้น E3

ผู้วิจัยได้ศึกษาแผนผังการไหลแบบรวมของกระบวนการผลิตวงจรรวม SMD สามารถเส้นทางการขนถ่ายชิ้นงานออกเป็น 6 ประเภท (ดังรูปที่ 2) ได้แก่

- 1.) เส้นทึบสีม่วง คือ กระบวนการผลิต SO8
- 2.) เส้นทึบสีน้ำเงิน คือ กระบวนการผลิต SO14, 16

3.) เส้นปะสีม่วง คือ กระบวนการสนับสนุนผลิต SO8

4.) เส้นปะสีน้ำเงิน คือ กระบวนการสนับสนุนผลิต SO14, 16

5.) เส้นทึบสีชมพู คือ กระบวนการสนับสนุนจากแผนก Kitting Room

6.) เส้นทึบสีแดง คือ กระบวนการทดสอบเวเฟอร์

จากรูปที่ 2 มีเส้นทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมด 53 เส้นทาง เมื่อนำระยะทางการขนย้ายชิ้นงานไปคูณกับจำนวนรอบการขนส่งของแต่ละเส้นทาง พบว่ามีระยะทางทั้งหมด คือ 31,449.16 เมตรต่อวัน และระยะเวลาทั้งหมด คือ 32,260.18 วินาทีต่อวัน

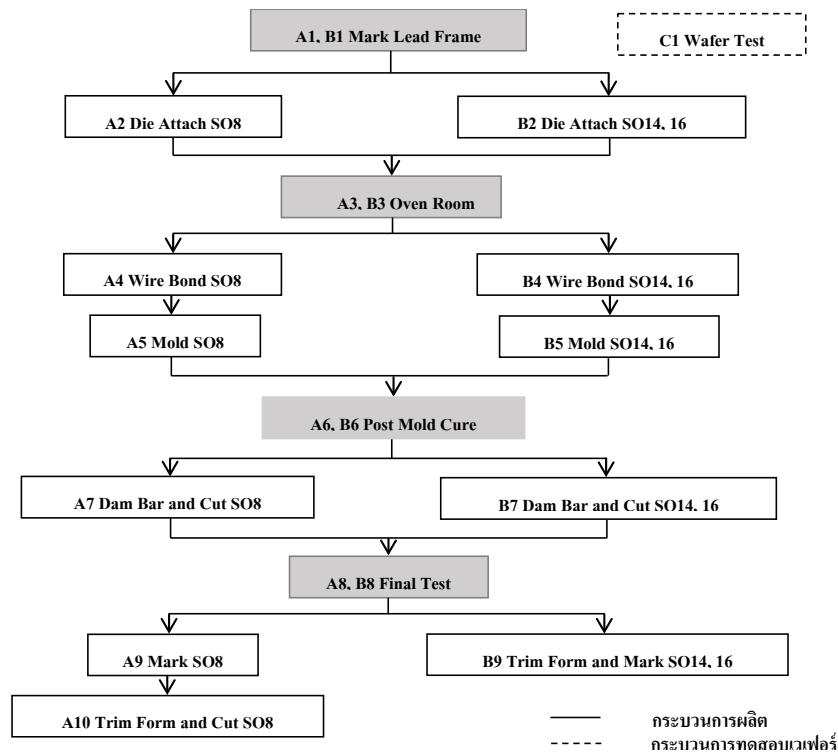
3.5.ข้อกำหนดเรื่องของห้องคลีนรูม 10k และ 100k

ห้องคลีนรูม 10k คือ ห้องที่มีอนุภาคนาขนาด 0.5 ไมครอน หรือใหญ่กว่า ไม่เกิน 10,000 อนุภาคต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต โดยมีพื้นที่เท่ากับ 1,872 ตารางเมตร ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ 36 เมตร ยาว 52 เมตร

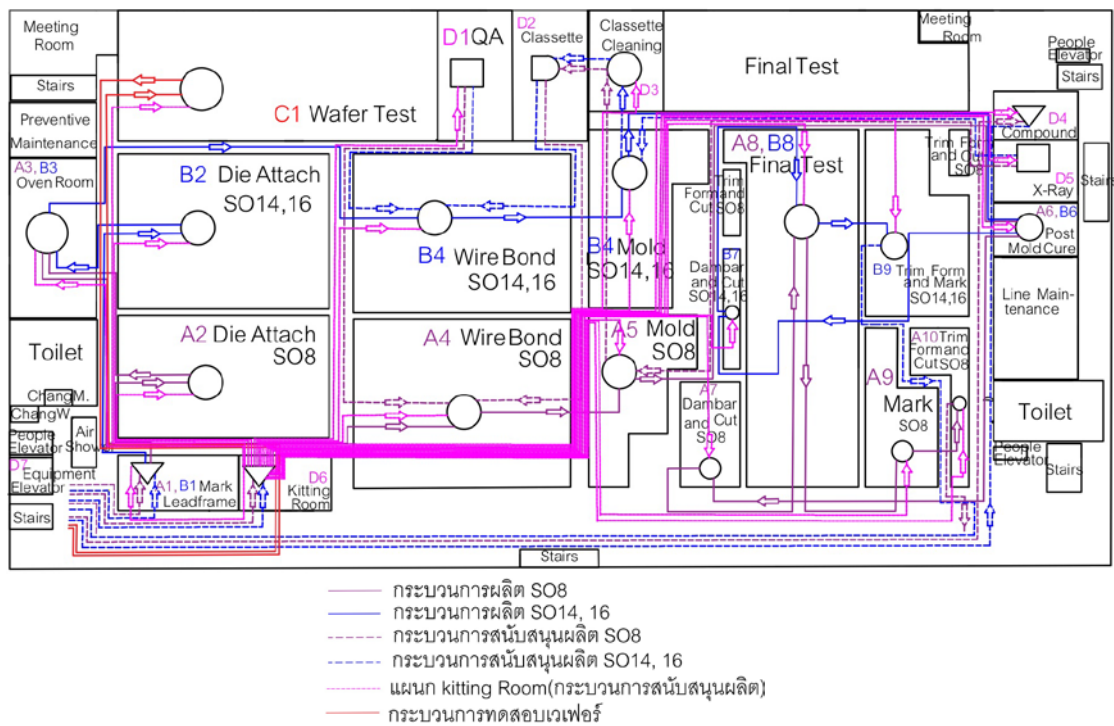
ห้องคลีนรูม 100k คือ ห้องที่มีอนุภาคนาขนาด 0.5 ไมครอนหรือใหญ่กว่า ไม่เกิน 100,000 อนุภาคต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต โดยพื้นที่ที่เท่ากับ 1,404 ตารางเมตร ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ 36 เมตร ยาว 39 เมตรพื้นที่

3.6.ปัญหาที่พบ

ปัญหาหลักของฝั่ง คือ ระยะทางในการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนกมากเกินไป เนื่องจากแผนกที่มีกระบวนการต่อเนื่องกันอยู่ใกล้กัน ซึ่งระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานมากเท่าใดจะส่งผลให้ระยะเวลาผลิตนานขึ้น และกำลังการผลิตไม่สูงสุด ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ (Key Performance Indicator (KPI)) คือ ระยะทางเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนก (เมตร)



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตวงจรรวมประเภท SMD ใน ชั้น E3



รูปที่ 2 แผนผังการไหลแบบรวมของการผลิตรวม

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการกำหนดค่าตารางความสัมพันธ์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ และ

ออกแบบแผนผังด้วย 3 วิธีทั้งหมด 12 ผัง จากนั้นเปรียบเทียบผลการจัดผัง จากนั้นเปรียบเทียบผังโรงงานก่อนและหลังการปรับปรุง

4.1. การกำหนดค่าตารางความสัมพันธ์

ระยะทางในการเคลื่อนที่ถูกพิจารณาจาก ระยะทางในการเคลื่อนที่ (เมตรต่อรอบ) คูณกับจำนวนรอบการขนส่ง (รอบต่อวัน) จะได้เป็นระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมดของพนักงานแสดงดังตารางข้างล่าง ซึ่งระยะทางการเคลื่อนที่รวม คือ 31,449.16 เมตร ตัวอย่างรายละเอียดระยะทางแสดงดังตารางที่ 1

การกำหนดค่าตารางความสัมพันธ์ กำหนดโดยข้อมูลระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมดในปัจจุบัน (แสดงตัวอย่างตามตารางที่ 1 โดยในปัจจุบันมีระยะทางการเคลื่อนที่ของ

ทั้ง 23 แผนกอยู่ทั้งหมด 253 เส้นทาง จึงได้นำระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมดในปัจจุบันเรียงจากค่ามากไปน้อย โดยกำหนดให้ [18]

- ความสัมพันธ์ “A” มีไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของ 253 เส้นทาง ซึ่งได้จำนวนทั้งหมด 12 จำนวน โดยมีขอบล่าง 500 และขอบบน 5,000

- ความสัมพันธ์ “E” มีไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของ 253 เส้นทาง ซึ่งได้จำนวนทั้งหมด 23 จำนวน โดยมีขอบล่าง 110 และขอบบน 599

ตารางที่ 1 ตัวอย่างระยะทางการเคลื่อนที่

ลำดับ	คำอธิบายการปฏิบัติงาน	ระหว่างแผนก		ระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด (เมตรต่อวัน)
		ระยะทาง (เมตร)	จำนวนรอบการขนส่ง (รอบต่อวัน)	
1	ย้ายรถเข็นจาก Mark Lead Frame ไป Die Attach SO8	17.91	29	519.39
2	ย้ายรถเข็นจาก Die Attach SO8 ไป Oven Room	24.67	10	246.70
3	ย้ายรถเข็นจาก Oven Room ไป Wire Bond SO8	59.81	80	4,784.80
4	ย้ายรถเข็นจาก Wire Bond SO8 ไป Mold SO8	14.95	5	74.75
5	ย้ายรถเข็นจาก Mold SO8 ไป Post Mold Cure	66.23	2	132.46
6	ย้ายรถเข็นจาก Post Mold Cure ไป Dam bar and Cut SO8	53.60	6	321.60
7	ย้ายรถเข็นจาก Dam bar and Cut SO8 ไป Final Test	40.86	8	326.88
8	ย้ายรถเข็นจาก Final Test ไป Mark SO8	38.91	6	233.46
9	ย้ายรถเข็นจาก Mark SO8 Trim Form and Cut SO8	8.15	5	40.75
10	ย้ายรถเข็นจาก Mark Lead Frame ไป Die Attach SO14, 16	32.41	100	3,241.00
11	ย้ายรถเข็นจาก Die Attach SO14, 16 ไป Oven Room	16.96	200	3,392.00
12	ย้ายรถเข็นจาก Oven Room ไป Wire Bond SO14, 16	46.91	88	4,128.08
13	ย้ายรถเข็นจาก Wire Bond SO14, 16 ไป Mold SO14, 16	18.92	32	605.44
14	ย้ายรถเข็นจาก Mold SO14, 16 ไป Post Mold Cure	48.23	6	289.38
15	ย้ายรถเข็นจาก Post Mold Cure ไป Dam bar and Cut SO14, 16	45.20	6	271.20

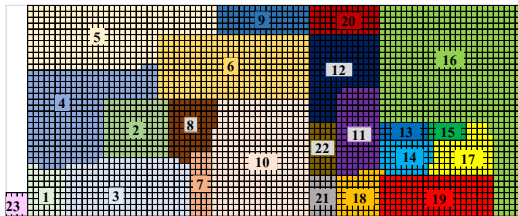
- ความสัมพันธ์ “T” มีไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ของ 253 เส้นทาง ซึ่งได้จำนวนทั้งหมด 18 จำนวน โดยมีขอบล่าง 1 และขอบบน 109

- ความสัมพันธ์ “O” มีไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ของ 253 เส้นทาง เนื่องจากข้อจำกัดของความสัมพันธ์ ส่งผลให้มีข้อมูลไม่เพียงพอ จึงทำให้จำนวนเท่ากับศูนย์

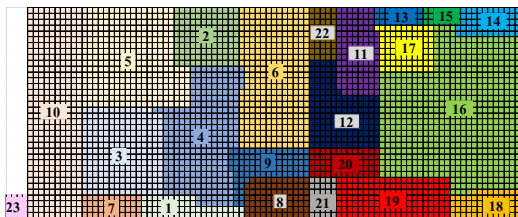
ผังโรงงานแบบที่ 2 ได้ดัดแปลงผังจากผังโรงงานแบบที่ 1 โดยได้ดัดแปลงพื้นที่ 10k ได้แก่ แผนก 1-2-4-7-8-9-10 พื้นที่ 100k ได้แก่ แผนก 11-13-14-15-17-18-20-22 ดังรูปที่ 5

ผังโรงงานแบบที่ 3 ได้ดัดแปลงผังจากผังโรงงานแบบที่ 1 โดยได้ดัดแปลงพื้นที่ 10k ได้แก่ แผนก 2-3-4-7-8 พื้นที่ 100k ได้แก่ แผนก 11-13-14-18-19-21-22 ดังรูปที่ 6

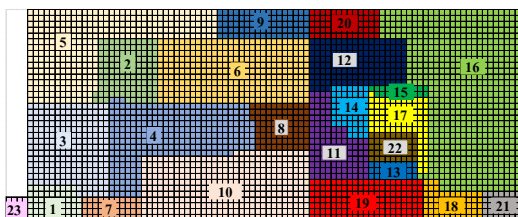
ผังโรงงานแบบที่ 4 ได้ดัดแปลงผังจากผังโรงงานแบบที่ 1 โดยได้ดัดแปลงพื้นที่ 10k ได้แก่ แผนก 1-2-3-4-5-7-8-10 พื้นที่ 100k ได้แก่ แผนก 11-13-14-15-17-18 ดังรูปที่ 7



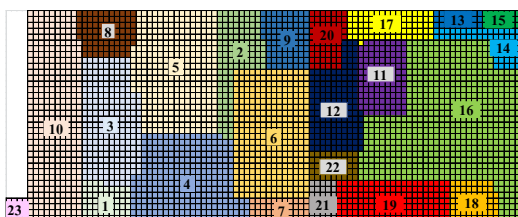
รูปที่ 4 ผังโรงงานแบบที่ 1 (SLP)



รูปที่ 5 ผังโรงงานแบบที่ 2 (SLP)



รูปที่ 6 ผังโรงงานแบบที่ 3 (SLP)



รูปที่ 7 ผังโรงงานแบบที่ 4 (SLP)

4.3. การออกแบบผังโรงงานด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP)

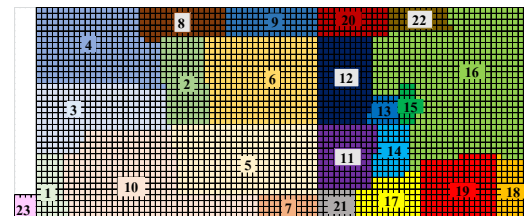
การออกแบบผังโรงงานด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ได้นำข้อมูลจากรูปที่ 3 มาวิเคราะห์หาค่าคะแนนความใกล้ชิดทั้งหมด (Total Closeness Rating (TCR)) และลำดับการจัดวาง

ผังโรงงานแบบที่ 5 ได้ใช้วิธีการออกแบบผังโรงงานด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) ดังรูปที่ 8

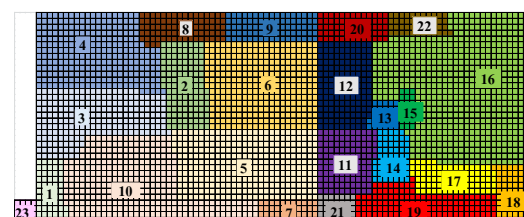
ผังโรงงานแบบที่ 6 ได้มีการดัดแปลงผังโรงงานมาจากผังโรงงานแบบที่ 5 ซึ่งได้ดัดแปลงโดยการจัดตำแหน่งแผนกที่ 18-19 ใหม่ ดังรูปที่ 9

ผังโรงงานแบบที่ 7 ได้มีการดัดแปลงผังโรงงานมาจากผังโรงงานแบบที่ 6 ซึ่งได้ดัดแปลงโดยการจัดตำแหน่งแผนกที่ 13-14-22 ใหม่ ดังรูปที่ 10

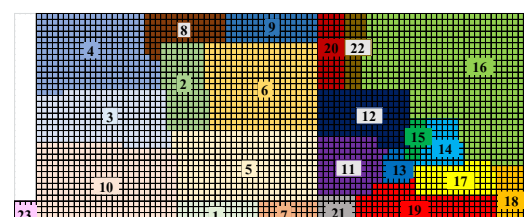
ผังโรงงานแบบที่ 8 ได้มีการดัดแปลงผังโรงงานมาจากผังโรงงานแบบที่ 7 ซึ่งได้ดัดแปลงโดยการจัดตำแหน่งแผนกที่ 3-4-10-13-14-15-22 ใหม่ ดังรูปที่ 11



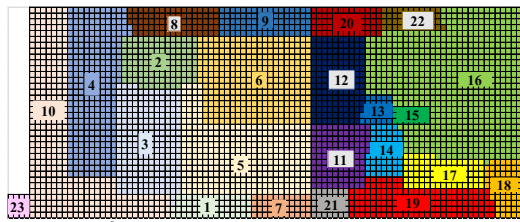
รูปที่ 8 ผังโรงงานแบบที่ 5 (CORELAP)



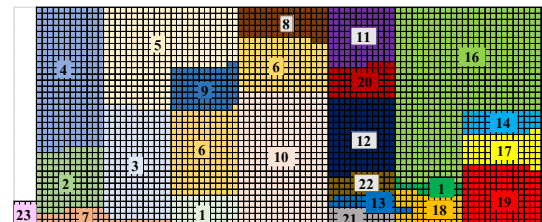
รูปที่ 9 ผังโรงงานแบบที่ 6 (CORELAP)



รูปที่ 10 ผังโรงงานแบบที่ 7 (CORELAP)



รูปที่ 11 ฟังโรงงานแบบที่ 8 (CORELAP)



รูปที่ 14 ฟังโรงงานแบบที่ 11 (ALDEP)

4.4. การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP)

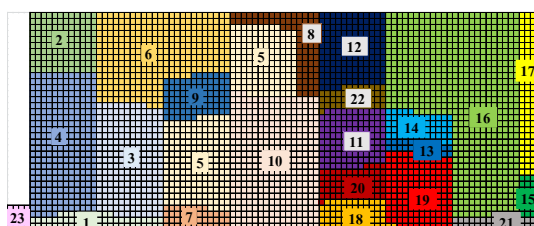
การออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ เริ่มจากกำหนดค่าความกว้างในการวางแผนเริ่มต้น (Sweep Width) สุ่มแผนแรกของพื้นที่ 10k และ 100k และได้ใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3 มาวิเคราะห์หาแผนที่มีความสัมพันธ์ เพื่อออกแบบผังทางเลือก

ผังโรงงานแบบที่ 9 กำหนดค่า Sweep Width เท่ากับ 12 โดยพื้นที่ 10k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 2 พื้นที่ 100k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 12 ดังรูปที่ 12

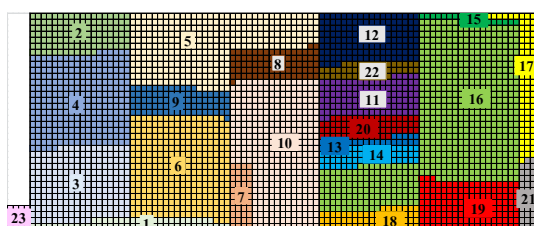
ผังโรงงานแบบที่ 10 กำหนดค่า Sweep Width เท่ากับ 18 โดยพื้นที่ 10k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 2 พื้นที่ 100k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 12 ดังรูปที่ 13

ผังโรงงานแบบที่ 11 กำหนดค่า Sweep Width เท่ากับ 12 โดยพื้นที่ 10k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 4 พื้นที่ 100k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 11 ดังรูปที่ 14

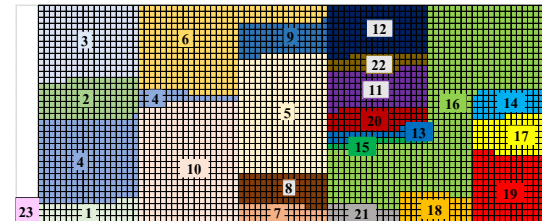
ผังโรงงานแบบที่ 12 กำหนดค่า Sweep Width เท่ากับ 18 โดยพื้นที่ 10k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 3 พื้นที่ 100k เริ่มวางแผนแรกลงผัง คือ แผนกที่ 12 ดังรูปที่ 15



รูปที่ 12 ฟังโรงงานแบบที่ 9 (ALDEP)



รูปที่ 13 ฟังโรงงานแบบที่ 10 (ALDEP)



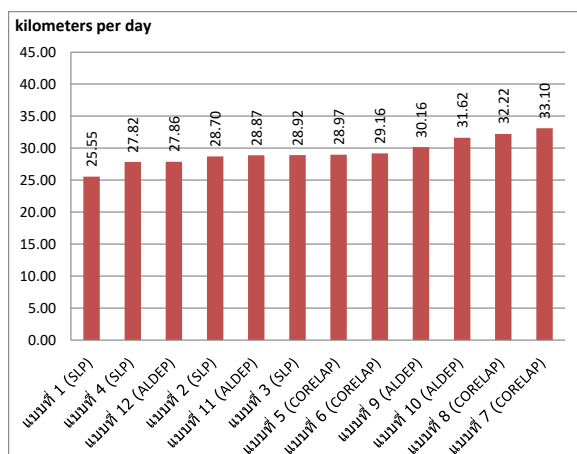
รูปที่ 15 ฟังโรงงานแบบที่ 12 (ALDEP)

4.5. การเปรียบเทียบผลการจัดผังของทั้ง 3 วิธี

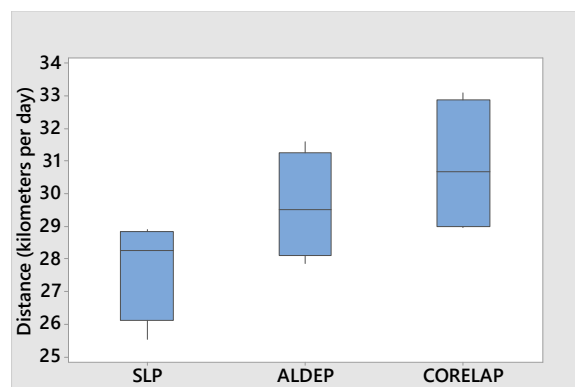
การเปรียบเทียบการจัดผังโรงงานเริ่มจากเก็บข้อมูลระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานจากตำแหน่งกึ่งกลางของแผนก ไปยังกึ่งกลางของอีกแผนกที่มีความสัมพันธ์กัน โดยระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานคูณกับจำนวนความถี่การเคลื่อนย้าย จะได้ระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมดต่อวัน จากการเปรียบเทียบผังโรงงานทางเลือกทั้ง 12 แบบพบว่า ผังที่มีระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมดต่อวันน้อยที่สุด คือ ผังโรงงานแบบที่ 1 SLP 25,551.60 เมตรต่อวัน รองลงมา คือ ผังโรงงานแบบที่ 4 SLP 27,822.40 เมตรต่อวัน ลำดับถัดมา คือ ผังโรงงานแบบที่ 12 ALDEP 27,862.20 เมตรต่อวัน ซึ่งตารางที่ 2 และรูปที่ 16 แสดงผลลัพธ์ โดยจัดลำดับจากน้อยไปมาก

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยระยะทางของวิธีการทั้ง 3 วิธีโดยภาพรวม จะเห็นได้ว่า เทคนิค SLP จะมีประสิทธิภาพอันดับที่ 1 ด้วยระยะทางเฉลี่ย 27,747 เมตรต่อวัน (หรือคิดเป็น 27.74 กิโลเมตรต่อวัน) และเทคนิค ALDEP จะเป็นอันดับที่ 2 ด้วยระยะทางเฉลี่ย 29,627 เมตรต่อวัน (หรือคิดเป็น 29.62 กิโลเมตรต่อวัน) และเทคนิค CORELAP จะเป็นอันดับที่ 3 ด้วยระยะทางเฉลี่ย 30,864 เมตรต่อวัน (หรือคิดเป็น 30.86 กิโลเมตรต่อวัน) สามารถได้

ดังรูปที่ 17 แสดงแผนภาพกล่อง (Box Plot)



รูปที่ 16 ระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมด



รูปที่ 17 แผนภาพกล่อง (Box Plot) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง 3 วิธี

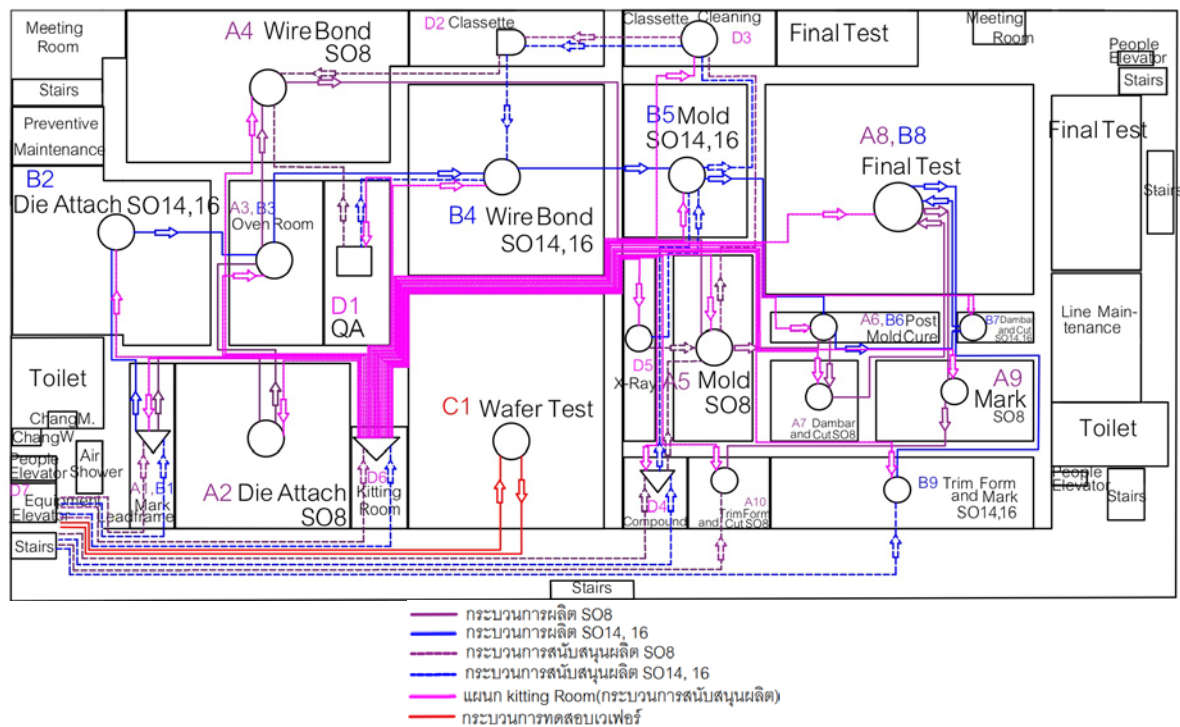
ตารางที่ 2 ระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมด

ผังโรงงาน	ระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานต่อวัน (เมตรต่อวัน)
แบบที่ 1 (SLP)	25,551.6
แบบที่ 4 (SLP)	27,822.4
แบบที่ 12 (ALDEP)	27,862.2
แบบที่ 2 (SLP)	28,699.1
แบบที่ 11 (ALDEP)	28,870.7
แบบที่ 3 (SLP)	28,915.9
แบบที่ 5 (CORELAP)	28,969.7
แบบที่ 6 (CORELAP)	29,164.1
แบบที่ 9 (ALDEP)	30,155.4
แบบที่ 10 (ALDEP)	31,617.9
แบบที่ 8 (CORELAP)	32,219.7
แบบที่ 7 (CORELAP)	33,101.9

4.6. การเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 16 พบว่า แผนผังโรงงานทางเลือกที่มีระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานต่อวันน้อยที่สุด คือ ผังโรงงานแบบที่ 1 SLP ซึ่งได้มีการนำไปผังทางเลือกไปออกแบบและวางลงในแผนผังจริง โดยหลักการวางลงในผังจริงนั้นจะต้องคำนึงถึงตำแหน่งแผนกของผังโรงงานแบบที่ 1 SLP ขนาดของถนนในการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน ซึ่งเท่ากับ 1.46

เมตร โดยรถเข็นสามารถสวนทางกันได้ทั้งสองทิศทาง ตำแหน่งบันไดในทางหนีไฟกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินในปัจจุบันทั้ง 3 ตำแหน่งได้แก่ ซ้ายบน กลางล่าง และขวาบน ตำแหน่งของแผนกที่ไม่ได้อยู่ในขอบเขตซึ่งต้องคงตำแหน่งเดิมไว้เพื่อความเหมาะสมในการวางตำแหน่งของแผนก สามารถแสดงการวางผังโรงงานหลังการปรับปรุงได้รูปที่ 18



รูปที่ 18 แผนผังโรงงานหลังการปรับปรุง

จากการเก็บข้อมูลระยะทางของผังโรงงานหลังการปรับปรุง พบว่า มีระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานต่อวันเท่ากับ 21,170.27 เมตรต่อวัน ซึ่งผังก่อนการปรับปรุงมีระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานต่อวันเท่ากับ 31,449.16 เมตรต่อวัน ดังนั้นผังโรงงานหลังการปรับปรุงสามารถช่วยลดระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานต่อวันเท่ากับ 10,278.89 เมตรต่อวัน

5. สรุปผลการวิจัย

ระยะทางการเคลื่อนย้ายที่เป็นความสูญเปล่าเกิดจากการออกแบบผังโรงงานที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้องค์กรมีศักยภาพในการผลิตไม่เต็มที่ ประกอบกับในปัจจุบันโลกแห่งเทคโนโลยี อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนแผงวงจรพิมพ์มีความต้องการจากลูกค้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาบริษัทผลิตอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนแผงวงจรพิมพ์แห่งหนึ่งในประเทศไทย หลังจากการสำรวจปัญหาชั้น E3 ประกอบด้วยหลายแผนกซึ่งมีความสัมพันธ์กันแต่ไม่อยู่ใกล้กัน และมีเส้นทางการไหลที่ซับซ้อน พบว่า ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนกมีระยะเวลา และระยะทางในการเคลื่อนย้ายชิ้นงานที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการออกแบบแผนผังโรงงาน สำหรับการผลิตอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนแผงวงจรพิมพ์ (หรืออุปกรณ์ SMD) โดยการใช้วิธี SLP, CORELAP และ ALDEP นำไปสู่การลดความสูญเปล่าของระยะทางในการขนส่งระหว่างแผนก

จากปัญหาระยะทางในการเคลื่อนย้ายชิ้นงานที่มากเกินไปจนทำให้เกิดความสูญเปล่าในการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน ผู้จัดทำจึงได้เก็บข้อมูลระยะทางในการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างแผนก และเก็บข้อมูลจำนวนความถี่การเคลื่อนย้าย เพื่อวิเคราะห์แผนภูมิความสัมพันธ์ (Relationship Chart) และออกแบบแผนผังโรงงานทางเลือก 12 ผัง

ผลสรุปที่สำคัญของงานวิจัย มีดังนี้

1.) จากการออกแบบผังโรงงานทางเลือก พบว่า ผังทางเลือกที่ระยะทางการขนส่งชิ้นงานน้อยที่สุด คือ ผังโรงงานแบบที่ 1 SLP ซึ่งได้นำตำแหน่งแผนกมาจัดวางลงผัง หลังการปรับปรุงมีระยะทางการขนส่งชิ้นงานทั้งหมด 21,170.27 เมตรต่อวัน ลดระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานต่อวันเท่ากับ 10,278.89 เมตรต่อวัน หรือลดลงไป 32.68%

2.) จากภาพรวมของแผนภูมิแท่งรูปที่ 16-17 พบว่า วิธี SLP เป็นวิธีที่เหมาะสมในการออกแบบแผนผังโรงงานมากที่สุด เนื่องจากระยะทางเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมดอยู่ใน 6 อันดับแรก รองลงมาวิธี ALDEP เนื่องจากมีภาพรวมของระยะทางเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมดอยู่ใน 10 ลำดับแรก โดยวิธี CORELAP เป็นวิธีที่ไม่ควรเลือกใช้ เนื่องจากมีภาพรวมของระยะทางเคลื่อนย้ายชิ้นงานทั้งหมดอยู่ใน 6 ลำดับสุดท้าย

ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปเสนอองค์กรเพื่อใช้ในการออกแบบแผนผังให้มีความเหมาะสมต่อการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน

งานวิจัยฉบับนี้จะออกแบบแผนผังโรงงานใหม่เพื่อลดระยะทางและระยะเวลาในการเคลื่อนย้ายชิ้นงานลงเป็นหลัก แต่ผลพลอยได้จากงานวิจัยฉบับนี้ช่วยปรับปรุงในเรื่องของเส้นทางที่ทับกันหรือตัดกันและการรอกอยของแผนกถัดไปด้วย

เนื่องจากการออกแบบผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning (SLP)) เป็นการวางแผนผังของโรงงานอย่างเป็นสัดส่วนและเหมาะสม โดยมีหลักการพื้นฐานที่คำนึงถึง ได้แก่ ความสัมพันธ์ (Relationship) เนื้อที่ (Space) และการปรับจัดตำแหน่งที่ตั้ง (Adjustment) เหมาะกับการจัดผังด้วยมือ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนเองได้ง่าย (โดยทั่วไปวิธีการ SLP ยังไม่เหมาะกับการจัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยตรง) ในขณะที่ การวางแผนผังโรงงานโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CORELAP) และการออกแบบผังโรงงานด้วยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (ALDEP) ควรต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการทำซ้ำหลาย ๆ ผังโรงงานมาเปรียบเทียบกันเอง ดังนั้นถ้าใช้จำนวนผังโรงงานที่ถูกออกแบบขึ้นมามีอย่างจำกัด การออกแบบผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (SLP) จึงถูกแนะนำด้วยการจัดผังแบบมือ (Manual) เพราะมีโอกาสที่ได้รับผังโรงงานที่มีระยะทางที่สั้นกว่าวิธีอื่น

ข้อจำกัดในงานวิจัยฉบับนี้ คือ พื้นที่ในการวางแผนผังของแต่ละแผนกจำเป็นต้องแบ่งตามห้องความสะอาด (คลีนรูม) ทั้ง 2 ผัง ทำให้แผนกถูกจำกัดไว้ในฝั่งใดฝั่งหนึ่ง ทำให้ไม่เกิดความแตกต่างของการออกแบบและวางแผนผังโรงงานใหม่

อีกทั้งการพิจารณาเกณฑ์ระยะทางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานเพียงเกณฑ์เดียวอาจจะทำให้ผังทางเลือกโดดเด่นเฉพาะเกณฑ์ระยะทางเพียงเกณฑ์เดียวเท่านั้น เพราะไม่ได้พิจารณาเงินลงทุน กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

อนึ่ง ในช่วงเริ่มต้นของการศึกษา ผู้วิจัยได้พิจารณาพื้นที่ขั้นต่ำสุดที่ต้องการ (มีหน่วยเป็นตารางเมตร) ซึ่งได้รวมพื้นที่อำนวยความสะดวก พื้นที่ว่างของแต่ละแผนก และพื้นที่ที่จำเป็นต่อการทำงานของแต่ละแผนกไปแล้ว ซึ่งถือว่าเป็นขนาดพื้นที่ที่พนักงาน (หรืออุปกรณ์ เครื่องจักร) สามารถทำได้เหมาะสมและสะดวก นอกจากนี้การจัดผังโรงงานทั้ง 3 วิธี ผู้วิจัยได้กำหนดให้แต่ละแผนกมีพื้นที่เท่ากัน ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยจึงไม่ได้กล่าวถึงเรื่องของผลลัพธ์ของความยืดหยุ่นของพื้นที่ การใช้ประโยชน์ของพื้นที่ และพื้นที่ว่าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Shengsong, W. Min and H. Zhijian, "Hybrid algorithm of chaos optimisation and SLP for optimal power flow problems with multimodal characteristic," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 5, pp. 543-547, 2003, 10.1049/ip-gtd:20030561.
- [2] R. Mother, "Chart the relationships," in *Systematic Layout Planning*, 2nd ed., Boston, MA, USA: Cahnners Books, 1973, ch. 1, pp. 3-14.
- [3] R. J. Najy, "Design Technology for Layout," *Journal of University of Babylon*, vol 22, no.4, pp. 832-844, 2014.
- [4] T. Somsak, "Introduction of plant layout and design," in *Plant Layout and Design*, 12nd ed., Bangkok, Thailand: Technology Promotion Association (Thai-Japanese), 2002, ch. 1, pp. 5-12.
- [5] W. Monsupree and C. Paveena, "Analysis of Front-axle Line Layout Alternatives", *Engineering journal*, vol. 3, no. 3, pp. 19-34, 2012, doi: 10.4186/ejth.2011.3.3.19.

- [6] S. Jenchira and K. Panisara, "Plant layout and Design of Furniture Factory," B.E. project, Dept. Inno Eng., Dhurakij Pundit Univ., Bangkok, Thailand, 2019.
- [7] C. Ruephuwan, "Multi-Criteria for Plant Layout Evaluation Using Analytic Hierarchy Process Combined with Goal Programming Model: A Case Study of an Automotive," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 14, no. 1, pp 28–42, 2020.
- [8] L. Gozali, L. Widodo, S. R. Nasution and N. Lim. "Planning the New Factory Layout of PT Hartekprima Listrindo using Systematic Layout Planning (SLP) Method," *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 847, no. 1, pp. 012001, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/847/1/012001.
- [9] Y. Pakhwan and T. Hathaikan, Plant Layout Improvement of Wetsuit Factory [Online]. Available: https://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/downloads/2020_03/851/Presentation.pdf
- [10] I. Hakim and M. V. Istiyanti. "Improvement of layout production facilities for a secondary packaging area of a pharmaceutical company in Indonesia using the CORELAP method," *International Journal of Technology*, vol 6, no. 6, pp. 1006–1016, 2015, doi: 10.14716/ijtech.v6i6.1449.
- [11] A. C. Sembiring, I. Budiman, A. Mardhatillah, U. P. Tarigan and A. Jawira. "An application of corelap algorithm to improve the utilization space of the classroom," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1007, No. 1, pp. 012026, doi: 10.1088/1742-6596/1007/1/012026.
- [12] U. Tarigan, F. D. Cahyo, U. P. P. Tarigan, and E. Ginting. "Facility layout design through integration of lean manufacturing method and CORELAP algorithm in concrete factory," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 505, no. 1, pp. 012015, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/505/1/012015.
- [13] N. P. Jati, A. D. I. Rahayu, S. E. Salsabila and d. A. Azzam, "Facility Layout Design with Corelap Algorithm for Educational Tour," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 982, no.1, pp. 012060, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/982/1/012060.
- [14] F. Budianto, J. Halim and A. C. Sembiring, "Redesigning Furniture Production Floors Using Systematic Layout Planning and ALDEP Method to Minimize Material Handling Costs," in *International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology*, Medan, Indonesia, Jun. 25–27, 2020, Art. no. 19890174, doi: 10.1109/MECnIT48290.2020.9166613.
- [15] U. Tarigan, R. Simbolon, M. T. Sembiring, U. P. P. Tarigan, N. Sembiring and I. R. Tarigan, "Perancangan Ulang dan Simulasi Tata Letak Fasilitas Produksi Gripper Rubber Seal dengan Menggunakan Algoritma Corelap, Aldep, dan Flexsim," *Jurnal Sistem Teknik Industri*, vol. 21, No. 1, pp. 74–84, 2019, doi: 10.32734/jsti.v21i1.905.
- [16] S. S. Heragu, "Traditional approaches to facility layout," in *Facilities design*, Boca Raton, FL, USA: Crc Press, 2018, ch. 4, pp. 75–99.
- [17] A. Langevin and D. Riopel, "Models and methods for facilities layout design from an applicability to real-world perspective," in *Logistics systems: design and optimization*, New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2005, ch. 5, pp. 123–170.
- [18] J. A. Tompkins, J. A. White, Y. A. Bozer and J. M. A. Tanchoco, "Layout planning models and design algorithms," in *Facilities planning*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010, ch. 6, sec. 2, pp. 292–363.

การประเมินความแม่นยำการประมาณการระเหยด้วยวิธี Multiple Linear Regression และสมการลดรูปแบบง่ายของ Penman

The Comparative Accuracy Evaluation of Water Evaporation using Multiple Linear Regression and Simplified Penman's Equation.

จิรเดช เสธฐกัมพู¹ และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร^{1,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สุรนารี เมือง นครราชสีมา 30000

Jiradet Settakumpoo¹ and Vacharapoom Benjaoran^{1,*}

¹School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Suranaree, Mueang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: vacharapoom@sut.ac.th

Received: May 10, 2022; Revised: Sep 07, 2022; Accepted: Sep 09, 2022

บทคัดย่อ

การประมาณค่าการระเหยที่แม่นยำนั้นทำได้ยากเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างพื้นดิน บรรยากาศ และผิวน้ำ ซึ่งมีนักวิจัยได้พัฒนาสมการประมาณการระเหยให้ง่ายขึ้น โดยอ้างอิงสมการของ Penman และยังมีการพัฒนาแบบจำลองการถดถอยเชิงสถิติของข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาสำหรับการประมาณการระเหย เพื่อให้ได้สมการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์แบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression, MLR) โดยใช้ข้อมูลย้อนหลัง 15 ปี ของจังหวัดนครราชสีมา ประกอบด้วยอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดและต่ำสุด ความเร็วลม ชั่วโมงแสงอาทิตย์และค่าการระเหย โดยแบ่งเป็น 6 แบบจำลอง ผลการวิเคราะห์ MLR แบบจำลองที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุด 83.6% (ข้อมูล 4 ตัวแปร, ย้อนหลัง 5 ปี) ซึ่งพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงและมีอิทธิพลต่อการระเหยมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิเฉลี่ย ชั่วโมงแสงอาทิตย์และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย และได้ประเมินความแม่นยำด้วยวิธีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAD) ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยกำลังสอง (MSE) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) ของสมการแบบจำลองด้วยวิธี MLR และสมการลดรูปแบบง่ายของ Penman (Simplified Penman's Equation, SPE) ในการประมาณการระเหย โดยใช้ข้อมูลการระเหยล่าสุด 10 เดือนเป็นตัวแทนค่าการระเหยจริงในพื้นที่ ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่ 2 (ข้อมูล 4 ตัวแปร, ย้อนหลัง 10 ปี) มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (MAD = 0.41, MSE = 0.29, MAPE = 7.9) ดังนั้น การเลือกสมการเหมาะสมสำหรับประมาณการระเหยควรพิจารณาทั้งความแม่นยำและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

คำสำคัญ: การระเหย, สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ, สมการลดรูปแบบง่ายของ Penman, การประเมินความแม่นยำ

Abstract

Accurately estimation of water evaporation is very difficult due to the complex relation between land, atmosphere and water surface conditions. Therefore, many researchers have improved the Penman's prediction equation and develop the statistically regression model of meteorology data that giving simple and non-complex water evaporation equation. This research uses data from the last 15 years of Nakhon Ratchasima Province consisting of the maximum and minimum temperatures, maximum and minimum

relative humidity, wind speed, sunshine hours and evaporation values. The collected data was categorized into 6 models and then analyzed by Multiple Linear Regression (MLR) method. The MLR analysis result shown Model 1 had the highest Coefficient of Determination of 83.6% (4 variables, 5 years data set), which presented the water evaporation are consecutively related to wind speed, mean temperature, sunshine hours and average relative humidity. Additionally, model's error calculation using the Absolute Mean Deviation (MAD), Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Percent Error (MAPE) were performed for inspective comparison of the MLR models and the Simplified Penman's Equation (SPE). Ten months of most recent evaporation data were used and resulted that MLR Model 2 (4 variables, 10 years data set) had the least errors as $MAD = 0.41$, $MSE = 0.29$, and $MAPE = 7.9$. Therefore, the appropriate equation for predicting the water evaporation should consider both the errors and the Coefficient of Determination.

Keywords: Evaporation, Multiple Linear Regression, Simplified Penman's Equation, Accuracy Evaluation

1. บทนำ

การระเหยเป็นองค์ประกอบหลักของวัฏจักรน้ำทางอุทกวิทยาและเป็นกระบวนการที่สำคัญของการสูญเสียน้ำจากแหล่งน้ำขนาดกลางและขนาดเล็ก ทำให้มีการคิดวิธีประมาณการระเหยอย่างแพร่หลายสำหรับการใช้งานทางด้านอุทกวิทยา ซึ่งการใช้งานทางวิศวกรรมจำเป็นต้องมีการประมาณที่ให้ค่าใกล้เคียง เพื่อใช้ในการวางแผนการจัดการทรัพยากรน้ำและการชลประทาน การตรวจวัดการระเหยของแหล่งน้ำโดยตรงในทางปฏิบัติเป็นไปได้ค่อนข้างยากและซับซ้อน วิธีการประมาณค่าการระเหยด้วยข้อมูลอุตุนิยมนิยมใช้เป็นวิธีที่นิยมกันมากในงานทางอุทกวิทยาและการชลประทาน วิธีการดังกล่าวแตกต่างกันตามข้อมูลอุตุนิยมนิยมที่ไปจนถึงหลักการสำหรับการวิเคราะห์ เช่น วิธีงบประมาณ (Water budget method) วิธีงบประมาณพลังงาน (Energy budget method) วิธีการอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic method) และวิธีผสม (Combination method) วิธีมาตรฐานเหล่านี้เกิดขึ้นจากการประมาณค่าการระเหยจากแหล่งน้ำเปิดภายใต้ตำแหน่งและตัวแปรทางอุทกวิทยาที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression, MLR) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งรวมทั้งการวิจัยทางอุตุนิยมนิยมสำหรับการประมาณการระเหยของแหล่งน้ำแบบต่าง ๆ ด้วยการใช้ข้อมูลภูมิอากาศที่วัดได้มาพัฒนาเป็นสมการอย่างง่าย หรือการใช้เทคนิคนี้ในงานวิจัยสาขาอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น การประมาณค่าการคายระเหยของพืช (Crop Evapotranspiration, ET_p) [1] การพัฒนาตัวแบบการถดถอยเพื่อประมาณค่า

สัมประสิทธิ์การคายระเหยจากตัวแปรสภาพอากาศและเปรียบเทียบค่าการคายระเหยของพืช (ET_p) [2] นอกจากนี้ยังใช้เทคนิค MLR เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณการระเหยของผิวน้ำในแต่ละวันจากตัวแปรสภาพอากาศ [3]

งานวิจัยที่ผ่านมา [4–7] ได้พัฒนาสมการ (Simplified Penman's Equation, SPE) จากข้อมูลตัวแปรสภาพอากาศ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ความเร็วลมเฉลี่ย อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย และค่าชั่วโมงแสงอาทิตย์ ซึ่งในสมการดังกล่าวมีค่ารังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation, R_s) และค่ารังสีดวงอาทิตย์จากภายนอก (Extraterrestrial Radiation, R_A) ที่ไม่สามารถวัดค่าโดยตรงได้ แต่ต้องคำนวณจากชั่วโมงแสงอาทิตย์ พิกัดของแหล่งที่ตั้ง และเดือนที่ต้องการทราบ ทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการใช้ MLR เพื่อสร้างแบบจำลองในการหาสมการอย่างง่าย โดยใช้ข้อมูลตัวแปรสภาพอากาศย้อนหลัง 15 ปี จากสถานีอุตุนิยมนิคมวิทยานครราชสีมา อ.ปากช่อง ประกอบด้วยข้อมูล 6 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิอากาศสูงสุดต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดต่ำสุด ความเร็วลมเฉลี่ย และค่าชั่วโมงแสงอาทิตย์ จากนั้นจึงตรวจสอบความแม่นยำของสมการของแบบจำลองที่ได้กับข้อมูลสภาพอากาศจริงของปี 2564 ด้วยวิธีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation, MAD) ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error, MSE) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percent Error, MAPE) อีกทั้งยังเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนกับสมการ SPE

2. งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การหาค่าการระเหยมี 5 วิธี [8] ได้แก่ 1. วิธีการใช้ถาดวัดการระเหยเป็นวิธีที่มีเครื่องมือวัดการระเหยที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน 2. วิธีบ่งน้ำเป็นวิธีการอ้างอิงบนหลักการว่าน้ำจะไม่มีการสูญหาย แต่จะมีการเปลี่ยนสถานะและเปลี่ยนตำแหน่งที่อยู่ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายแต่ทำได้มีความน่าเชื่อถือน้อย เนื่องจากในทางปฏิบัติมีความผิดพลาดจากการประเมินปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำไหลเข้า-ออกของอ่าง อัตราการรั่วซึม ปริมาตรเก็บกัก 3. วิธีงบประมาณเป็นวิธีที่คล้ายกับวิธีบ่งน้ำคือ การอ้างอิงกับสมการความต่อเนื่องของพลังงาน วิธีนี้มีข้อเสียคือ ทำการวัดหรือคำนวณได้ยากและต้องใช้เครื่องมือที่ทันสมัย 4. วิธีการอากาศพลศาสตร์เป็นวิธีที่พัฒนามาจากสมการแบบ turbulent-transport ซึ่งมีพื้นฐานแนวคิดจาก 2 วิธีด้วยกันคือ การผสมแบบไม่ต่อเนื่องและการผสมแบบต่อเนื่อง จนได้สมการของ Dalton มีความเร็วลม สัมประสิทธิ์ความเร็วลมและความดันไอเป็นตัวแปรหลัก โดยค่าความเร็วลมสามารถวัดได้ส่วนตัวแปรที่เหลือต้องคำนวณหาจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดันไอ ซึ่งเป็นความยุ่งยาก

สุดท้ายวิธีที่ 5 ซึ่งเป็นหลักการที่งานวิจัยนี้ใช้อ้างอิงคือ วิธีผสมเป็นการผสมผสานระหว่างวิธีงบประมาณและวิธีอากาศพลศาสตร์ โดยใช้สมการหลักของ Penman ในการประมาณค่าการระเหย ต่อมานักวิจัย [4-6] พยายามพัฒนาสมการประมาณการระเหยของ Penman โดยการลดจำนวนของตัวแปรบางตัวแปร เพื่อให้สมการสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น และใช้จำนวนตัวแปรทางอุณหภูมิต่ำลง โดยมีนักวิจัย [7] ได้พัฒนาสมการ SPE ตามสมการที่ (1) และเสนอสมการดังกล่าวด้วยการตัดตัวแปรความเร็วลมเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน แต่ยังมีตัวแปรที่ซับซ้อน ได้แก่ R_s , R_A ที่ต้องคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ของชั่วโมงแสงอาทิตย์ พิกัดของแหล่งที่ตั้ง และเดือนที่ต้องการทราบ เพื่อให้ง่ายในการประมาณการระเหยจึงทำการสร้างแบบจำลองด้วยความสัมพันธ์ระหว่างการระเหยกับตัวแปรทางอุณหภูมิต่ำลง ที่ผ่านมามีนักวิจัย [9] ใช้ข้อมูลทางอุณหภูมิต่ำลงได้แก่ อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดและต่ำสุด ความเร็วลม และชั่วโมง

แสงอาทิตย์ สร้างแบบจำลองทางสถิติด้วยวิธี MLR, Principal Components Regression (PCR) และ Partial Least-Squares (PLS) เพื่อทำการประเมินความคลาดเคลื่อนของการประมาณการระเหยในแต่ละวิธีและตำแหน่งของพื้นที่ที่แตกต่างกัน ปรากฏว่าแบบจำลองจากวิธี MLR มีความแม่นยำในการประมาณมากที่สุด นอกจากนั้นยังมีการเสนอแบบจำลองอีกจำนวนมากสำหรับการประมาณการระเหย

2.1 สมการลดรูปแบบง่ายของ Penman

สมการ Simplified Penman's Equation (SPE) [7] เป็นสมการสำหรับประมาณการระเหยซึ่งเป็นวิธีผสมที่รวมระหว่างวิธีงบประมาณกับวิธีอากาศพลศาสตร์ โดยมีตัวแปรทางอุณหภูมิต่ำลงหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และค่าของตัวแปรเหล่านี้จะถูกติดตามและบันทึกที่สถานีกรมอุณหภูมิต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถนำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณประมาณการระเหยของถาดได้ตามสมการที่ (1)

$$E_{SPE} = E_{radS} - E_{radL} + E_{aero} \quad (1)$$

$$E_{radS} = 0.051(1 - \alpha)R_s\sqrt{T} + 9.5 \quad (1a)$$

$$E_{radL} = 2.4 \left(\frac{R_s}{R_A}\right)^2 \quad (1b)$$

$$E_{aero} = 0.048(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) (0.5 + 0.536u) \quad (1c)$$

โดยที่

E_{SPE} คือ การระเหยจากถาดที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (1) (ตัวแทนการระเหยจากแหล่งน้ำใกล้เคียง) (mm/day)

E_{radS} คือ การระเหยจากรังสีคลื่นสั้นสุทธิ (Evaporation by net short wave radiation, mm/day)

E_{radL} การระเหยจากรังสีคลื่นยาวสุทธิ (Evaporation by net long wave radiation, mm/day)

E_{aero} คือ การระเหยจากอากาศพลศาสตร์ (Evaporation by aerodynamic, mm/day)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (มีค่าเท่ากับ 0.08 สำหรับทางน้ำเปิด)

R_s คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการวัดหรือประมาณ ($\text{MJ/m}^2/\text{d}$)

R_A คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์จากภายนอกคำนวณได้จากพิกัดของแหล่งที่ตั้ง ($\text{MJ/m}^2/\text{d}$)

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

u คือ ความเร็วลม (m/s)

T คือ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ($^{\circ}C$)

จากสมการที่ (1) ในการประมาณการระเหยจากผิวน้ำ คลาส A มีตัวแปรที่สำคัญ 5 ตัวแปร ซึ่งข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่ใช้โดยมี 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย และความเร็วลม ส่วนของค่า R_s และ R_A ได้มาจากการคำนวณตำแหน่งที่ตั้ง ชั่วโมงแสงอาทิตย์ และลำดับที่ของเดือน โดยเริ่มคำนวณจากค่าเวลากลางวันตามสมการที่ (2) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าลำดับที่ของเดือนและตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ทดสอบ จากนั้นนำค่าเวลากลางวันกับตำแหน่งที่ตั้งไปหาค่า R_A ตามสมการที่ (3)–(4) และนำค่า R_A แทนในสมการที่ (5) เพื่อหาค่า R_s ตามลำดับ

$$N = 40 \sin(0.53i - 1.65) + 12 \quad (2)$$

$$R_A = 3N \sin(0.131N - 0.950) \quad (3)$$

for $|\phi| > \frac{23.5\pi}{180}$

$$R_A = 18N^{0.2} \sin(0.131N - 0.200) \quad (4)$$

for $|\phi| < \frac{23.5\pi}{180}$

$$R_s = R_A \left(0.5 + 0.25 \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

เมื่อ

ϕ คือ ตำแหน่งที่ตั้ง (Latitude of the site, Radians)

i คือ เดือนที่ (Rank of the month, the first month is January)

N คือ เวลากลางวัน (Daylight hours, ชั่วโมง)

n คือ ชั่วโมงแสงอาทิตย์ (Sunshine hours, ชั่วโมง)

จากสมการที่ (2)–(5) จะเห็นได้ว่าเป็นสมการที่มีความซับซ้อนในการใช้งานและไม่สะดวกในการประมาณการระเหยซึ่งควรมีการวิจัยเพื่อพัฒนารูปแบบสมการที่ง่ายขึ้นและยังสามารถประมาณค่าได้แม่นยำตามสมควรแก่การใช้งาน

2.2 วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression, MLR)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linearity) โดยมีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวและตัวแปรตามหนึ่งตัว [10] ตามสมการที่ (6)

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \epsilon \quad (6)$$

เมื่อ

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย

x_i คือ ค่าตัวแปรอิสระแต่ละตัว (โดยที่ $i = 1, 2, \dots, k$)

b_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย

b_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) (โดยที่ $i = 1, 2, \dots, k$) ซึ่ง b_i จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า x_i ต่อค่า Y

ϵ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่า x และค่า Y

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณจะหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม และจะได้สมการถดถอยเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) จะเป็นดัชนีชี้วัดระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม ซึ่งค่า R^2 จะอยู่ในช่วง $[0, 1]$ และใช้การแปลความหมายของระดับความสัมพันธ์ตามช่วงของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ [11] ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหมายของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่บ่งชี้ระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (%)	ความหมาย
82–100	มีความสัมพันธ์สูงมาก
50–81	มีความสัมพันธ์สูง
26–49	มีความสัมพันธ์ปานกลาง
10–25	มีความสัมพันธ์กันต่ำ
0–9	ไม่มีความสัมพันธ์ต่ำมาก

การวิเคราะห์การถดถอยในกรณีที่มีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับการจำลองความสัมพันธ์กับตัวแปรตามได้อย่างแม่นยำ การใช้ตัวแปรอิสระหลายตัวจึงช่วยให้จำลองความสัมพันธ์กับตัวแปรตามได้แม่นยำมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากมีจำนวนตัวแปรอิสระในสมการมากเกินไปอาจทำให้เกิดความผิดพลาดกลับสูงขึ้น ดังนั้น การคัดเลือกตัวแปรอิสระเพื่อให้ได้เฉพาะตัวแปรที่

มีอิทธิพลแท้จริงและนำไปสู่สมการถดถอยที่เหมาะสม มีวิธีการที่นิยมใช้ 3 วิธี ได้แก่

2.2.1. Forward selection

เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการทีละตัวแปร โดยตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากที่สุด จะถูกคัดเลือกเข้าก่อน จากนั้นตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระนั้นสามารถประมาณตัวแปรตามได้อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ถ้าใช่จะคัดเลือกตัวแปรอิสระลำดับต่อมา ถ้าไม่ใช่จะตัดตัวแปรนั้นออกไปและทำเช่นนี้ไปจนไม่มีตัวแปรอิสระใดเข้าไปในสมการได้อีกจึงหยุดการคัดเลือกและถือว่าสมการนั้นเป็นสมการที่เหมาะสม

2.2.2. Backward elimination

เป็นวิธีการที่เริ่มต้นด้วยการสร้างสมการแรกที่ใช้ตัวแปรอิสระทั้งหมด ขึ้นก่อนแล้วจึงคัดเลือกตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามน้อยที่สุดออกจากสมการทีละตัวแปร และทำการตรวจสอบตัวแปรที่เหลืออยู่ร่วมกันสามารถประมาณตัวแปรตามได้อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ถ้าไม่ได้จะคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามน้อยในลำดับต่อมาและทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนไม่มีตัวแปรอิสระที่ถูกคัดออกอีก สมการที่ได้สามารถประมาณตัวแปรได้อย่างมีนัยสำคัญถือว่าสิ้นสุด

2.2.3. Stepwise

เป็นวิธีที่ผสมระหว่าง Forward selection กับ Backward elimination โดยการนำตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากที่สุดเข้าเป็นสมการแรก จากนั้นทดสอบความมีนัยสำคัญทางสถิติ ถ้าไม่มีนัยสำคัญจะถือว่าสิ้นสุดการคัดเลือก แต่ถ้าพบว่ามีความสำคัญจะทำการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีลำดับความสัมพันธ์รองลงมาเข้าสู่สมการ ซึ่งในการนำตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าสู่สมการจะมีการตรวจสอบตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการก่อนหน้านี้ว่าทุกตัวยังคงอยู่ในสมการหรือไม่ ถ้าไม่คงอยู่จะทำการคัดออกก่อน แล้วค่อยคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์ลำดับถัดไปเข้าสู่สมการและถ้าไม่มีนัยสำคัญจะถูกคัดออกไป จะทำการคัดเลือกแบบนี้ไปจนกว่าไม่มีตัวแปรอิสระใดถูกนำเข้าหรือคัดออกถือว่าสิ้นสุดการคัดเลือก สมการที่ได้เป็นสมการที่เหมาะสมและที่ใช้ในการประมาณ

2.3 การประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง

การตรวจสอบความแม่นยำของสมการหลังจากการสร้างแบบจำลองแล้วเสร็จ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าการประมาณด้วยสมการ ซึ่งค่าจริงที่จะใช้นี้ควรเป็นค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดจริงหรือค่าที่ต้องการอ้างอิงเปรียบเทียบจากการประมาณ หากมีความแตกต่างมากหมายความว่าสมการที่ใช้ประมาณนั้นมีความแม่นยำต่ำ ทำให้ต้องมีการพัฒนาปรับแก้สมการต่อไป ซึ่งดัชนีชี้วัดความคลาดเคลื่อนของการประมาณมีหลายตัว ได้แก่

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation, MAD)

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |A_t - F_t| \quad (7)$$

ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error, MSE)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2 \quad (8)$$

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percent Error, MAPE)

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t} \quad (9)$$

เมื่อ

t คือ เวลา

A_t คือ ค่าจริงที่เวลา t

F_t คือ ค่าในการประมาณที่เวลา t

n คือ ค่าจำนวนของเวลา

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยานครราชสีมา (กลุ่มงานอากาศเกษตรปากช่อง) อ.ปากช่อง ชัยภูมิ 15 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2559-2563 ซึ่งสถานีมีเครื่องมือมาตรฐานภาคพื้นดินสำหรับการเก็บข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ถาดวัดระเหย เทอร์โมมิเตอร์แบบแอลกอฮอล์และกระเปาะเปียก เครื่องมือบันทึกชั่วโมงแสงแดด เครื่องวัดความเร็วลมแบบถ้วย เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ และเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท โดยการ

อ่านจะดำเนินการวันละครั้ง เวลา 08:00–8:30 น. ตามเวลาประเทศไทย และทำการบันทึกข้อมูล ซึ่งข้อมูลจะได้รับการตรวจสอบคุณภาพก่อนส่งมอบให้กับผู้ใช้ สำหรับชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยค่ารายวันของอุณหภูมิอากาศสูงสุด ($T_{\max}$, °C) อุณหภูมิอากาศต่ำสุด ($T_{\min}$, °C) ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด ($RH_{\max}$, %) ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ($RH_{\min}$, %) ชั่วโมงแสงแดดจริง (n, ชั่วโมง), ความเร็วลมเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ที่ความสูง 2 เมตร (u, m/s) และค่าการระเหยจริงที่วัดได้จากถาดวัดการระเหย (เป็นค่าระดับน้ำในถาดที่ลดลงไปจากการระเหย) (Em, mm)

3.1 การจัดการข้อมูล

ข้อมูลดิบที่ได้จากสถานี เป็นแบบรายวันและมีจำนวนมาก จึงทำการปรับข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลรายสัปดาห์ เพื่อลดจำนวนข้อมูลนำเข้าและความผันผวนของข้อมูลลง โดยกำหนดให้ข้อมูลรายวันในแต่ละรอบหนึ่งเดือนปฏิทินแบ่งออกเป็น 4 สัปดาห์ และใช้ค่าเฉลี่ย (average) ของข้อมูลรายวันในแต่ละสัปดาห์เหล่านั้นเป็นตัวแทน จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

การปรับเปลี่ยนข้อมูลรายวัน $T_{\max}$ และ $T_{\min}$ โดยการนำค่าทั้ง 2 มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (T) และค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายวัน (RH) เป็นการนำค่าข้อมูลรายวัน $RH_{\max}$ และ $RH_{\min}$ มาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาปรับเปลี่ยนจากรายวันให้เป็นรายสัปดาห์ ดังแสดงตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 2 โดยสัปดาห์ที่ 1–3 เป็นการนำข้อมูลของวันที่ 1–7, 8–14 และ 15–21 ของแต่ละเดือนมาหาค่าเฉลี่ยตามลำดับ ส่วนสัปดาห์ที่ 4 เป็นการนำข้อมูลวันที่ 22–วันสุดท้ายของเดือนมาเฉลี่ย ทำให้ได้จำนวนข้อมูล 48 สัปดาห์ต่อปี หรือรวมจำนวนชุดข้อมูลทั้งสิ้นสูงสุด 48 ชุด

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลรายสัปดาห์เดือนมกราคม 2563

Month-Weekly	Jan-1	Jan-2	Jan-3	Jan-4
$T_{\min}$ (°C)	20.3	20.6	19.6	19.7
$T_{\max}$ (°C)	32.0	33.6	33.5	32.9
$RH_{\min}$ (%)	39.0	37.0	34.4	37.0
$RH_{\max}$ (%)	78.1	77.3	84.6	85.8
n (ชั่วโมง)	8.1	7.5	7.6	8.0

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลรายสัปดาห์เดือนมกราคม 2563 (ต่อ)

Month-Weekly	Jan-1	Jan-2	Jan-3	Jan-4
u (m/s)	2.9	2.1	1.7	2.4
Em (mm./day)	6.6	5.7	6.0	6.9

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง จะใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันในแต่ละวันปรับเป็นข้อมูลรายสัปดาห์ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยตามที่กล่าวข้างต้น โดยจะใช้ข้อมูลระหว่างเดือนมกราคม–เดือนตุลาคม 2564 (รวม 10 เดือน หรือ 40 สัปดาห์) เนื่องจากเป็นข้อมูลล่าสุดของปีปัจจุบันที่ทำการวิจัย คิดเป็นจำนวนชุดข้อมูลทั้งสิ้นสูงสุด 40 ชุด

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี MLR

งานวิจัยนี้ทดลองสร้างแบบจำลอง MLR หลายแบบแตกต่างกันตามจำนวนตัวแปรอิสระและจำนวนข้อมูลตามระยะเวลาย้อนหลัง ซึ่งสมมติฐานว่าอาจส่งผลต่อความถูกต้องของการประมาณการระเหย ดังนี้ แบบจำลองที่ใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่ถูกแปลงเป็นรายสัปดาห์แล้วจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ T, RH, n, และ u และแบบจำลองที่ใช้ 6 ตัวแปร ได้แก่ $T_{\min}$, $T_{\max}$, $RH_{\min}$, $RH_{\max}$, n, และ u นอกจากนี้ยังแบ่งกลุ่มตามจำนวนข้อมูลย้อนหลังสำหรับการสร้างแบบจำลองต่าง ๆ เป็น 15, 10, และ 5 ปี ได้แบบจำลองจำนวนรวม 6 แบบจำลองตามตารางที่ 3 และตัวแปรตามที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองคือ Em ในช่วงเวลาเดียวกันและถูกแปลงเป็นรายสัปดาห์แล้วเช่นกัน

ตารางที่ 3 สรุปจำนวนแบบจำลองภายใต้ข้อกำหนดต่าง ๆ

แบบจำลองที่ i	จำนวนตัวแปรอิสระทางอุตุนิยมวิทยา		จำนวนปีย้อนหลัง (ปี)		
	4 ตัวแปร	6 ตัวแปร	5	10	15
1	✓		✓		
2	✓			✓	
3	✓				✓
4		✓	✓		
5		✓		✓	
6		✓			✓

ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ MLR คือ โปรแกรม Minitab โดยใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระแบบ Stepwise เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ของโปรแกรมเป็นสมการประมาณการระยะของแต่ละแบบจำลองทั้ง 6 เหล่านี้

3.3 การประเมินความแม่นยำ

การประเมินแม่นยำเพื่อหาแบบจำลองที่ดีที่สุด (คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด) จะใช้ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยสุโขทัยเป็นทั้งค่าตัวแปรอิสระและค่าตัวแปรตาม เพื่อคำนวณค่าประมาณการระยะของสมการแบบจำลองทั้ง 6 สมการ และของสมการ SPE ในการประเมินค่าดัชนี MAD, MSE, และ MAPE (ดังสมการที่ (7)–(9)) จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยการระยะที่วัดได้จากถาดวัดการระยะ (E_m) ในช่วงเวลาเดียวกันเป็นค่าการระยะจริง (A_p) ในการคำนวณค่าดัชนีต่างๆ

4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลการวิเคราะห์และการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามของแบบจำลองทั้ง 6 แบบ และส่วนที่ 2 คือ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าการระยะระหว่างของสมการที่ได้จากการวิจัยนี้กับสมการ SPE และค่าการระยะจริงที่วัดจากถาดที่สถานี ผลการทดลองส่วนที่ 1 จากการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองด้วยวิธี MLR ทั้ง 6 แบบจำลอง แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมการประมาณการระยะของแบบจำลองด้วยวิธี MLR จากโปรแกรม Minitab

แบบจำลองที่ i	สมการประมาณการระยะจากถาดของแบบจำลอง*	R ² (%)
1	$E1 = -3.24 + 0.412T - 0.0681RH + 0.184n + 0.674u$	83.6
2	$E2 = 0.446 + 0.346T - 0.0813RH + 0.126n + 0.447u$	78.5
3	$E3 = 0.645 + 0.333T - 0.0771RH + 0.145n + 0.405u$	74.1

ตารางที่ 4 สมการประมาณการระยะของแบบจำลองด้วยวิธี MLR จากโปรแกรม Minitab (ต่อ)

แบบจำลองที่ i	สมการประมาณการระยะจากถาดของแบบจำลอง*	R ² (%)
4	$E4 = -8.43 + 0.437T_{\max} - 0.0340RH_{\max} + 0.138n + 0.973u$	82.7
5	$E5 = -0.0100 + 0.170T_{\min} + 0.188T_{\max} - 0.0499RH_{\max} - 0.0324RH_{\min} + 0.145n + 0.505u$	76.2
6	$E6 = 0.830 + 0.118T_{\min} + 0.230T_{\max} - 0.0794RH_{\max} + 0.200n + 0.394u$	72.2

หมายเหตุ * E_i คือ ค่าการระยะที่ได้จากสมการของแบบจำลองที่ i

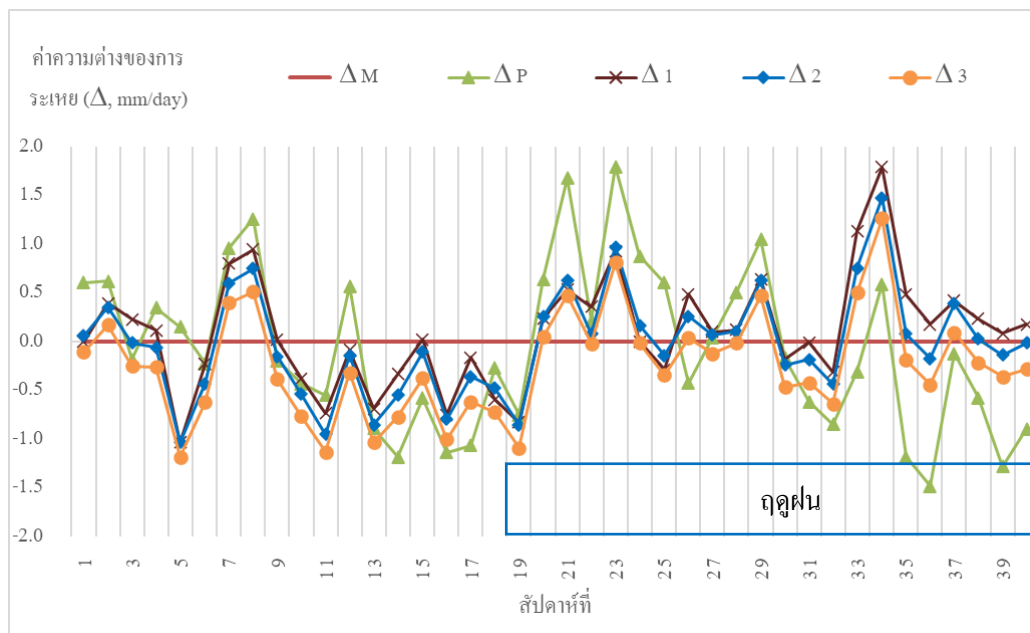
ค่า E_i ในตารางที่ 4 คือ ค่าการระยะ (ค่าการลดลงของระดับน้ำในถาด หน่วยเป็น mm/day) โดยคำนวณได้จากสมการของแบบจำลองที่ i ของทั้ง 6 แบบจำลอง จากการพิจารณาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองที่ 1 และ 4 มีค่ามากกว่า 82 % แสดงว่าตัวแปรอิสระอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ชั่วโมงแสงอาทิตย์ และความเร็วลมมีความสัมพันธ์กับการระยะสูงมาก ส่วนแบบจำลองที่ 2, 3, 5 และ 6 มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยสุโขทัยกับการระยะสูง และยังพบว่าจำนวนปีที่มีค่า R^2 มากกว่าจำนวนปีที่มาก และจำนวนตัวแปรที่มีค่า R^2 มากกว่าจำนวนตัวแปรที่มาก ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองควรเลือกชุดข้อมูลที่เหมาะสม มีจำนวนตัวแปรครอบคลุมและสัมพันธ์กัน

จากตารางที่ 4 ยังพบว่า ตัวแปร $T_{\min}$ และ $RH_{\min}$ ของแบบจำลองที่ 4 ถูกคัดออกจากสมการผลลัพธ์ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองนี้ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับสมการประมาณการระยะของแบบจำลองที่ 4 (กำหนดค่าระดับนัยสำคัญของการวิเคราะห์นี้เท่ากับ 0.05 ซึ่งหากค่า P-Value ของค่าตัวแปรใดมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญนี้ ตัวแปรนั้นจะถูกคัดออกจากสมการผลลัพธ์) และด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน ตัวแปร $RH_{\min}$ ของแบบจำลองที่ 6 ก็ถูกคัดออกจากสมการผลลัพธ์

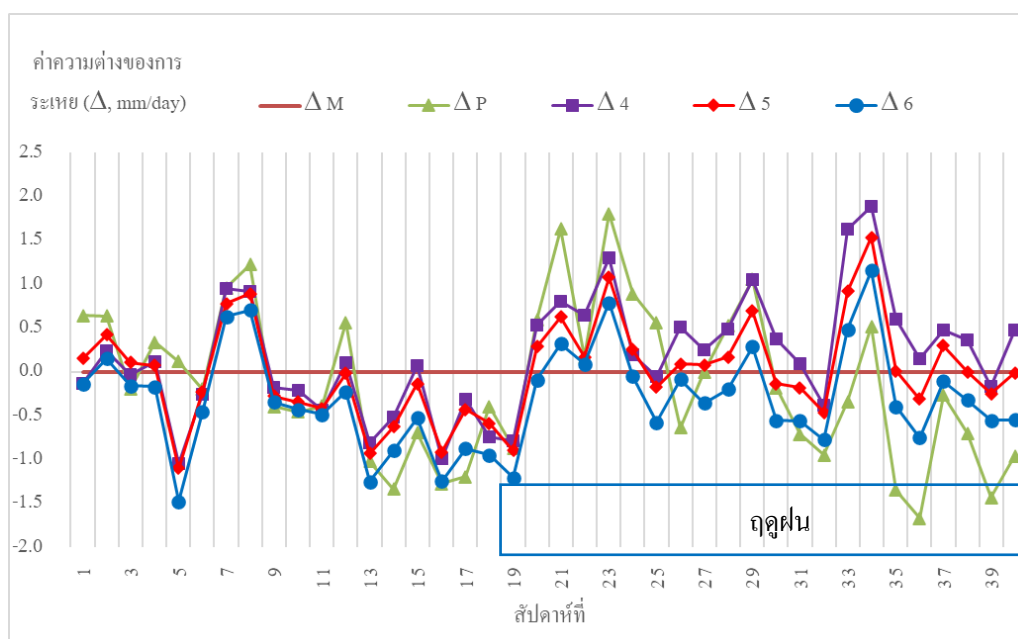
นอกจากนี้ผลลัพธ์ในตารางที่ 4 ยังแสดงความสัมพันธ์และอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ กับการระเหย โดยค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจะหมายถึงขนาดของอิทธิพลของตัวแปรนั้นต่อการระเหย และค่าบวกหรือลบของสัมประสิทธิ์นี้จะหมายถึงประเภทของความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง หรือแบบแปรผกผัน ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร n มีขนาดมากที่สุดและ เป็นค่าบวกในทุกแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าความเร็วลม (u) มีความสัมพันธ์

แบบแปรผันตรงและมีอิทธิพลต่อการระเหยมากที่สุด รองลงมาได้แก่ T_a และ RH ตามลำดับ โดยที่ T_a มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง และ RH มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับการระเหย

ผลการทดลองส่วนที่ 2 แสดงด้วยเส้นกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าการระเหยจากสมการแบบจำลองทั้ง 6 และจาก SPE ดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 กราฟเปรียบเทียบความต่างของค่าการระเหยจากแบบจำลองที่ 1, 2, 3 และจาก SPE



รูปที่ 2 กราฟเปรียบเทียบความต่างของค่าการระเหยจากแบบจำลองที่ 4, 5, 6 และจาก SPE

กราฟเส้นในรูปที่ 1 และ 2 แสดงค่าความต่างของค่าการระเหยจากสมการที่แตกต่างกัน ในเชิงที่เปรียบเทียบกับ ค่า E_m ตามระยะเวลารายสัปดาห์รวม 40 สัปดาห์ ดังนี้

กราฟเส้น Δ_m คือ ความต่างระหว่าง E_m กับ E_m (เท่ากับ $E_m - E_m = 0$) ซึ่งใช้ E_m เป็นค่าฐานของการเปรียบเทียบนี้

กราฟเส้น Δ_i คือ ค่าความต่างระหว่าง E_i กับ E_m (เท่ากับ $E_i - E_m$), เมื่อ i คือ 1 ถึง 6 และ

กราฟเส้น Δ_{SPE} คือ ค่าความต่างระหว่าง E_{SPE} กับ E_m (เท่ากับ $E_{SPE} - E_m$)

ลักษณะของกราฟเส้นต่าง ๆ ในรูปที่ 1 และ 2 มีรูปร่างคล้ายกัน แสดงว่าทุกสมการการประมาณการระเหยมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน แต่เส้นกราฟ Δ_{SPE} มีขนาดค่าความต่างมากกว่า Δ_i ของแบบจำลองทั้ง 6 แบบ และ ในช่วงสัปดาห์ที่ 19 – 40 (ช่วงกลางเดือนพฤษภาคม – กลางเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนตามประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยา) เส้นกราฟต่าง ๆ แสดงความผันผวนของค่าความต่างนี้มากกว่า ในช่วงสัปดาห์ที่ 1 – 18 (ช่วงฤดูแล้ง) แสดงว่าช่วงฤดูฝนจะมีความคลาดเคลื่อนของการประมาณการระเหยสูงกว่าช่วงฤดูแล้งได้ นอกจากนี้ในระหว่างสัปดาห์ที่ 30-40 ค่า Δ_{SPE} มีค่าติดลบมาก หมายถึงว่า ค่า E_{SPE} ต่ำกว่าค่า E_m ซึ่งอาจทำให้เกิดการวางแผนการใช้น้ำมากเกินไปปริมาณน้ำที่คงเหลือจริงได้ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการบริหารจัดการน้ำ

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าการระเหยระหว่างของสมการที่ได้จากการวิจัยนี้กับสมการลดรูปแบบง่ายของ Penman และค่าการระเหยจริงที่วัดจากสถานีด้วยดัชนี MAD, MSE และ MAPE แสดงตามตารางที่ 5 พบว่าค่า MAD, MSE และ MAPE ของแบบจำลองทั้ง 6 สมการ ให้ค่าคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันและน้อยกว่าของ SPE โดยที่แบบจำลองที่ 2 (4 ตัวแปร ช้อนหลัง 10 ปี) ให้ค่าคลาดเคลื่อนทั้ง 3 ดัชนีน้อยที่สุด และยังเป็นแบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงเป็นลำดับที่ 3 อีกด้วย

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนด้วยวิธี MAD, MSE และ MAPE

สมการประมาณการระเหย	MAD	MSE	MAPE (%)
แบบจำลองที่ 1	0.43	0.33	8.3

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนด้วยวิธี MAD, MSE และ MAPE (ต่อ)

สมการประมาณการระเหย	MAD	MSE	MAPE (%)
แบบจำลองที่ 2	0.41	0.29	7.9
แบบจำลองที่ 3	0.47	0.34	9.7
แบบจำลองที่ 4	0.53	0.47	10.5
แบบจำลองที่ 5	0.43	0.32	8.3
แบบจำลองที่ 6	0.54	0.42	11.4
SPE สมการที่ (1)	0.70	0.68	14.7

5. สรุป

การวิจัยนี้นำไปสู่ข้อสรุป 2 ประเด็นคือ รูปแบบความสัมพันธ์และอิทธิพลระหว่างตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยากับการระเหย และการประเมินความแม่นยำของสมการ SPE และสมการของแบบจำลองด้วยวิธี MLR (โดยการคัดเลือกตัวแปรอิสระแบบ Stepwise ซึ่งใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab) โดยแบบจำลองที่ 1 (4 ตัวแปร, ข้อมูลย้อนหลัง 5 ปี) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุด 83.6% และมีสมการประมาณการระเหย คือ $[E_1 = -3.24 + 0.412 T - 0.0681 RH + 0.184 n + 0.674 u]$ หมายความว่าตัวแปรอิสระ u , T , n และ RH มีความสัมพันธ์มากกับค่าการระเหย โดยที่ u มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงและมีอิทธิพลกับการระเหยมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมเพิ่มขึ้นส่งผลให้การระเหยมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์รองลงมา ได้แก่ T และ n ตามลำดับ ส่วน RH มีความสัมพันธ์แบบผกผันต่อการระเหย หรือหมายความว่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่ามากขึ้นส่งผลให้การระเหยมีค่าน้อยลง และค่า RH ยังมีอิทธิพลต่อการระเหยน้อยที่สุด ซึ่งเป็นไปตามหลักการและทฤษฎี

ส่วนการประเมินความแม่นยำของค่าการระเหย โดยใช้ข้อมูลการวัดการระเหยจากสถานีวัดการระเหย ซึ่งเป็นตัวแทนการระเหยที่เกิดขึ้นจริง เปรียบเทียบกับสมการ SPE และสมการจากแบบจำลองด้วยวิธี MLR ซึ่งผลจากตารางที่ 5 สมการจากแบบจำลองด้วยวิธี MLR ทั้ง 6 แบบจำลองมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าคลาดเคลื่อนของสมการประมาณการระเหยลดรูปแบบง่ายของ Penman ทั้ง 3 วิธี

โดยเฉพาะแบบจำลองที่ 2 (4 ตัวแปร, ย้อนหลัง 10 ปี) มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เนื่องจากการวิเคราะห์วิธี MLR เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรด้านอุตุนิยมวิทยากับค่าการระเหยเชิงสถิติในพื้นที่ แต่ตัวแปรทางด้านอุตุนิยมวิทยาในสมการประมาณการระเหยลดรูปแบบง่ายของ Penman มาจากวิธีการประมาณค่าในเชิงความสัมพันธ์ของตัวแปร ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนในการประมาณ

การพิจารณาสมการของแบบจำลองที่จะนำไปใช้ประมาณการระเหยในพื้นที่ ควรพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่าความคลาดเคลื่อนโดยที่พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีค่ามากเพื่อเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระทางอุตุนิยมวิทยากับค่าการระเหย และมีค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และเหมาะสมในการใช้งาน ดังนั้น สมการที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 (4 ตัวแปร, ข้อมูลย้อนหลัง 10 ปี) คือ $E_2 = 0.446 + 0.346T - 0.0813RH + 0.126n + 0.447u$ ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่า E_m มากที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุดเป็นอันดับสามคือ 78.5% จึงเหมาะสมสำหรับใช้ประมาณการระเหยบริเวณพื้นที่ทดสอบได้

อย่างไรก็ตามข้อสรุปของงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนชุดข้อมูลทดสอบประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง มีเพียง 10 เดือน หรือจำนวน 40 ชุดข้อมูลรายสัปดาห์ ซึ่งเป็นข้อมูลของปีล่าสุด (ณ เวลาที่ทำวิจัย) คิดเป็นจำนวน 8.3% ของจำนวนข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ 2 ที่ดีที่สุด แต่ยังไม่ครอบคลุมทุกฤดูกาลครบเต็มทั้งปี ทำให้ไม่สามารถประเมินความแม่นยำเป็นฤดูกาลได้ และจะต้องทำการวิจัยต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนพัฒนาบุคลากร มหาวิทยาลัยนครพนม

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Doorenbos, and W. O. Pruitt, "Guidelines for predicting crop water requirements," in *FAO*

Irrigation and Drainage Paper No. 24, Rome, Italy: FAO, 1977, ch.1, pp.1–65.

- [2] R. L. Snyder, M. Orang, S. Matyac and M.E. Grismer, "Simplified estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation data in California," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 131, no. 3, pp. 249–253, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:3(249).
- [3] J. M. Bruton, R. W. McClendon and G. Hoogenboom, "Estimating daily pan evaporation with artificial neural networks," *Transactions of the ASAE*, vol. 43, no.2, pp.491–496, 2000, doi: 10.13031/2013.2730.
- [4] W. J. Shuttleworth, "Evaporation," in *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, Ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1993, ch. 4, pp. 4.1–4.53.
- [5] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith, "Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements," in *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, Rome, Italy: FAO, 1998, ch.2, pp. 15–79.
- [6] M. E. Jensen, R. D. Burman and R. G. Allen, "Evaporation from Water Surfaces," "in *Evapotranspiration and irrigation water requirements*, 2nd ed., Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2016, ch. 6, pp. 99–137.
- [7] J. D. Valiantzas, "Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data," *Journal of Hydrology*, vol. 331, no. 3–4, pp. 690–702, 2006, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.012.
- [8] K. Leewatjanakul, *HYDROLOGY*, 3rd ed. PathumThani, Thailand: SPEC, 2009.
- [9] G. M. Kovoor and L. Nandagiri, "Developing regression models for predicting pan evaporation from climatic data—a comparison of multiple least-squares, principal components, and partial least-squares approaches," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133,

-
- no. 5, pp.444–454, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:5(444).
- [10] C. Theeraviriya, *Analyzing statistical data with Minitab*, 1st ed. Bangkok, Thailand: simplify, 2020.
- [11] D. E. Hinkle, W. William, and G. J. Stephen, *Applied Statistics for the Behavior Sciences*, 4th ed. New York:, NY, USA: Houghton Mifflin, 1998.

การออกแบบและพัฒนาใบพัดกวนผสมสำหรับของไหลที่มีความหนืดด้วยองค์ความรู้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

Designing and Developing Mixed Stirring Rotors for Viscous Fluids with Knowledge from Product Design Patents using Computational Fluid Dynamics Technique

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล*

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิชณุโลก

บ้านกร่าง เมือง พิชณุโลก 65000

Werayoot Lahamornchaiyakul*

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Phitsanulok, Ban krang, Mueang, Phitsanulok, 65000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: werayootrmutl@gmail.com

Received: Jun 09, 2022; Revised: Sep 19, 2022; Accepted: Sep 22, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อแสดงรูปแบบสนามการไหลแบบปั่นป่วนภายในถังกวนผสม โดยของไหลที่ทำการจำลองเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงกวนที่มีความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ 1.8 Pa.s ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการศึกษาเริ่มต้นจากการใช้ใบพัดกวนผสมแบบทำมุม 45 องศา (Pitch blade) ที่ได้จากการพัฒนามาจากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์เลขที่ 62881 หลังจากนั้น พลังงานสำหรับการผลิตของเครื่องกวนผสมก็ได้รับการปรับให้เหมาะสมกับการทำงานจริง ใบพัดกวนผสมที่ออกแบบใหม่นี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 334 มม. และถังผสมที่คำนวณได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,002 มม. และมีความสูง 1,002 มม. เครื่องผสมมะม่วงถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวขนาด 1 แรงม้า โดยใช้สายพานส่งกำลัง การออกแบบและจำลองผลลัพธ์เชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ นักวิจัยต้องการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของความเร็วในการหมุนสำหรับการกวนผสม ดังนั้นจึงเลือกความเร็วในการผสมที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลการจำลองเชิงตัวเลขและการเปรียบเทียบเพื่อแสดงผลกระทบของการออกแบบต่อตัวแปรที่คำนวณด้วยมือ ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณและการจำลองเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องกวนผสมในแบบต่าง ๆ ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: สิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์, เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล, เครื่องกวนผสมมะม่วง

Abstract

The purpose of this study is to show a turbulent flow field pattern inside a mixing stirring tank, with the simulated fluid being a viscosity is 1.8 Pa. s at 98 degrees Celsius. The study process began with the use of a 45-degree angled mixing rotor (pitch blade) developed from product design patent no. 62881. After that, the production power of the mixing machines was optimized. The redesigned mixing rotor has a diameter of 334 millimeters, and the calculated mixing tank is 1,002 millimeters in diameter and has a height of 1,002 millimeters. The mango mixing machine was driven by a 1 horsepower, single-phase electric motor and used a transmission belt. Numerical simulation results and comparisons show the effect of design on hand-computed variables. The variables

in this study were obtained by calculation and computational fluid dynamics techniques. And can be applied to the design and development of various stirrers in the future.

Keywords: Product design patent, Computational fluid dynamics technique, Mango mixing machine

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ใบพัดกวนผสมชนิดต่าง ๆ ได้ถูกนำไปใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมมากมาย ทั้งในส่วนของกลุ่มธุรกิจอาหาร เครื่องสำอาง สารเคมี และอาหารสัตว์ เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการผสมของเหลวชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกันจนเป็นเนื้อเดียว รูปแบบของงานด้านการกวนผสมที่มีประสิทธิภาพ สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่คำนึงถึงกำลังการผลิต และค่าความหนืดของของไหล [1] ระบบการทำงานที่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการออกแบบใบกวนผสมให้สามารถทำงานได้ตามข้อกำหนด โดยจะต้องอาศัยองค์ความรู้หลายด้าน ทั้งในส่วนการออกแบบชิ้นส่วนทางกล อาทิเช่น การออกแบบเพลลา การออกแบบระบบส่งกำลัง และการออกแบบมุมปะทะของใบพัดกวนผสม เป็นต้น โดยมีรายงานวิจัยต่าง ๆ ได้ทำการเลือกนำเอาเทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเข้ามาจำลองสนามการไหลขณะที่มีการกวนผสมภายในถังผสม ก็เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกวนผสมของใบกวนแต่ละประเภท ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2],[3] และนอกจากนั้นยังพบงานวิจัยที่ได้นำหลักการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลมาใช้ในการออกแบบใบกวนภายในถังผสม โดยจะใช้รูปแบบการจำลองผลด้วยสมการเวียร์-สโตคส์แบบค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน K-epsilon [4] ส่วนการทดสอบจริงเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของการผสมในถังปั่นกวนนั้น มีข้อเสียคือ ต้องใช้เวลานาน ค่าใช้จ่ายสูง และมีความยากลำบากในการเก็บผลลัพธ์ของตัวแปรบางชนิดในทางกลับกัน หลักการทางพลศาสตร์ของไหลจะใช้รูปแบบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและสามารถทำการเพื่อกำหนดลำดับขั้นตอนในการแก้สมการควบคุมการไหลภายในถังผสม ซึ่งจะสามารถลดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายได้มาก การออกแบบใบพัดกวนผสมสามารถออกแบบได้หลายวิธีเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่ใช้หรือออกแบบให้สามารถง่ายต่อการทำการปรับปรุงหรือการบำรุงรักษา ในการการปรับปรุงสามารถทำการถอดประกอบใบพัดกวนผสมได้ เพื่อให้สามารถทำงานได้หลากหลายประเภท

[5]จากการศึกษาที่ผ่านมาได้พบรายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการออกแบบและวิเคราะห์รูปร่างของกังหันกวนผสมโดยใช้หลักการทางพลศาสตร์ของไหล โดยมีการศึกษาบางส่วนได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับใบพัดกวนผสมด้วยการใช้หลักการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [6] โดยรายงานว่า มุมปะทะ 30 องศาของใบกวนผสมที่ใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที สามารถผสมกันได้ 60% ที่เวลา 8 วินาที และการใช้ใบกวนแบบ 35, 40 และ 45 องศา แอปเปิ้ลสามารถเคลื่อนที่ไปผสมกับน้ำได้ 30% ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที นอกจากนี้การใ้ใบกวนที่มุม 30 องศาจะให้ค่าการหมุนวนของของเหลวได้ดีกว่ามุม 35, 40 และ 45 องศา เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน ส่วนงานวิจัยที่ทำการศึกษารูปแบบของความเร็วในแนวรัศมีที่ใช้ใบกวนผสมแบบ Helix Blade และ Curve Blade ผลของงานวิจัยพบว่าค่าความเร็วในแนวรัศมีที่ใช้ใบกวนผสมแบบ Helix Blade และ Curve Blade จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปทรงใบกวนผสม [7] จากความสำคัญของงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้รู้ว่าการพัฒนาต้นแบบใบกวนผสมให้เหมาะสมกับงานจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนผสม อีกทั้งยังสามารถลดพลังงานที่สูญเสียไปกับการกวน

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเอาแนวคิดที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เลขที่ 62881 เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ [5] มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาใบพัดกวนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์มะม่วงกวน เพื่อใช้ในการพัฒนาและการแปรรูปอาหารประเภทต่าง ๆ สำหรับชุมชน และสามารถช่วยเหลือกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรที่กำลังประสบกับปัญหาการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส CO-VID19 ในประเทศไทย ส่งผลทำให้ขาดแคลนรายได้ต่อครัวเรือนตลอดระยะเวลา 2 ปี ทำให้เกิดปัญหาเศรษฐกิจอย่างร้ายแรงและทำให้ธุรกิจส่วนใหญ่ของประเทศชะลอตัวลง ส่งผลให้รัฐบาลเห็นความสำคัญของการพัฒนาและฟื้นฟูเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างเร่งด่วน ดังนั้นวิสาหกิจชุมชนจึงถือได้ว่าเป็นหน่วยงานท้องถิ่นที่สำคัญในการขับเคลื่อนและสามารถช่วยฟื้นฟูเศรษฐกิจได้อย่างเหมาะสมในปัจจุบัน และใน

ปัจจุบันวิสาหกิจชุมชนยังมีบทบาทสำคัญในการช่วยพัฒนาต้นแบบสินค้าเกษตรในด้านต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ สิ่งทอ เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้ นักวิจัยได้คัดเลือกกลุ่มแม่บ้าน ตำบลคงคู่ อำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดสุโขทัย เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา หลังจากนั้นผู้วิจัยลงพื้นที่วิจัยเพื่อเก็บข้อมูล พบว่ากลุ่มแม่บ้านเกษตรกรในพื้นที่ดังกล่าว มีอาชีพในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากมะม่วงเพื่อจัดหน่วยในพื้นที่และต่างจังหวัดใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กลุ่มแม่บ้าน ต.คงคู่ อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย

ซึ่งพื้นที่วิจัยที่ได้เก็บข้อมูล พบว่ามีการปลูกมะม่วงจำนวนมากและมะม่วงส่วนใหญ่เป็นพันธุ์น้ำดอกไม้ การคัดเลือกผลมะม่วงของกลุ่มแม่บ้านนั้น จะมีการคัดขนาด 2 แบบ คือ ผลมะม่วงที่มีขนาดใหญ่จะกำหนดเป็นเกรด A ส่วนผลมะม่วงน้ำดอกไม้มีขนาดกลางและขนาดเล็ก จะกำหนดเป็นเกรด B และผลมะม่วงที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ที่มีขนาดไม่เหมาะสมจึงนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เรียกว่ามะม่วงกวน เพื่อเพิ่มมูลค่าสินค้าต่อไป ปัจจุบันกรรมวิธีแปรรูปผลมะม่วงของแม่บ้านเกษตรกรยังใช้แรงงานคนเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ปริมาณการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด จึงไม่สามารถแปรรูปผลมะม่วงจำนวนมากได้ ส่งผลให้ผลมะม่วงเน่าเสียเป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยเมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการพัฒนาเครื่องต้นแบบของเครื่องผสมแบบต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานและความต้องการของชุมชน [8] เขาได้พัฒนาเครื่องผสมมะม่วงที่ใช้ความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) สำหรับชุมชน พบว่าความเร็วที่เหมาะสมในการกวนมะม่วงสุกคือ 21 รอบต่อนาที นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องกวนขนมเปียกปูนรูปสี่เหลี่ยมสำหรับใช้ในชุมชน โดยพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกวนขนมเปียกปูนรูปสี่เหลี่ยมคือ 54 รอบต่อนาที [9] และนอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและทำการทดลองเพื่อพัฒนาเครื่องกวน

น้ำปลาร้าสำหรับใช้ในวิสาหกิจชุมชนด้วยความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที สามารถทำงานได้ที่ 160 กก. ต่อวัน [10] จากปัญหาในรูปแบบดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหากระบวนการทางวิศวกรรมสำหรับกระบวนการผลิตและรูปแบบของการแปรรูปผลมะม่วงสำหรับกลุ่มแม่บ้านที่ยังคงประสบปัญหาการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาดในด้านต่างๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มองถึงความสำคัญในการพัฒนาชุมชนด้านการผลิตมะม่วงกวน ตามแผนการฟื้นฟูเศรษฐกิจและสังคมจากผลกระทบของไวรัสโควิด-19 จึงได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลทางเทคนิค เช่น เวลา กวนผสม ความร้อนและความหนืดของการกวนมะม่วง เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมมะม่วง และสามารถแก้ไขปัญหาของ การผลิตมะม่วงกวนไม่เพียงพอ เพื่อแก้ปัญหานี้เราจะออกแบบเครื่องผสมมะม่วงใหม่ทั้งหมด ความหนาแน่นของมะม่วงเป็นคุณสมบัติหลักในการสร้างแรงบิดสูงบนใบพัดของเครื่องกวนผสม ดังนั้นเราจะพิจารณาการออกแบบถึงผสมและใบมีดผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้กับความหนาแน่นเฉลี่ยของมะม่วงกวนเท่ากับ 1.79 Pa.s ที่อุณหภูมิคงที่ 97 องศาเซลเซียส [8]

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาใบพัดกวนผสมที่ได้จากองค์ความรู้ของสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศ เลขที่ 62881

2.2 เพื่อจำลองและทำการเปรียบเทียบสนามความเร็วในถังกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่ระดับความเร็วการหมุน 10, 15, 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

3. ระเบียบวิธีวิจัย

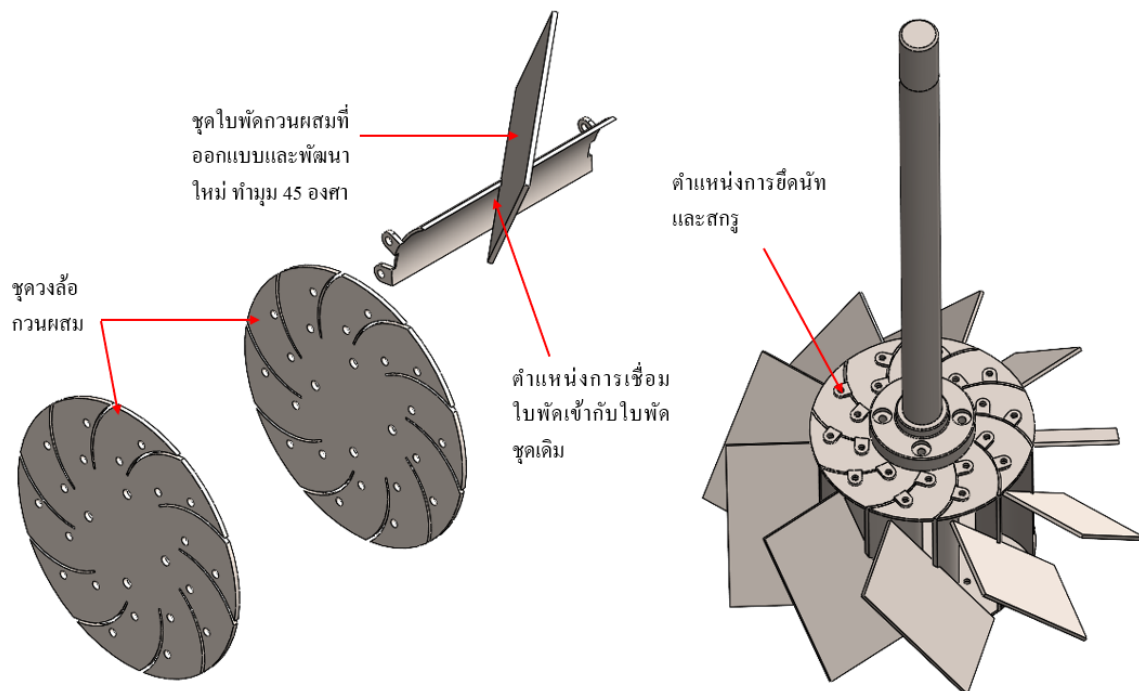
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เริ่มต้นการทำวิจัยโดยได้ลงพื้นที่จริงในตำบลคงคู่ อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย และได้ทำการพูดคุยกับกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรที่ได้ทำการแปรรูปมะม่วงกวน พบว่ามีปัญหาและต้องการเครื่องมือทุนแรงมาช่วยในการทำงานเพื่อเพิ่มผลผลิต จากการศึกษาข้อมูลในเบื้องต้น

ผู้วิจัยจึงได้กำหนดทิศทางการออกแบบสำหรับพัฒนาใบกวนผสมขึ้นมาใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับมะม่วงกวน โดยได้ทำการศึกษาต้นแบบจากชิ้นส่วนเครื่องกลเดิมอากาศในน้ำสำหรับการกวนผสมของเหลว ที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เลขที่ 62881 [5] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองเครื่องกลเดิมอากาศในน้ำ [5]

จากรูปที่ 2 พบว่าแบบจำลองชิ้นส่วนเครื่องกลเดิมอากาศในน้ำที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์มีจุดเด่นคือ ชุดใบพัดกวนผสมสามารถทำการถอดประกอบออกจากชุดวงล้อได้ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดนี้มาทำการออกแบบและพัฒนาชุดใบพัดขึ้นมาใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับการกวนผสมเนื้อมะม่วงกวนที่มีความหนืดสูงในงานวิจัย และชุดใบพัดที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนา ยังสามารถทำการประกอบเข้ากับชุดวงล้อเดิมได้ตามปกติโดยไม่มีการดัดแปลงอะไรเพิ่มเติม ชุดใบพัดที่ทำการออกแบบใหม่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3

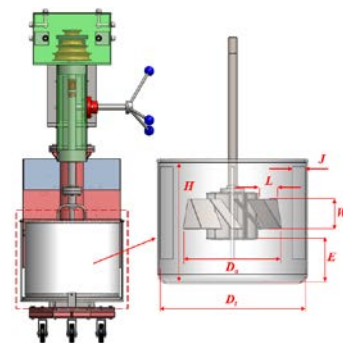


รูปที่ 3 แบบจำลองใบพัดกวนผสมเนื้อมะม่วงกวนที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาจากสิทธิบัตรการออกแบบ

ระเบียบวิธีการวิจัยในงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วยกระบวนการออกแบบและพัฒนาใบกวนผสมเนื้อมะม่วงกวน โดยมีข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญดังนี้คือ

3.1 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบและการกำหนดสัดส่วนใบพัดและถังกวนผสม

ระบบการทำงาน การออกแบบใบพัดกวนผสมและถังผสมเนื้อมะม่วงกวน จะเริ่มต้นจากการกำหนดขนาดและสัดส่วนต่าง ๆ ทางทฤษฎี [11], [12] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราส่วนการกำหนดขนาดระหว่างใบพัดกวนผสมและถังผสมเนื้อมะม่วงกวน

จากรูปที่ 4 ผู้วิจัยสามารถแจกแจงรายละเอียดของตัวแปรอัตราส่วนขนาดทางทฤษฎีสำหรับการออกแบบใบพัดและถึงกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวได้ดังนี้ [12]

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (1)$$

$$\frac{H}{D_t} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad (3)$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (4)$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad (5)$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad (6)$$

เมื่อ D_a คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสม

D_t คือ เส้นผ่านศูนย์กลางถังกวนผสม

H คือ ความสูงของถังกวนผสม

E คือ ระยะห่างระหว่างวงล้อกวนผสมกับพื้นผิวล่างสุดของถังผสม

J คือ ความหนาของคียบ (Baffle)

W คือ ความกว้างของใบพัดกวนผสม

L คือ ความยาวของใบพัดกวนผสม

t คือ ความหนาของใบพัดกวนผสม

3.2 ระบบสมการพื้นฐาน Navier-Stokes

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณารูปแบบของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุมพบว่าจะมีค่าเท่ากับผลต่างของสนามความเร็วของการไหลที่ไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตรควบคุม และสามารถนำมาทำการเขียนในรูปของสมการของระบบควบคุมของสนามการไหลสำหรับงานวิจัยนี้ได้ดังนี้

3.2.1 สมการอนุรักษ์มวล [12], [13]

รูปแบบพื้นฐานของระบบสมการอนุรักษ์มวลสำหรับการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (7)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (7)$$

3.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม [12], [13]

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของสนามการไหลของของไหล เมื่อเราทำการพิจารณาจะพบว่า อัตราของ

โมเมนตัมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจะเท่ากับผลรวมของแรงที่เกิดในสนามการไหล ซึ่งสามารถนำมาเขียนในรูปสมการได้ดังสมการที่ (8)-(10)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + S_{Mz} \quad (10)$$

3.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

อัตราการเพิ่มขึ้นของรูปแบบพลังงานในระบบของของไหล เมื่อเราทำการพิจารณาจะพบว่า อัตราของพลังงานของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าเท่ากับอัตราความร้อนสุทธิที่มีค่าเพิ่มขึ้นในของไหล และบวกด้วยอัตราของงานสุทธิที่กระทำต่อของไหล โดยสามารถเขียนรูปสมการเพื่อทำการอธิบายพฤติกรรมได้ดังสมการที่ (11) [12],[13]

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(u p)}{\partial x} + \frac{\partial(v p)}{\partial y} + \frac{\partial(w p)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{y} \quad (11)$$

3.3 รูปแบบการสิ้นเปลืองพลังงานในการกวนผสม

การสิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากการผสม เป็นการพิจารณากำลังงานที่เกิดจากการผสมสำหรับของไหลผสมแต่ละชนิด โดยการพิจารณาตัวแปรดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของของไหล (ρ) และอัตราความหนืดสมบูรณ์ (μ) ของของไหลแต่ละชนิด นอกจากนั้นยังอาจรวมไปถึง สัดส่วนของขนาดใบพัดกวนผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสม ความสูงของถังผสม และค่าความเร็วรอบการหมุน เป็นต้น ในการออกแบบระบบการทำงานของเครื่องจักรกวนผสมแต่ละชนิด จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ เช่น ตัวเลขกำลัง (Power Number, N_p) และเลขเรย์โนลด์ (Reynolds

Number, N_{Re}) [12],[13] ซึ่งรูปแบบของสมการตัวเลขกำลังและตัวเลขเรย์โนลด์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (12) และ (13) [12]

$$N_p = \frac{P}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (12)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho N D_a^5}{\mu} \quad (13)$$

การพิจารณารูปแบบการไหลของสนามการไหลภายในถังกวนผสม เราสามารถทำการพิจารณาได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ โดยช่วงการไหลแบบต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้ ถ้าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Zone) จะมีตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10,000 แต่ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Zone) จะพบว่ามีตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 10-20 และถ้าเป็นการเปลี่ยนผ่านการไหลที่อยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Transition Zone) จะมีตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 20-10,000 [6],[9] ดังนั้น รูปแบบของค่าพลังงานที่เกิดจากการผสมแบบปั่นป่วนในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (14) และค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการกวนผสมแบบราบเรียบสามารถคำนวณหาได้ด้วยสมการที่ (15)

$$P = K_T N^3 D_a^5 \rho \quad (14)$$

$$P = K_T N^2 D_a^3 \rho \quad (15)$$

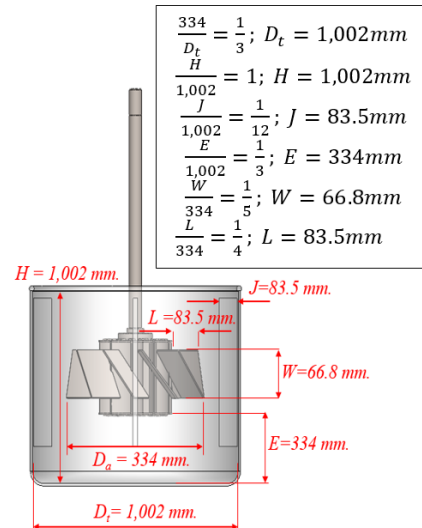
โดยค่าตัวแปร K_T จะขึ้นอยู่กับชนิดของใบพัดกวนผสมแต่ละชนิด และพิจารณาการติดตั้งครีป (Baffle) และไม่มีการติดตั้งครีปภายในถังกวนผสม

3.4 การออกแบบและการคำนวณ

3.4.1 การออกแบบสัดส่วนสำหรับการกวนผสม

จากรูปที่ 4 เราสามารถทำการออกแบบสัดส่วน โดยทำการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสมเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบกระบวนการผสมในงานวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสมเบื้องต้นเท่ากับ 334 มิลลิเมตร หลังจากนั้นสามารถคำนวณหาขนาดสัดส่วนที่เหมาะสมของใบพัดกวนผสม

เนื้อเมมเบรนเหลวและถังกวนผสมเนื้อเมมเบรนเหลวได้จากสมการที่ (1)–(6) พร้อมทั้งจะได้ผลลัพธ์ของสัดส่วนต่าง ๆ ของการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงรายการของสัดส่วนต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

3.4.2 การคำนวณกำลังงานสำหรับกวนผสม

ในการคำนวณกำลังงานสำหรับการกวนผสมเมมเบรนเหลว ผู้วิจัยจะอาศัยค่าของน้ำหนักของเนื้อเมมเบรนเหลวที่ผ่านกรรมวิธีด้วยอุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส พบว่ามีน้ำหนักเท่ากับ 75 กิโลกรัมโดยประมาณ และส่วนของใบพัดกวนผสม ผู้วิจัยได้กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางในเบื้องต้นเท่ากับเท่ากับ 334 มิลลิเมตร พร้อมกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวนผสมเท่ากับ 1,002 มิลลิเมตร และมีความสูงของถังกวนผสมเท่ากับ 1,002 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 และสามารถนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การคำนวณหาความหนาแน่นของเนื้อเมมเบรนเหลวสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (16)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (16)$$

$$\text{โดยที่ } V = \left(\frac{3.14 \times 1.002^2}{4} \right) \times 0.5 = 0.394 \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{75 \text{ kg}}{0.394 \text{ m}^3} = 190.36 \text{ kg/m}^3$$

2. คำนวณหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (17)

$$Re = \frac{\rho D_a^2 n}{\mu} \quad (17)$$

$$\text{จะได้ } Re = \frac{(190.36 \frac{kg}{m^3}) \times (0.334^2) m^2 \times (\frac{30}{60}) \frac{1}{s}}{1800 cP \times 0.1 \frac{kg}{m \cdot s}} = 5.89$$

3. คำนวณหาพลังงานสำหรับการกวนผสม (P)

เนื่องจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณหาได้จากสมการที่ (17) พบว่ามีค่าที่น้อยกว่า 10 เพราะเป็นของไหลที่มีความหนืดแบบนอนนิวโตเนียน ดังนั้นเราจึงเลือกใช้สมการเพื่อคำนวณหาพลังงานสำหรับการกวนผสมได้ดังสมการที่ (18) และในงานวิจัยนี้ จำนวนใบพัดกวนผสมมีจำนวน 10 ใบพัด ซึ่งค่า K_L สำหรับใบพัดกวนผสมที่เป็นแบบก้านหัน ที่แสดงในตารางที่ 1 มีค่าสูงสุดที่ 44.5 [14] ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่านี้ในการสมมติในเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ

$$P = \frac{K_L n^2 D_a^5 \mu}{g_c} \quad (18)$$

$$\text{จะได้ } P = \frac{44.5 \times (\frac{30}{60})^2 \frac{1}{s^2} \times (0.334^5) m^5 \times (1800 cP \times 0.1 \frac{kg}{m \cdot s})}{1 \frac{kg \cdot m}{N \cdot s^2}}$$

$$\therefore P = 0.746 kW$$

$$\therefore P = 1 HP$$

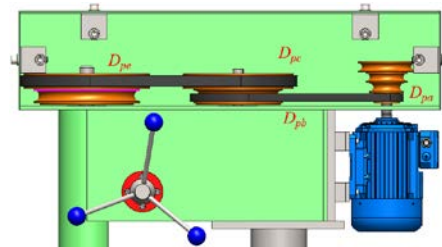
ตารางที่ 1 ตารางแสดงตัวประกอบการคูณ K_L

Type of Impeller	K_L
(Propeller, three blades)	
- (Pitch 1.0)	41
- (Pitch 1.5)	55
Turbine	
- (Six-blade disk) (S3=0.25, S4=0.2)	65
- (Six-curved blades (S4=0.2)	-
- (Six-curved pitch) 45o (S4=0.2)	70
- (Four-curved pitch) 45o (S4=0.2)	44.5
- (Flat paddle, two blades (S4=0.2)	36.5
- (Anchor)	300

3.4.3 การคำนวณหาขนาดเพลาส่งกำลังและต้นกำลังทางกลของเครื่องกวนผสมมะม่วง

1. คำนวณหาการหมุนสำหรับการกวนผสม

พลังงานที่ได้จากการกวนผสมที่คำนวณหาได้อยู่ที่ 0.746 kW หรือประมาณ 1 HP เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาขนาดมอเตอร์กำลังที่มีขายในท้องตลาดพบว่า มอเตอร์ขนาด 1 HP จะให้รอบการหมุนที่ 1,000 รอบต่อนาที สำหรับการหมุนแบบซิงโครนัส (Synchronous) จะได้รอบการหมุนจริงเท่ากับ 930 รอบต่อนาที แต่ในการกวนผสมสำหรับมะม่วงกวนจะใช้รอบการหมุนสูงสุดที่ 30 รอบต่อนาที ดังนั้นจำเป็นต้องทำการทดรอบ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวแปรขนาดของ Pulley สำหรับการคำนวณ

จากรูปที่ 6 กำหนดให้ ขนาดของ Pulley มีค่าเท่ากับ: $D_{pa} = 30mm$, $D_{pb} = D_{pc} = 500mm$, $D_{pe} = 900mm$

จากสมการที่ (19) และ (20) จะได้

$$i_1 = \frac{N_{pa}}{N_{pb}} = \frac{D_{pb}}{D_{pa}} \quad (19)$$

$$i_2 = \frac{N_{pc}}{N_{pe}} = \frac{D_{pe}}{D_{pc}} \quad (20)$$

$$\text{โดย } i_1 = \frac{930 \text{ rpm}}{N_{pb}} = \frac{500 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} \approx 55.8 \text{ rpm}$$

$$i_2 = \frac{55.8 \text{ rpm}}{N_{pe}} = \frac{900 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} \approx 31 \text{ rpm} \approx 30 \text{ rpm}$$

2. ความเร็วเฉลี่ยของเหลวภายในถังผสม ($\bar{u}$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (21) [15]

$$\bar{u} = \frac{1.586 \omega D^2}{(T^2/Z)^{1/3}} \quad (21)$$

$$\text{โดยที่ } 30 = \frac{\omega \times 60}{2\pi} \approx 3.14 \text{ rad/s และค่า } Z = 0.5 \text{ m}$$

$$\text{จะได้ } \bar{u} = \frac{1.586 \times 3.14 \times 0.334^2}{(1.002^2/0.5)^{1/3}} = 0.44 \text{ m/s}$$

3. การคำนวณหาแรงบิด (T) ดังสมการที่ (22) [16]

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \quad (22)$$

$$\text{จะได้ } 746 = \frac{2 \times 3.14 \times 30 \times T}{60} \quad T = \frac{746 \times 60}{2 \times 3.14 \times 30} = 237.58 \text{ N.m}$$

4. คำนวณแรงบนใบพัดกวนผสมและค่าโมเมนต์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (23) [16]

$$F = \frac{P}{u} \quad (23)$$

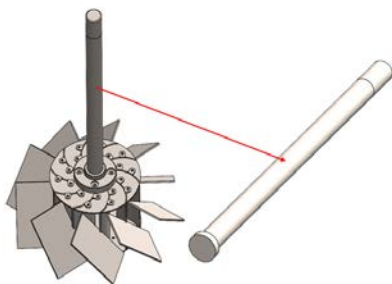
$$\text{จะได้ } F = \frac{746}{0.44} \approx 1,695 \text{ N} \quad M = 1,695 \text{ N} \times 0.167 \text{ m} \approx 283 \text{ N.m}$$

5. คำนวณหาเพลาส่งกำลัง

การคำนวณหาขนาดเพลาส่งกำลังในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (24) ผู้วิจัยจะเลือกใช้ค่า $\tau_d = 55 \text{ N/mm}^2$ และทำการกำหนดค่าสำหรับความล้าจากแรงกระตุกอย่างสม่ำเสมอในส่วนของ $C_m = 3.0$ และค่า $C_t = 3.0$ [16] และจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau_d} [(C_t T)^2 + (C_m M)^2]^{1/2} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } d^3 &= \frac{16 \times 10^3}{3.14 \times 55} [(3 \times 238)^2 + (3 \times 283)^2]^{1/2} \\ d &= \sqrt[3]{\frac{16 \times 10^3}{3.14 \times 55} [(3 \times 238)^2 + (3 \times 283)^2]^{1/2}} \\ d &= 45.39 \text{ mm} \text{ เลือกใช้ที่ } d = 40 \text{ mm} \end{aligned}$$

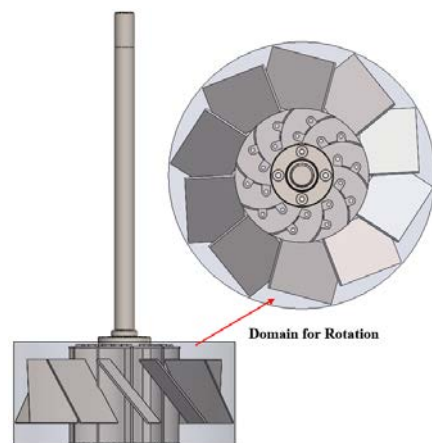


รูปที่ 7 แสดงขนาดเพลาส่งกำลังที่ได้จากการคำนวณ

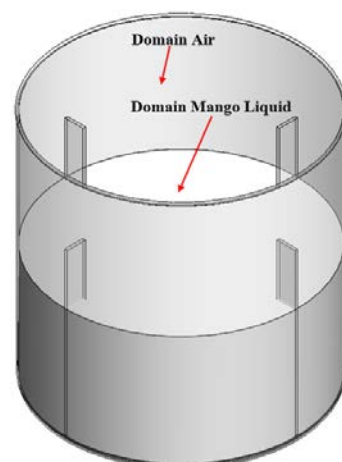
3.5 การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเริ่มต้นจากการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเป็นแบบระบบการวิเคราะห์แบบภายใน (Internal Flow

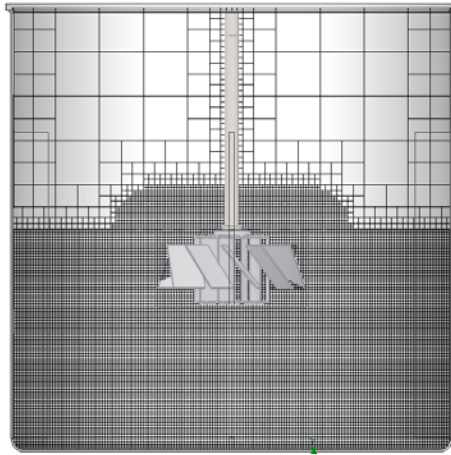
Analysis) ภายใต้การวิเคราะห์แบบการไหลสองสถานะแบบผิวอิสระ (Free Surface) คืออากาศและของเหลว หลังจากนั้นทำการสร้างโดเมนการหมุนให้กับชุดใบพัดกวนผสม ดังรูปที่ 8 พร้อมทำการกำหนดการหมุนของชุดใบพัดกวนผสมเป็นแบบ Local region (Sliding) ที่มีความเร็วรอบคงที่ดังนี้ 10, 15, 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที ตามลำดับ และทำการสร้างโดเมนของก้อนของไหลที่ใช้สำหรับการจำลองการกวนมะม่วง ดังรูปที่ 9 พร้อมทำการกำหนดคุณสมบัติของมะม่วง (Initial Condition) ดังตารางที่ 2 และขั้นตอนสุดท้ายคือการสร้างเมชเอลิเมนต์ โดยทำการปรับคุณสมบัติเมชเอลิเมนต์เป็นแบบ Equidistant refinement โดยทำการปรับค่า Maximum equidistant level เท่ากับ 5 และทำการปรับค่าตัวแปรของ Offset distance เท่ากับ 0.1 เมตร จะได้ผลลัพธ์การสร้างเมชเอลิเมนต์สำหรับงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 แสดงโดเมนสำหรับการหมุน



รูปที่ 9 แสดงโดเมนสำหรับของไหล (ก้อนของเหลวสำหรับมะม่วงกวน)

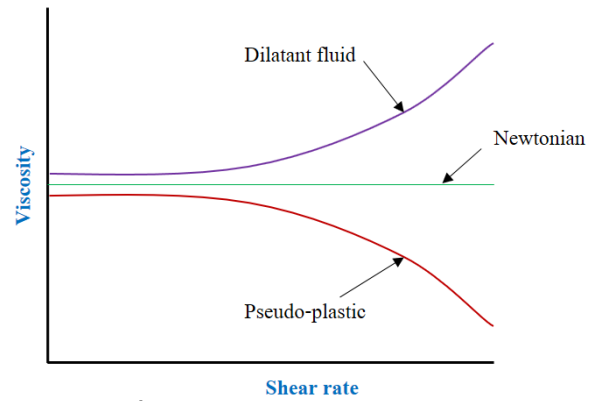


รูปที่ 10 แสดงเมชเอลิเมนต์ของโคเมนโบปัดและก้อนของไหลเหลวสำหรับมะม่วงหวาน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมะม่วงหวาน

Type of values	Parameter
Density	190.36 kg / m ³
Specific Heat	3,390 J / (kg.k)
Thermal Conductivity	0.5 W / (m.k)
Viscosity	Herschel-Bulkley Model
Consistency Coefficient	1.8 Pa. s
Yield Stress	3.0 Pa
Power Law Index	0.23

จากตารางที่ 2 พบว่าเนื้อมะม่วงหวานที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 98 องศา ได้มีพฤติกรรมของความหนืดเป็นไปตามรูปแบบของ Herschel-Bulkley Model หรือเป็นแบบ Pseudo plastic [17], [18] กล่าวคือ เนื้อมะม่วงหวานเมื่อได้รับความร้อนจนถึงช่วงเวลาหนึ่ง และเหลวนี้ได้รับแรงกระทำจากการกวนผสมที่เกิดจากใบพัดกวนผสมเพียงพอ ก็จะสามารถเอาชนะค่าความเค้น ณ ตำแหน่งของจุดคราก (Yield stress) ผลที่เกิดขึ้นนั้น สามารถทำให้เนื้อมะม่วงหวานสามารถเคลื่อนที่หรือไหลได้ เมื่อเราทำการพิจารณาพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudo plastic พบว่ารูปแบบการไหลแบบนี้เป็นของไหลประเภทนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) [19] และรูปแบบของการไหลประเภทนี้มีคุณสมบัติเฉพาะคือ เมื่อทำการเพิ่มอัตราเฉือน (Shear rate) ให้สูงขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) มีค่าลดลง ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบของพฤติกรรมได้จากรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงรูปแบบพฤติกรรมกรไหล

ในการทดสอบผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเวลาในการคำนวณเท่ากับ 10 วินาที และกำหนด Step time เท่ากับ 0.2 วินาที ซึ่งสามารถคำนวณหา Step time ได้จากสมการที่ (25)

$$\text{Step time} = \frac{60}{n \times z} \quad (25)$$

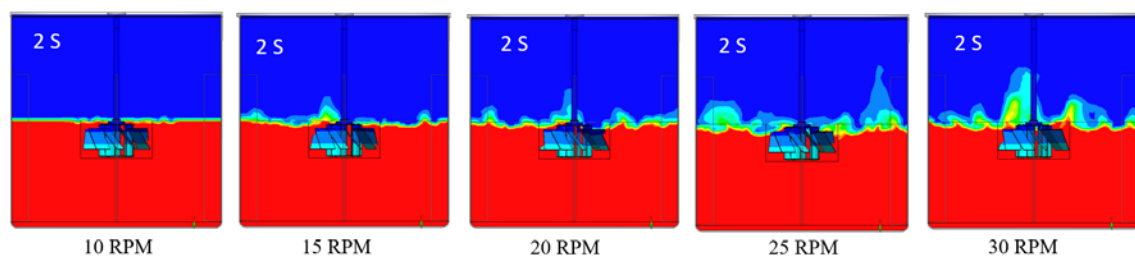
โดยที่ n คือ รอบการหมุน (rpm)

z คือ จำนวนใบพัดกวนผสม

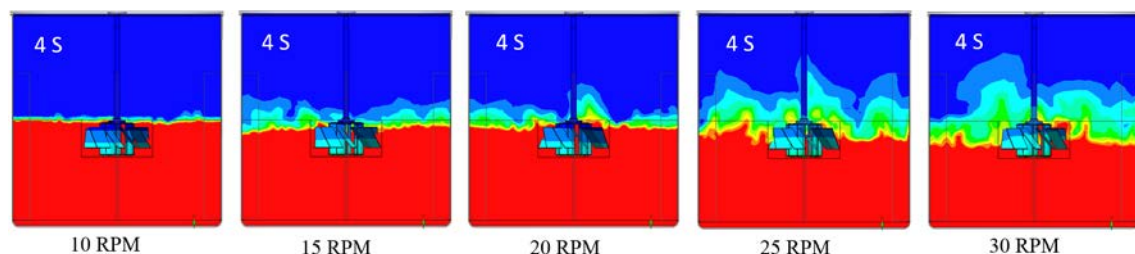
4. ผลการจำลองเชิงตัวเลข

4.1 การจำลองผล Volume Fraction

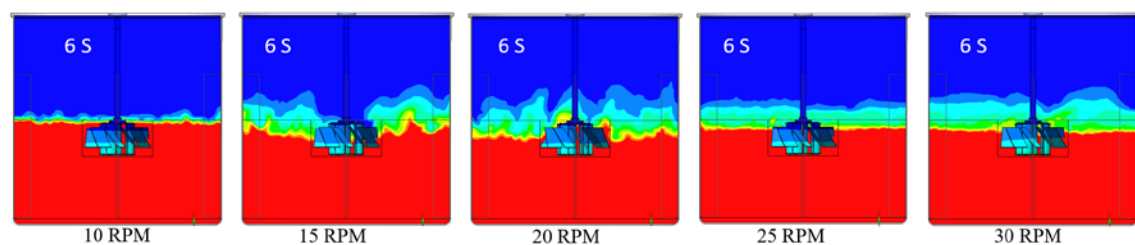
ขั้นตอนของกระบวนการจำลองผลลัพธ์สำหรับ Volume Fraction หรือการจำลองแบบ VOF (Volume of Fluid) สำหรับผิวอิสระของเนื้อมะม่วงหวานสำหรับการวิเคราะห์การกวนผสมในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 และนอกจากนี้ ผู้วิจัยยังสามารถทำการจำลองการไหลระหว่างการผสมของของไหล 2 ชนิด คือมะม่วงหวานและอากาศภายในถังผสม ด้วยส่วนต่อประสานที่เคลื่อนไหวได้อย่างอิสระระหว่างของเหลวสองชนิด คือ อากาศและเนื้อมะม่วงหวาน ที่ไม่สามารถผสมเข้ากัน และจะแสดงผลอยู่ในรูปของ Immiscible Non-Newtonian Liquid ดังแสดงในรูปที่ 13 หลังจากนั้นผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล มาทำการคำนวณหาค่าตัวเลขกำลังโดยทำการพิจารณาจากตัวเลขค่าเรย์โนลด์ส เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสม และรอบการหมุนที่ใช้สำหรับการกวนผสมมะม่วงหวาน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 14



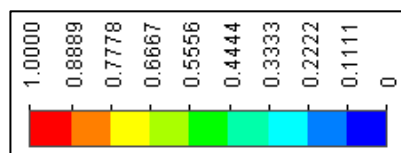
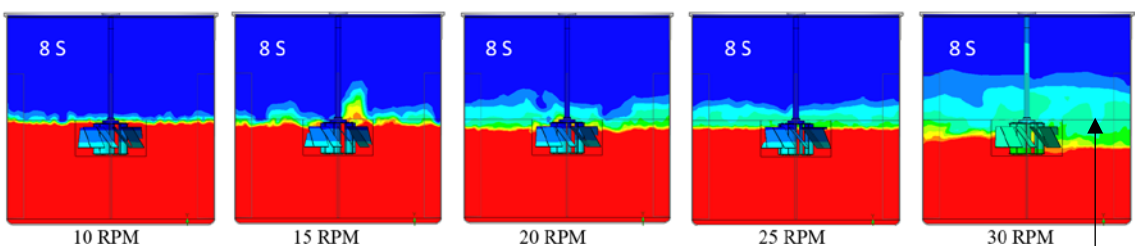
(a) Volume Fraction ของการกวนเนื้อเมฆเหลวที่เวลา 2 วินาที



(b) Volume Fraction ของการกวนเนื้อเมฆเหลวที่เวลา 4 วินาที

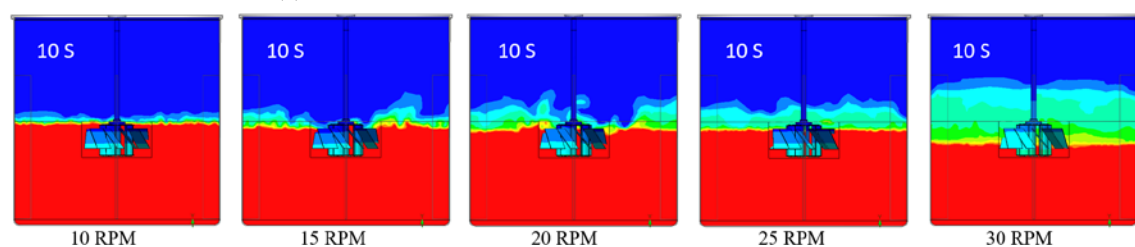


(c) Volume Fraction ของการกวนเนื้อเมฆเหลวที่เวลา 6 วินาที



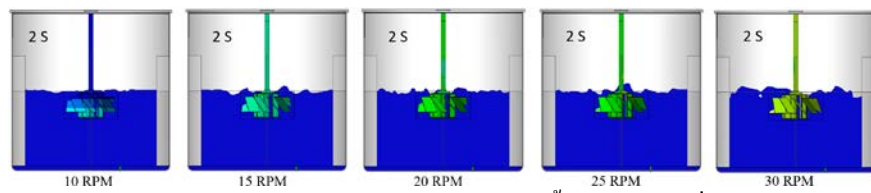
ตำแหน่งชั้นของการแตกตัวของอนุภาคของไหล

(d) Volume Fraction ของการกวนเนื้อเมฆเหลวที่เวลา 8 วินาที

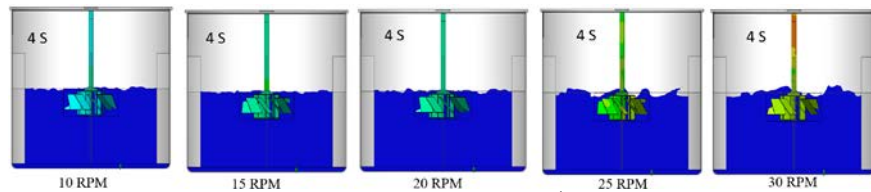


(e) Volume Fraction ของการกวนเนื้อเมฆเหลวที่เวลา 10 วินาที

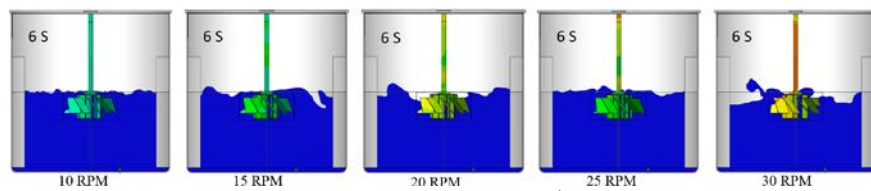
รูปที่ 12 แสดงผลการจำลอง Volume Fraction ที่รอบการหมุนของใบพัดกวนผสมต่าง ๆ



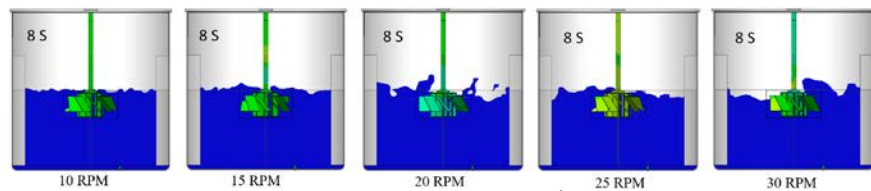
(a) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 2 วินาที



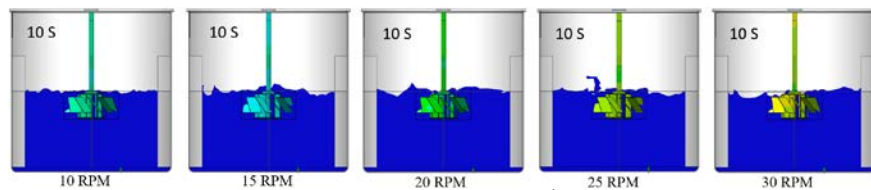
(b) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 4 วินาที



(c) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 6 วินาที



(d) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 8 วินาที

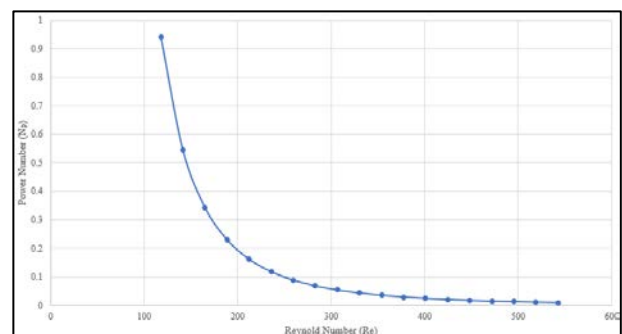


(e) Immiscible Non-Newtonian Liquid ของการกวนเนื้อมะม่วงเหลวที่เวลา 10 วินาที

รูปที่ 13 แสดงผลการจำลอง Immiscible Non-Newtonian Liquid ที่รอบการหมุนของใบพัดความเร็วต่าง ๆ

จากรูปที่ 13 สามารถอธิบายผลลัพธ์ในรูปแบบ Immiscible Non-Newtonian Liquid เพิ่มเติมได้ดังนี้คือ รูปแบบของ Immiscible Non-Newtonian Liquid ในโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation จะใช้สำหรับจำลองการไหลด้วยส่วนต่อประสานที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระระหว่างของเหลวสองชนิดที่เข้ากันไม่ได้ เช่น น้ำ และอากาศ โดยเฉพาะงานที่ต้องการแสดงผลในรูปแบบการแตกตัวของอนุภาคหรือการกระเพื่อมในการไหลประเภทต่าง ๆ จากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้มองเห็นถึงหลักการและเทคนิคสำคัญที่ค้นพบ จึงได้นำเทคนิคดังกล่าวของการจำลองผลเชิงตัวเลขสำหรับฟลูอิดระบบของไหลมาเสนอ

เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปแบบการเคลื่อนที่ของฟลูอิดระบบเนื้อมะม่วงเหลวที่เกิดจากรอบการหมุนต่าง ๆ



รูปที่ 14 แสดงค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 14 ผลจากการศึกษาและทำการคำนวณผลโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของใบพัดกวนผสมจำนวน 10 ใบพัด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 334 มิลลิเมตร และถังผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,002 มิลลิเมตร โดยใช้ค่าความหนาแน่นของเนื้อมะม่วงเหลวที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียสเท่ากับ 190.36 kg/m^3 ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (16) และทำการคำนวณผลโดยทำการพิจารณารอบการหมุนในช่วง 2-30 รอบต่อนาที ผลที่ได้พบว่าค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อเราทำการเพิ่มรอบการหมุนที่สูงขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าตัวเลขกำลังมีค่าที่ลดลง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า รูปแบบของการไหลที่เกิดขึ้นในระบบ ได้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนทิศทางในการไหลอย่างกระทันหัน กล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มรอบการหมุนให้สูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดการปรับเปลี่ยนจากการไหลวนขนาดเล็กให้กลายเป็นโครงสร้างการไหลวนขนาดใหญ่เกิดขึ้นในระบบการกวนผสม ทำให้ของไหลแบบนอนนิวโตเนียนที่มีความหนืดสูงมีการเคลื่อนที่ของการไหลได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่ากำลังงานสำหรับการกวนผสมของของไหลที่มีความหนืดสูงมีค่าที่ลดลง เนื่องจากความต้องการที่น้อยลงในการใช้พลังงานกวนผสมที่ต้องการชนะแรงเฉื่อยในระบบการกวนผสม

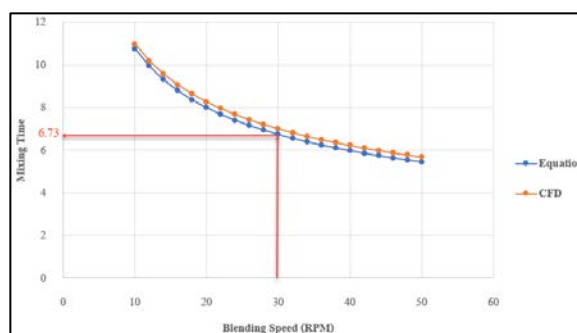
ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล ในรูปแบบการวิเคราะห์แบบผิวอิสระ (VOF) ผลที่ได้พบว่า ค่าความเร็วรอบการหมุนในการกวนผสมที่ 30 รอบต่อนาที จะให้ผลอัตราการผสมที่ดีที่สุด เมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับรอบการหมุนการกวนผสมที่ 10, 15, 20 และ 25 รอบต่อนาที ส่วนการวิเคราะห์ในรูปแบบ Volume Fraction และ Immiscible Non-Newtonian Liquid ดังรูปที่ 12 และ 13 ผลที่ได้พบว่า ที่ค่าความเร็วรอบการหมุนสำหรับการกวนผสมที่ 30 รอบต่อนาที ที่เวลา 10 วินาที จะแสดงผลในการติของไหลให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคของชั้นการไหลที่สูงกว่าความเร็วรอบอื่น ๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งแสดงว่าการกระเพื่อมทำให้เกิดลูกคลื่นหรือการแตกตัวของของเหลวของเนื้อมะม่วงในงานวิจัยนี้ยังมีการกระเพื่อมหรือเกิดลูกคลื่นสูงเท่าไร ก็ยังทำให้

อัตราการกวนผสมของเหลวมีประสิทธิภาพที่สูงตามไปด้วย และจะส่งผลให้การสิ้นเปลืองกำลังงานในการกวนผสมที่น้อยลง ทำให้ประหยัดไฟฟ้าได้ดีขึ้น จากรูปที่ 14 เมื่อทำการพิจารณาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ได้จากการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลพบว่า เมื่อค่าความเร็วรอบสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าที่สูงตามไปด้วย และจะส่งผลทำให้ค่าตัวเลขกำลังมีค่าที่ลดลง หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการพิจารณารอบการหมุนของการกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่เกิดจากรอบของมอเตอร์ขับ และทำการคำนวณหาเวลาในการกวนผสมทางทฤษฎี โดยใช้สมการที่ (26) [15]

$$t_{mix,95\%} = 28.23N^{-0.41} \quad (26)$$

$$\text{แทนค่าจะได้ } t_{mix,95\%} = 28.23 \times (30)^{-0.41} = 6.73 \text{ s}$$

จากการคำนวณด้วยสมการพบว่า ที่รอบการหมุน 30 รอบต่อนาที ใช้เวลาสำหรับการกวนอยู่ที่ 6.73 วินาที และเมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับกราฟวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบเวลาในการผสมระหว่าง CFD และสมการทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 15 ผู้วิจัยได้ทำการสร้างสมการที่ (26) ลงในโปรแกรม SOLIDWORK Flow Simulation และได้ใช้ฟังก์ชันของ New Parametric Study เข้ามาช่วยในการคำนวณผล เนื่องจากต้องการคำนวณผลในแต่ละรอบการหมุนไปพร้อมกัน ผลที่ได้พบว่าค่าอัตราของเวลาการผสม (Mixing Time) จะแปรผันไปกับรอบการหมุน และมีค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่ง

ผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในส่วนของอัตรา การผสมจะอยู่ในช่วงเวลา 7-8 วินาที เมื่อพิจารณาถึงความ คลาดเคลื่อนของการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ที่ เกิดขึ้นพบว่ามีความเท่า 3.85 เปอร์เซ็นต์

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองทาง พลศาสตร์ของไหลของการกวนผสมเพิ่มเติม เพื่อ คำนวณหาผลลัพธ์จากการจำลองเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ ของไหลในการผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่มีความหนืด 1.8 Pa.s ที่ใช้รอบการหมุน 30 รอบต่อวินาที และทำการตั้งค่า ลีกลงไปในเนื้อมะม่วงเหลว 135 มิลลิเมตร ในทิศทาง แนวแกน Z หรือในแนวแกน Y ใน โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation และ นำ ไป ทำ การ เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dular และคณะ [20] ที่รอบ การหมุนเดียวกัน ความลึกเดียวกัน และใช้ขนาดของเวลา ในการวิเคราะห์ (Time step size) เท่ากันที่ 0.5×10^{-3} วินาที โดยเขาได้ทำการกวนผสมวัสดุเป็นคาร์บอนซีเมติก เซลลูโลสหรือซีเอ็มซี ที่มีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1-10 Pa.s และใช้ใบพัดจำนวน 6 ใบพัด ที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร ความสูงใบพัด 150 มิลลิเมตร ผลการจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยที่ได้พบว่า ค่าความเร็ว ของสนามการไหลของของไหลที่มีความหนืดที่เกิดจาก ใบพัดกวนผสมจำนวน 10 ใบในงานวิจัยนี้ มีค่าความเร็ว ของสนามการไหลที่สูงกว่างานวิจัยของ Dular และคณะ โดยจะมีค่าเฉลี่ยของความเร็วภายในถังกวนผสมอยู่ที่ ประมาณ 0.14-0.15 เมตรต่อวินาที ส่วนความเร็วเฉลี่ยใน งานวิจัยของ Dular และคณะ จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.075-0.1 เมตรต่อวินาที [20]

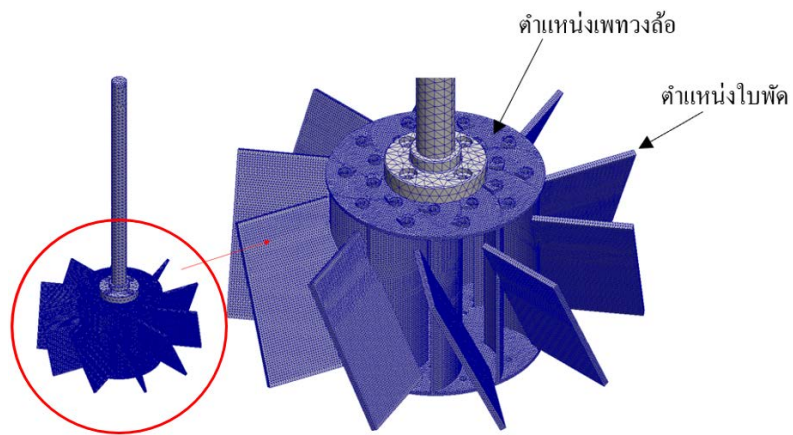
หลังจากผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และคำนวณผลเชิง ตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลแล้วเสร็จ ขั้นตอนต่อไปใน ส่วนของกระบวนการออกแบบและพัฒนาใบพัดกวน ผสม ผู้วิจัยสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผล ทางพลศาสตร์ของไหลที่เกิดจากผลกระทบของแรงดัน ของของเหลวในระหว่างการกวนผสม แรงกระทำใน แนวแกน และแรงกระทำในแนวรัศมี ตลอดจนรอบการ หมุนสำหรับการกวนผสมของเหลว มาทำการคำนวณต่อ

เพื่อหาความแข็งแรงทางโครงสร้างใบพัดกวนผสม โดย ผู้วิจัยจะอาศัยการส่งออกของชุดข้อมูลการวิเคราะห์ผล ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ได้จากโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation ใน ส่วน ของ โมดูล Export results to simulation

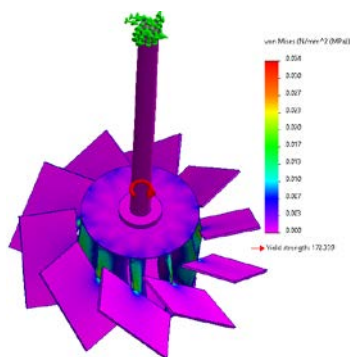
หลังจากนั้นผู้วิจัยจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางไฟ น์ดเอนลิเมนต์เข้ามาช่วยในการสร้างผลลัพธ์เชิงตัวเลข ผลลัพธ์การจำลองที่ได้พบว่า ใบพัดกวนผสมที่ผ่าน กระบวนการออกแบบอย่างเหมาะสม ทั้งในส่วนการ วิเคราะห์ความแข็งแรงและพลศาสตร์ของไหล สามารถ รับแรงเนื่องจากความหนืดของเนื้อมะม่วงเหลวในการ กวนผสมที่รอบการหมุนต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดบนโครงสร้างใบพัดกวน ผสมนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำใบพัด กวนผสม โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุเป็นสแตนเลสที่มี คุณสมบัติเชิงกลดังนี้คือ

1. ค่า Yield strength มีค่าเท่ากับ 172.399 MPa
2. ค่า Elastic modulus มีค่าเท่ากับ 200,000 MPa
3. ค่า Poisson ratio มีค่าเท่ากับ 0.28
4. ค่าความหนาแน่น มีค่าเท่ากับ $7,800 \text{ kg} / \text{m}^3$

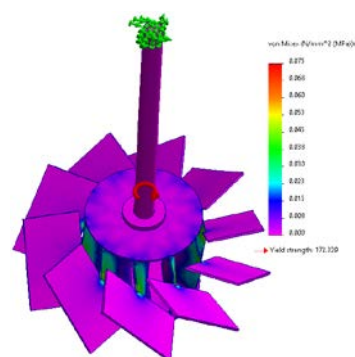
หลังจากที่กำหนดวัสดุให้กับชิ้นงานวิเคราะห์แล้ว ขั้นตอนต่อไป ผู้วิจัยได้ดำเนินการเพื่อทำการปรับปรุงทรง ของแบบจำลองเพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล เช่น การลดความยุ่งยากของชิ้นงานของแบบจำลอง เพื่อให้ แบบจำลองการวิเคราะห์มีความเหมาะสมสำหรับการ วิเคราะห์ผลทางไฟน์ดเอนลิเมนต์ พร้อมทั้งทำการกำหนด คุณสมบัติของเมชเอนลิเมนต์ โดยมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้คือ ใน ส่วน ของ Mesh parameters ผู้วิจัยทำการ กำหนดรูปแบบเป็น Curvature based mesh และทำการ ปรับคุณสมบัติในส่วนของ Mesh control ไปยังบริเวณ ใบพัดและแผ่นเพลทของชุดวงล้อให้มีความละเอียด มากกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการ เปลี่ยนแปลงความเร็วและแรงที่สูง ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังรูป ที่ 17 หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณผลลัพธ์ด้วยเทคนิคการ วิเคราะห์ผลทางไฟน์ดเอนลิเมนต์ และได้ดังรูปที่ 18



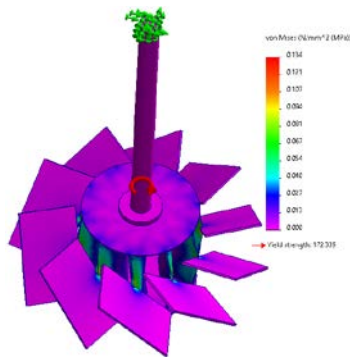
รูปที่ 17 ผลลัพธ์การสร้างเมชเอลิเมนต์สำหรับการจำลองผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์



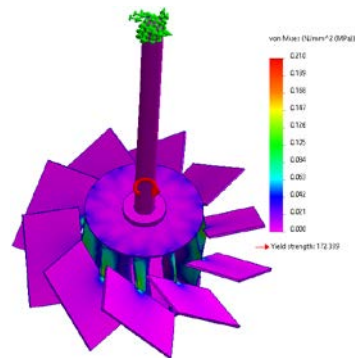
(a) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 10 RPM



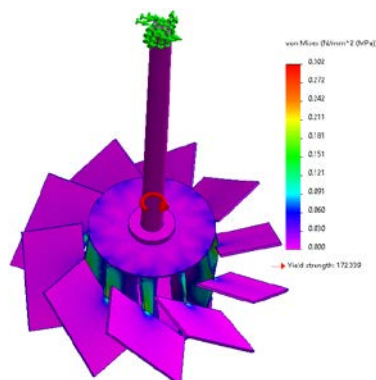
(b) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 15 RPM



(c) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 20 RPM



(d) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 25 RPM

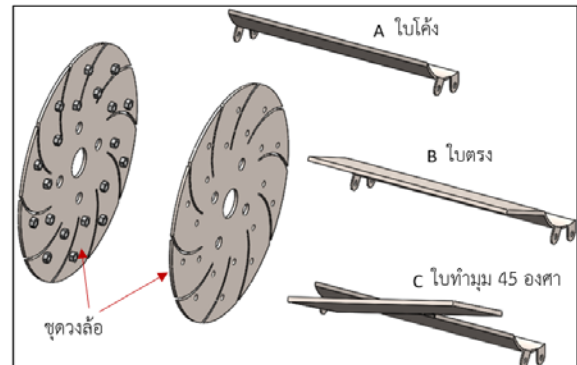


(e) การกระจายตัวความเค้นที่รอบการหมุน 30 RPM

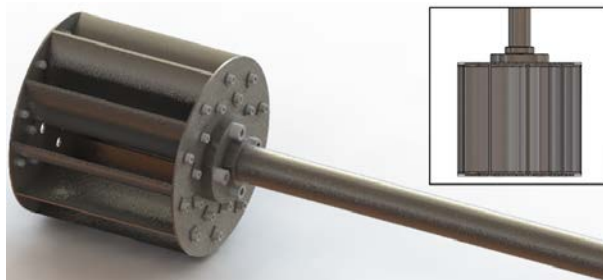
รูปที่ 18 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแข็งแรงทางโครงสร้างใบพัดกวนผสม

จากองค์ความรู้ที่เกิดจากสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881 เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ [5] สามารถนำมาทำการออกแบบและพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้สำหรับการกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น มะม่วงกวน หรือ สับปะรดกวนได้เป็นอย่างดี โดยสามารถพัฒนารูปแบบใบพัดให้มีลักษณะที่แตกต่างกันได้หลายรูปแบบ เนื่องจากวงล้อใบพัดเติมอากาศที่ได้จากสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881 นี้ สามารถถอดประกอบชุดใบพัดได้ โดยใบพัดกวนผสมเติมอากาศจะมีลักษณะเป็นใบโค้ง (A) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาชุดใบพัดกวนผสมเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้ คือใบพัดชนิดใบตรง (B) โดยใบพัดกวนผสมมะม่วงที่ได้อธิบายและสาริการออกแบบในงานวิจัยนี้จะมีรูปร่างที่ทำมุม 45 องศา ซึ่งตรงกับ

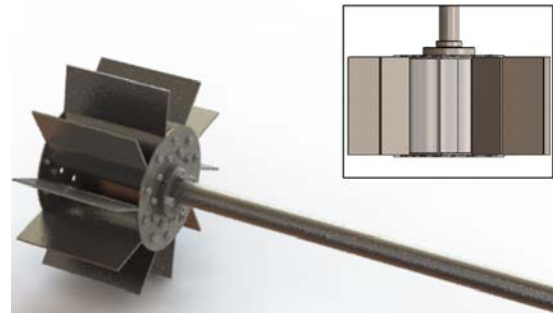
ชนิด (C) และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 19 และรูปที่ 20



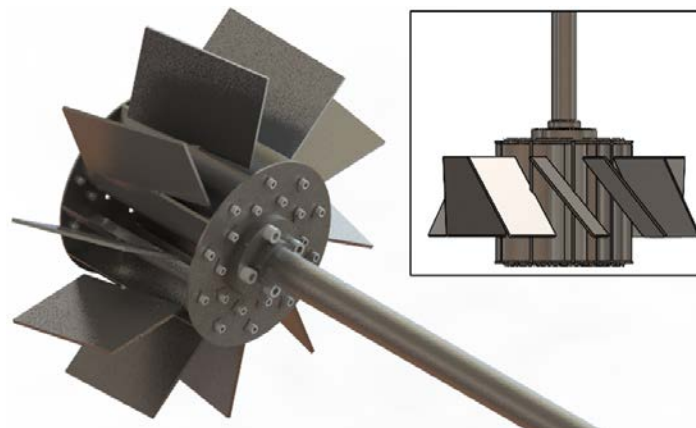
รูปที่ 19 แสดงการพัฒนาชุดใบพัดกวนผสมเพิ่มเติมจากงานวิจัย ที่ได้จากองค์ความรู้ของสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881 [5]



(a) วงล้อชนิดใบโค้ง (A) ที่ใช้สำหรับเติมอากาศในน้ำ จากสิทธิบัตรการออกแบบเลขที่ 62881



(b) วงล้อชนิดใบตรง (B) ที่ได้จากการพัฒนาเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้



(c) วงล้อชนิดใบทำมุม 45 องศา (C) ที่ได้จากการพัฒนาเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้

รูปที่ 20 แสดงรูปแบบใบพัดกวนผสมของเหลวชนิดต่าง ๆ สำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูงที่ได้พัฒนาจากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์เลขที่ 62881 [5]

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบใบพัดกวนผสมสำหรับมะม่วงกวน ซึ่งมะม่วงกวนถูกหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 98

องศาเซลเซียส โดยอาศัยองค์ความรู้จากสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ เลขที่ 62881 เรื่อง ชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยขั้นตอนการ

ออกแบบ จะเริ่มต้นจากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลทางเทคนิค หลังจากนั้นได้นำข้อมูลเทคนิคดังกล่าวมากำหนดทิศทางการออกแบบและคำนวณหาสัดส่วนที่เหมาะสมของใบพัด ถึงผสม ตลอดจนค่าพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการกวนผสมเนื้อมะม่วงเหลวที่จะนำไปผลิตเป็นมะม่วงกวนต่อไป ผลจากการออกแบบและการจำลองผลเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลพบว่า ค่าความเร็วรอบการหมุนที่ 30 รอบต่อนาทีจะส่งผลต่อการกวนผสมเนื้อมะม่วงกวนที่มีความหนืดอยู่ในช่วง 1.8 Pa.s ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ได้ดีที่สุด และเมื่อนำตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลมาทำการวิเคราะห์ต่อในรูปแบบ Static เพื่อจำลองผลความแข็งแรงของใบพัดกวนผสม ผลที่ได้พบว่า ค่าความเค้นที่กระจายตัวบนใบพัดกวนผสมมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุสแตนเลส จึงไม่มีผลต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับใบพัดกวนผสมที่จะนำมาใช้กับเนื้อมะม่วงที่มีความหนืด 1.8 Pa.s ด้วยรอบการหมุนสูงสุดที่ 30 RPM ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากงานวิจัยนี้ สามารถใช้ต่อยอดและพัฒนาารูปแบบใบพัดกวนผสมชนิดต่าง ๆ ทั้งในด้านการเรียนการสอนและเชิงพาณิชย์ได้ต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนครุภัณฑ์สำหรับการวิเคราะห์ผล สำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. G. Chun, J. W. Jia, P. G. Xue and F. F. Lian, "CFD simulation and PIV measurement of the flow field generated by modified pitched blade turbine impellers," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 6, pp. 1027–1036, 2014, doi: 10.1016/j.cherd.2013.08.024.
- [2] F. Delvigne, J. Destain and P. Thonart, "Structured Mixing Model for Stirred Bioreactors: An Extension to the Stochastic Approach," *Chemical Engineering Journal*, vol. 113, no.1, pp. 1–12, 2005, doi: 10.1016/j.cej.2005.06.007.
- [3] O. Shengchao, W. Rijie, Y. Xiaoxia and Y. Yuefei, "CFD Prediction of mean Flow Field and Impeller Capacity for Pitched Blade Turbine," *Transactions of Tianjin University*, vol.21, no.3, pp. 250–258, 2015, doi: 10.1007/s12209-015-2408-x.
- [4] T. Barametee, N. Apinan, E. Chakron, B. Ekkarat and W. Santi, "Effect of Rushton turbine shapes on mixing performance by computational fluid dynamics," in *Proc. 28th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICChE 2019)*, Chonburi, Thailand, Nov. 8–9, 2019, pp.146-152.
- [5] L. Werayoot, "Mechanical Part of Water Aerator," Thailand Patent 62881. May. 9, 2018.
- [6] L. Werayoot, "Design and CFD Simulation of Agitating Blade in Tank for Mixing Fluids," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 37, no.1, pp. 13–20, 2020.
- [7] L. Werayoot, B. Pinich and K. Nuttapong, "Simulation of Fluid Mixing in Food Industry using Computational Fluid Dynamics," in *The, 4th National Food Engineering Conference*, Pathumthani, Thailand, Apr. 3, 2018, pp.10–15.
- [8] S. Suntorn, P. Santri and K. Suntri, "Development of a Mango Machine that uses Heat from Liquefied Petroleum Gas (LPG) for Community Use," in *The, 33rd Conference of Mechanical Engineering Network*, Udon Thani, Thailand, Jul. 2–5, 2019, pp. 243.
- [9] D. Kamonrat, P. Rattapon, N. M. Wisarut, and S. Suntorn, "Development of black coconut sweet pudding agitators for community use," in *The, 32nd*

- Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Mukdahan, Thailand, Jul. 3–6, 2018, p.1.
- [10] J. Ronnarit, and C. Athika, “The Development of a Curry Puff Filling Mixing Machine Using Heat from Liquefied Petroleum Gas (LPG) for Community Use,” *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, vol. 8, no.1, pp. 75-87, 2021.
- [11] W. Worawit, “Tamarind Mixing Machine” Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, Final Rep., 2007. Accessed: Sep. 16, 2022 [Online]. Available: <https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/642/Tamarind%20Mixing%20Machine.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [12] L. Werayoot, “Design and flow field analysis of agitation turbine using numerical simulation,” *UBU Engineering Journal*, vol. 14, no.1, pp. 105–114, 2021.
- [13] S. Pongsaran and K. Yostana, “Computational Fluid Dynamics Modeling of Anaerobic Continuously Stirred Tank Reactor,” in *Proc. 28th Conference of Mechanical Engineering Network*, Khon Kaen, Thailand, Oct. 15–17, 2014, pp.857–864.
- [14] C. Amonwan, “Mixing Characteristics Improvement in Equalization Tank for Capacity Enhancement of Wastewater,” M.S. thesis, Dept. Chemical and Environment Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2016.
- [15] S. Patigorn, “Study of Flocculation Mixing Efficiency by using Grids Combined with A Dual Rushton Turbine Impeller,” M.S. thesis, Dept. Environment Eng., Suranaree University of Technology., Nakhon Ratchasima, Thailand, 2002.
- [16] T. Charn and U. Variddhi, “Shaft Design,” in *Machine Design*, 1st ed. Bangkok, Thailand: Se-Education Public Company Limited, Thailand, 2013, ch. 9, sec. 9.4-9.7, pp. 267–283.
- [17] B. Suvendu, “Yield Stress and Time-dependent Rheological Properties of Mango Pulp,” *Journal of Food Science*, vol. 64, no.6, pp. 1029–1033, 1999, doi: 10.1111/j.1365-2621.1999.tb12275.x.
- [18] G. Anuradha, S. R. Hosahalli and A. Jasim, “Effect of Soluble Solids Concentration and Temperature on Thermo-Physical and Rheological Properties of Mango Puree,” *International Journal of Food Properties*, vol. 14, no. 5, pp. 1018–1036, 2011, doi: 10.1080/10942910903580876.
- [19] S. Phaokuntha, P.B. Poonlarp, and I. Pongsirikul, “Rheological Properties of Mango Puree and Process Development of Mango Sheet,” *International Symposium on Tropical and Subtropical Fruits*, vol. 1024, pp. 373–379, 2014, doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1024.51.
- [20] M. Dular, T. Bajcar, L. Slemenik-Perse, M. Zumer and B. Sirok, “Numerical Simulation and Experimental Study of Non-Newtonian Mixing Flow with a Free Surface,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol.23, no. 4, pp. 473–486, 2006, doi: 10.1590/S0104-66322006000400005.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความปีที่ 39 ฉบับที่ 1 - 4

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความชอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีในโอกาสต่อไป

ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์

ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์

ดร.ทรงศักดิ์ สุทธาสุประดิษฐ์

ดร.บำรุง พ่วงเกิด

ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม

ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข

ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไพบา

ผศ.ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ

ผศ.ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภินันท์

ผศ.ดร.นภศูล วงษ์วานิช

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

ผศ.ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง

ผศ.ดร.อัฐวิทย์ สุจริตพงศ์

ผศ.ดร.จารุวิเศษ ปราบณศักดิ์

ผศ.ดร.เชาวลิต หามนตรี

ผศ.ดร.ธีรยศ เวียงทอง

รศ.ดร.ชุมพล ยวงใย

รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

รศ.ดร.อาจันต์ น่วมสำราญ

รศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย

รศ.ดร.ชานนท์ วริสาร

รศ.ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์

รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล

ศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์

รศ.ดร.นระเกณต์ พุ่มชูศรี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร.พงศ์พันธ์ อนันต์วรณิชย์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร.ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์ ก้องกิจกุล

ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์

ผศ.ดร.พิชญ์ สุธีรวรรณนา

ผศ.ดร.วศิน เกียรติโกมล

รศ.ดร.อำพล การณสุนทวงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.เรืองรอง สุทธิสธิระ

ผศ.ดร.ธอริน ธีรเดชาวนิชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และ

โทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.กรองแก้ว เล้าหลิดานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและ

การบิน-อวกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ดร.ศิริชัย ยศวังใจ

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

ผศ.ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

รศ.ดร.วิไลพร แซ่ลี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ
คอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

รศ.ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่อง
ต้นกำลัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

ดร.ภูตินันท์ เอื้อวงศ์สุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และ
เทคโนโลยีการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

รศ.ดร.วรรณวิทย์ แต้มทอง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

รศ.ดร.จุฑา พิษิตลำเค็ญ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.ชลิดา เนียมนุ่น

รศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล

ผศ.ดร.ศุภพัชรี รอดเดชา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.दनย์ปภ มะณี

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.เด่นชัย วรเสวต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.มานิดา ทองรุ่ง

รศ.ดร.สมพล สกุลหลง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(วิทยาเขตศรีราชา)

ผศ.ดร.ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน

ภาควิชาวิศวกรรมกลางทะเล

คณะพาณิชยศาสตร์บริหาร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(วิทยาเขตศรีราชา)

ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(วิทยาเขตศรีราชา)

ผศ.ดร.ศิริชัย วัฒนาโสภณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(วิทยาเขตศรีราชา)

ผศ.ดร.วรรัตน์ ปัตตประกร
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร.ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์
ผศ.ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.อุรุยา วิสกุล
ดร.ชนะชัย ทองโถม
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร.พงษ์ศักดิ์ มหาโชคเลิศวัฒนา
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.กิตติพิชญ์ มีสวัสดิ์
วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ดร.ภมร ศิลาพันธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์
ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเกียรติ
รศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี

รศ.ดร.เกรียงไกร แซมสีม่วง
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี

รศ.ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล
รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์
รศ.ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.กระวี ตรีอำนาจ
ผศ.ดร.ชโลธร ธรรมแท้
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.ดร.สุชิน ไตรรงค์จิตเหมาะ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ
อิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.ลลิตา เจนศิริศักดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ดร.ทงศักดิ์ เทพสนธิ
ผศ.ดร.ญวณีย์ จันทระสา
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

ผศ.ดร.เอมมา อาสนจินดา
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

ผศ.ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์
ผศ.ดร.สุเมศวร์ พิริยวัฒน์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ กิตติเดชา
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล-
ล้านนา

ผศ.ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร
วิทยาลัยพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผศ.ดร.สมชาย ศรีพัฒน์พิพัฒน์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ผศ.ดร.นที สุริยานนท์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร.ชนาถ กฤตวรกาญจน์
รศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.กำพล วรดิษฐ์
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.นพดล กรประเสริฐ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.ระวิน สืบคำ
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และ
นวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล-
ตะวันออก

ผศ.ดร.สหภัทร ชลาชัย
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและ
เทคโนโลยี
คณะเกษตรศาสตร์และ
ทรัพยากรธรรมชาติ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล-
ตะวันออก

ผศ.ดร.วราคม เนินน้อย
สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบ
อัตโนมัติแบบสิ้น
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น

ผศ.ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์
สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น

ดร.วัชรินทร์ หนูทอง
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.วัชร วงศ์ปัญญา
คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยพะเยา

ผศ.ดร.ปพน สะอาดดวง
แขนงวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ผศ.ดร.สุริยา โชคเพิ่มพูน
คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตสกลนคร

รศ.ดร.ปรเมศวร์ เหลือเทพ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ศ.ดร.พีระพงศ์ ทีฆสกุล
บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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 การตั้งค่าหน้ากระดาษ ให้ระยะหน้ากระดาษ (Margin) ทั้ง 4 ด้านด้วย ระยะ 1 นิ้ว หรือ 2.54 ซม. บทความมี 2 ส่วน ส่วนแรกกำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดี่ยว และส่วนที่สองกำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26” หรือ 0.7 ซม. การลำดับหัวข้อของเนื้อเรื่องให้ใช้เลขกำกับบทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลขระบบทศนิยมกำกับหัวข้อย่อย 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:

นางสาวชนัญชิดา 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

☐ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความยังไม่เคยตีพิมพ์ หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น ข้าพเจ้าได้แนบบทความ ซึ่งข้อความหรือผลงานในบทความนี้ ได้คัดลอกหรือดัดแปลงมาจากเอกสารหรือ รายงานอื่น หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ใช่ คัดลอกหรือดัดแปลงมาจาก.....

และถ้าใช่ได้มีการอ้างอิงถึงเอกสารหรือรายงานดังกล่าวในบทความหรือไม่

☐ อ้างอิง ☐ ไม่อ้างอิง เพราะ.....

บทความนี้ ได้รับเงินสนับสนุนการทำงานงานวิจัยจากหน่วยงานใด หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ได้รับการสนับสนุน จากแหล่งทุน.....เลขที่สัญญา.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าคำตอบข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

(ลงชื่อ).....(ผู้ส่งบทความ)

เอกสารประกอบการส่งบทความ

1. แบบฟอร์มการส่งบทความนี้ พร้อมระบุรายนามผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความของท่านได้ 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, (KMITL).

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 39 Number 4

December 2022

Academic Paper

1. Factors Influencing Number of Deaths Due to Road Crashes in Bangkok: A Comparison between the Situations before and after the Outbreak of Coronavirus Disease 2019 1
P. Phonchaipanich and J. Prabnasak

Research Papers

2. Effects of Peroxidase Enzyme from Cauliflower Stems on Dicofol Removal 13
W. Chiaprasobponl S. Dongjan S. Mattaraj W. Dechapanya T. Rattanaweeran
S. Sanongraj and K. Ratanapongleka
3. Influence of Milling Parameters on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites
Applying I-Optimal Experimental Design 22
C. Srivabut S. Rawangwong and C. Homkhiew
4. Financial Risk Analysis Framework of Stakeholders in PPP O&M Contracts for Inter-City
Motorway Projects 36
N. Pintobtang and N. Kokkaew
5. Low-Cost and High-Precision Inverse Sine Function Circuit 52
S. Wisetphanichkij
6. An Improvement of the Assembly Station with PDCA Cycle and Cross-Functional Team 63
B. Lila and S. Chinodom
7. An Enhancement of the Ice Block Productivity by Inserting a Channel at the Middle of
the Mould 75
P. Vaiyaphoch and A. Chinsuwan
8. The Selections of Appropriate Alternative Intersection Improvements Base on Effectiveness
Measures of Traffic Models and Analytical Hierarchical Process (AHP) 86
P. Srisupoh W. Chaipanha T. Promraksa and P. Kaewwichian
9. The Finite Element with Near-Wall Deformation Mesh Method in the Prediction of Flow
Past a Rotating Isolated Cylinder at High Reynolds Number 103
S. Ruchayosyothin
10. Comparison of Plant Layout Using CORELAP, ALDEP and SLP Methodology : Case Study of
Printed Circuit Board Manufacturing Plant 121
P. Kittipanya-ngam S. Sitthibrun and K. Sirikasemsuk
11. The Comparative Accuracy Evaluation of Water Evaporation using Multiple Linear Regression
and Simplified Penman's Equation 138
J. Settakumpoo and V. Benjaoran
12. Designing and Developing Mixed Stirring Rotors for Viscous Fluids with Knowledge from
Product Design Patents using Computational Fluid Dynamics Technique 149
W. Lahamornchaiyakul