



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 38 ฉบับที่ 4

ธันวาคม 2564

บทความวิจัย

1. การประเมินสมรรถนะชุดควบคุมความเร็วรอบกังหันน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าของเขื่อน
วชิราลงกรณ์ 1
ศรัณย์ โพธิยานนท์ และ มณฑล ใจกุล
2. การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า ด้วยเทคนิค ABC และ การพยากรณ์
กรณีศึกษากระบวนการจัดเก็บสินค้า 13
ธงชัย แสงสุวรรณดี และ สกนธ์ คล่องบุญจิต
3. การหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาการจัดตารางงานพยาบาล โรงพยาบาลกรณีศึกษาแห่งหนึ่ง 23
กัญญาณธรณ์ ทองโสภา และ อุดม จันทร์จรัสสุข
4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมความร้อนด้วยตาบุงเชิงปรับตัว และการเคลื่อนที่
ของกลุ่มอนุภาค 33
สุชาวดี จินสุทธิ
5. การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อคัดแยกงานเสียของผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ 42
ณิชาณัช เกตุมุกดา
6. การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษ
น้อยที่สุด 51
ณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว วิทยา ศรีสมบุญ และ นุธิดา เพ็ชรเทศ
7. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นสำหรับถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน 67
วิวัฒน์ อ่อนนาคกล้า
8. กำลังดูดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอยหลังเพลิงไหม้และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว 78
วรัญ วงศ์ประชุม และ เฉลิมพล ไชยแก้ว
9. การประเมินความคุ้มค่าทางการเงินของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา
สำหรับภาคครัวเรือน 87
ธนาพล ตันติสัตยกุล
10. การเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและสตีเฟนส์ในแบบจำลองดินของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ด้วย
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 99
พูลพงษ์ พงษ์วิทยานุกูล อุกฤษฏ์ พรปรีดาวรรณ และ ดารารพร ผู้สิงห์
11. ผลกระทบของเทคนิคการพยากรณ์แบบเอ็กโปเนนเชียลต่อค่าดัชนีบูลิวิเปอฟเฟค 115
ภายใต้การสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่งในโซ่อุปทาน
กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข วริษา ต่างใจ ทศพล เกียรติเจริญผล ลัคน์สิริ ตีรารณรัตน์
ดารินทร์ ล้วนวิเศษ อภิรดี สุขมิลินท์ จารุวรรณ แก้วล้วน จุฑามาศ เกษแก้ว
และ กนกกรรณ์ ลิโรจนประภา
12. การออกแบบเชิงหลักการและการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลง
ทางดิ่งประเภททางดิ่ง 130
นภดล ปุ่นประเสริฐ และ วันชัย เจียจันทร์
13. อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อความหนาผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ โดยใช้วิธีการ
ออกแบบส่วนผสมและพื้นผิวตอบสนอง 151
ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร ชาตรี หอมเขียว และ สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์
14. การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยในอากาศของเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์
สำหรับใช้ภายในอาคารที่พักอาศัย 166
วิสูตร อาสนวิจิตร พาณิช อินตะ วิสาขน์ภัสร์ รัตนจันทร์ และ พัทธนันท์ หรรษาภิรมย์โชค

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 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) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมี มาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมิใช่ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่น่าเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

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

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

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)
เอกสารอ้างอิง การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิงโดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

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

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความอยู่ระหว่าง 8–14 หน้ากระดาษ A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง 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
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465
โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คณบดี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อุมา สืบญะเรือง

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์พิ้ง

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร.พิณช ธนชัยโชคศิริกุล

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิดา นอบน้อย
ติดต่อประสานงาน
จัดทำต้นฉบับ Artwork

นายวิรัช จุลไกรลสุจริต
พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

นายทนงค์ศักดิ์ ใจชื่นแสน
ออกแบบปก



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

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 สุจิตจร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธีร์จุฑา

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติเขต สุรักษ์ชา

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

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 20 กันยายน 2564

เรื่อง แจ้งเพื่อทราบ

เรียน อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง” มีความประสงค์ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิศวกรรมลาดกระบัง ดังนี้

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

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุมา สิบบุญเรือง)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

การประเมินสมรรถนะชุดควบคุมความเร็วรอบกังหันน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าของ เขื่อนวชิราลงกรณ

Assessment on Speed Governor Performance of Turbine of Vajiralongkorn Hydropower Plant

ศรัณย์ โพธิยานนท์^{1,*} และ มณฑล ไกจุศล²

¹หน่วยงานกองบำรุงรักษา โรงไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ ตำบลหนองผากุมิ กาญจนบุรี 71180

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Saran Phothiyanon^{1,*} and Monthon Jaikusun²

¹Engineering level 10, Department of maintenance, Vajiralongkorn Dam, Thakanun, Tonhpaum,

Kanchanaburi, 71180, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Ladkrabang,

Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: monthon.ja@kmitl.ac.th

Received: Jun 24, 2021; Revised: Sep 16, 2021; Accepted: Sep 22, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะในการควบคุมตำแหน่งของใบน้ำร่องทางเข้า ด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณควบคุมวาล์วน้ำร่องแบบเซอร์โววาล์ว (High-Speed Linear Servo Valve) แทนอุปกรณ์แปลงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (Electro-Hydraulic Converter) เดิม ที่เสื่อมสภาพ ทำการกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกอุปกรณ์ โดยพิจารณาจากการความไวต่อการตอบสนองต่อสัญญาณควบคุม และเนื่องจากคุณลักษณะจำเพาะเชิงพลวัตของวาล์วที่เปลี่ยนไป จึงทำการปรับแต่งพารามิเตอร์ในการควบคุม และทดสอบระบบหลังการปรับปรุงตามฟังก์ชันการทำงาน ได้แก่ 1) การทดสอบ Governor Dry Test เพื่อประเมินการตอบสนองของความเร็วในการเคลื่อนที่ในย่านการทำงานของ Auxiliary Servo Motor ที่ควบคุมใบน้ำร่องทางเข้าก่อนการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 2) การทดสอบ Governor Wet Test เพื่อตรวจสอบและยืนยันการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบทั้งระบบ ขณะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยมีการทดสอบ Unit Protection Trip Test เพื่อตรวจสอบความสามารถของการควบคุมความเร็วรอบ ที่ไม่ให้เกิดอันตรายต่อระบบ เมื่อมีการปลดภาระของเทอร์ไบน์อย่างทันทีทันใด พร้อมทั้งการตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของแรงดันในท่อทางเข้าของกังหัน ผลการทดสอบเบื้องต้น พบว่า ระบบที่ปรับปรุงมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมเพียงพอ ส่งผลให้กังหันมีความเร็วรอบเกินค่าที่ตั้งไว้เพียง 1.31% ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 54% ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความดันในท่อทางเข้าสูงสุดเกิดที่ 8.615 นิวตัน/(ซ.ม)² ซึ่งไม่เกินเกณฑ์การยอมรับที่ 11.3 นิวตัน/(ซ.ม)² และเมื่อทดสอบการเดินเครื่องโดยกำหนดความเร็วรอบ ณ จุดทำงานแบบ Step function ใบน้ำร่องทางเข้าเริ่มมีการปรับทิศทางในช่วงแรกของการเข้าสู่ค่าที่กำหนด ภายในเวลา 33 วินาที จากนั้นเข้าสู่เสถียรภาพในเวลา 50 วินาที ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับเพื่อทำการทดสอบด้านการผลิตและจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบต่อไป

คำสำคัญ: อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ, ฟรอนซิสเทอร์ไบน์, ใบน้ำร่องทางเข้า

Abstract

This paper concern with performance assessment of the guide vane position actuator when controlled via a high-speed linear servo valve adopted as a replacement of a retired electro-hydraulic convertor. The valve was selected based on sufficient range of delivered oil flow and response of control signal. Due to change in dynamic characteristics of the valve, control parameters were adjusted, and the system response was studied after such replacement according to function of the unit, which are 1) Governor Dry Test, for assessment on response of auxiliary servo motor speed within the operation range, and 2) Governor Wet Test, for assessment on response of the whole governor unit. The Unit Protection trip testing scheme was performed to evaluate the system response to rapid disengagement of turbine load with pressure rise of the turbine conduit. It was found that the turbine was protected against overspeed as the guide vane was closed at sufficient speed resulting only 1.31% overshoot whereas the acceptance criterion is not greater than 54%. The maximum pressure of inlet conduit was found at 8.615 N/cm^2 and was within an acceptable limit at 11.3 N/cm^2 . When the unit was started from rest to a rated speed, the period required since the guide vane started to close until the time the speed approach the set point was 33 second. It then required another 50 second for the turbine speed to be stabilized on the rated value. This was acceptable for further testing scheme on engagement of generator and feeder of electricity to the distribution system.

Keyword: Speed governor, Francis turbine, Inlet Guide vane

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เขื่อนวชิราลงกรณ ตั้งอยู่ในเขตจังหวัดกาญจนบุรี ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง กำลังการผลิตไฟฟ้าเครื่องละ 100 เมกะวัตต์ รวมกำลังการผลิต 300 เมกะวัตต์ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำโดยใช้กังหันพลังน้ำชนิด ฟรานซิส ปัจจุบันมีอายุการใช้งานมานานกว่า 35 ปี เริ่มประสบปัญหาเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ภายในระบบต่างๆ เช่นระบบควบคุมกังหันน้ำ เป็นต้น อีกทั้งยังพบปัญหาการขาดอะไหล่ ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของโรงไฟฟ้า โดยระบบดังกล่าวมีความสำคัญเพราะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของกังหันน้ำและควบคุมกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าโดยการปรับตำแหน่งการเปิดและปิดใบน้ำร่องทางเข้าเพื่อควบคุมปริมาณของน้ำที่ไหลเข้าสู่กังหันน้ำ [1-2]

ระหว่างปี พ.ศ.2559 ถึง พ.ศ.2562 โรงไฟฟ้าได้ดำเนินการปรับปรุงอุปกรณ์โรงไฟฟ้า (Refurbishment Project VRK H1-3) โดยระบบควบคุมกังหันน้ำซึ่งปรับปรุงเฉพาะระบบ Electronic Control System จากระบบอนาล็อกเป็นดิจิทัลร่วมกับฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ไทย โดยระบบควบคุมนี้ใช้อุปกรณ์ Programmable Logic Control (PLC) ซึ่งมีลักษณะการประมวลผลเป็นแบบดิจิทัลเป็นตัวควบคุมหลัก ส่วนอุปกรณ์ของระบบ Hydraulic Control System ยังคงใช้งานอุปกรณ์เดิม เนื่องจากอุปกรณ์หลักยังคงอยู่ในสภาพที่ดี ยกเว้นพบความสึกหรอบริเวณเฟืองเกียร์ของชิ้นส่วน Valve Sleeve ของอุปกรณ์ Actuator Solenoid and Pilot Distributing Valve ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่รับสัญญาณทางไฟฟ้าและแปลงเป็นสัญญาณทางกล (E/H Convertor) ส่งผลให้ระบบควบคุมกังหันน้ำทำงานไม่แม่นยำหรือทำงานผิดพลาด

อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์ควบคุมไฮดรอลิกสมัยใหม่เข้ามาใช้แทนอุปกรณ์เดิมที่เสื่อมสภาพ จำเป็นต้องศึกษาถึงบทบาทหน้าที่ของอุปกรณ์ที่ชำรุดนั้น เพื่อกำหนดลักษณะของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ทดแทน ทำการคัดเลือกขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับย่านการใช้งาน รวมถึงการประเมินการตอบสนองต่อสัญญาณควบคุม เมื่อนำอุปกรณ์ใหม่มาใช้ ซึ่งจะต้องทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบคงเดิมหรือดีกว่า จึงมีความจำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูลหลังการติดตั้งอุปกรณ์ เมื่อเทียบกับเกณฑ์การ

ยอมรับในการเดินเครื่อง เพื่อให้เกิดความมั่นใจ ก่อนการ
ใช้งานจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ

เพื่อพิสูจน์การตอบสนองของระบบไฮดรอลิกควบคุม
ความเร็วรอบของกังหัน เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์
Electro-Hydrodynamic Converter (E/H Converter) ใหม่ ที่
สามารถรับสัญญาณควบคุมทางไฟฟ้าแบบ 4–20 mA มาใช้
งานทดแทนอุปกรณ์เดิมที่เสื่อมสภาพ โดยเปรียบเทียบการ
ทำงานของระบบในโหมด Constant Speed Control เมื่อ
เทียบกับเกณฑ์การยอมรับ (Acceptance Criteria) [3–4]
หลังการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว

2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P. Surawattawan [5] ทำการวิเคราะห์การสร้าง
แบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบควบคุมตำแหน่ง
แบบไฮดรอลิก ซึ่งประกอบไปด้วยกระบอกสูบ ไฮดรอลิก
และเซอร์โววาล์ว เนื่องจากอัตราไหลของน้ำมันผ่านตัว
วาล์วเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าและแรงที่ส่งของความ
ดันตกคร่อมตัววาล์ว จึงได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคทำให้
เป็นเชิงเส้น (Linearization) ในการวิเคราะห์สมการเซอร์โว
วาล์วซึ่งเป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยเทคนิค
ดังกล่าวจึงทำให้สามารถวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งแสดง
ถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต (Input) ที่เป็นการต่าง
ศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง และเอาต์พุต (Output) ที่เป็นการระบาย
ของลูกสูบได้ ในงานวิจัยดังกล่าวได้เสนอความคิดใหม่ 2
ประการ โดยที่ประการแรก เป็นการแสดงให้เห็นว่าการ
เคลื่อนที่ของลูกสูบไฮดรอลิกทั้งสองทิศทางคือ เลื่อนตัว
เข้าและออกจากกระบอกสูบ สามารถสร้างเป็นสมการ
แบบจำลองที่เหมือนกันได้ ช่วยให้การวิเคราะห์หาฟังก์ชัน
การถ่ายโอนเป็นไปได้โดยง่าย เนื่องจากระบบเชิงเส้น
ต้องการผลตอบสนองที่สมมาตรรอบจุดทำงานของระบบ
และการประยุกต์ใช้หลักการตรวจสอบเสถียรภาพตาม
เกณฑ์ของเร้าส์ (Routh's Stability Criterion) ในการหา
ขอบเขตของค่า Proportional Gain ที่เหมาะสมภายในระบบ
วงปิด ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อระบบควบคุมตำแหน่งของไฮ

ดรอลิกที่ไม่สามารถใช้การปรับค่า Gain แบบลองผิดลอง
ถูก (Trial-and-Error) ได้

D. Duangsoythong , T. Tachahog , V. Kosong และคณะ
[6] ได้ศึกษาและพัฒนา ระบบ Digital Governor Control
หรือ DGC ขึ้นมาใช้งานทดแทนระบบเดิมที่เสื่อมสภาพ
เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีที่นำเข้า โดยระบบ Governor
Control นี้ได้ใช้อุปกรณ์ Programmable Logic Control
(PLC) ซึ่งมีลักษณะการประมวลผลเป็นแบบดิจิทัลเป็นตัว
ควบคุมหลัก โดยออกแบบและพัฒนาโปรแกรมให้
สามารถใช้งานได้ดีกว่าระบบเดิม ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน
IEEE 1207

ด้วยความสำเร็จของโครงการดังกล่าว จึงเป็นที่มาของ
การนำอุปกรณ์ที่สามารถรับสัญญาณควบคุมทางไฟฟ้า 4–
20 mA มาทดแทนอุปกรณ์ E/H converter เดิมที่รับสัญญาณ
 $\pm 10V_{DC}$ ที่เสื่อมสภาพ และ ดำเนินการพิสูจน์ระบบควบคุม
กังหันน้ำที่ปรับปรุงนี้ ว่าสามารถทำงานได้ตามเกณฑ์การ
ยอมรับในการเดินเครื่องได้หรือไม่ ซึ่งคาดว่าจะได้ระบบ
ควบคุมกังหันน้ำที่มีความเสถียร ตอบสนองความต้องการ
ของระบบผลิตไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และสามารถ
ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงอุปกรณ์ควบคุมกังหันน้ำ
ของโรงไฟฟ้าพลังน้ำได้ต่อไป

3 วิธีการดำเนินงาน

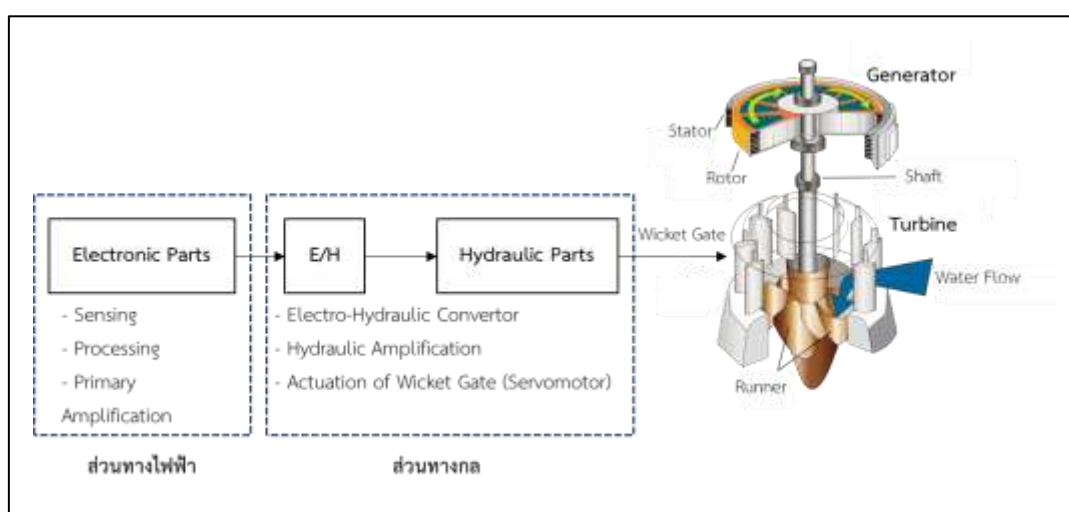
เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการ จึงได้มี
ขั้นตอนดำเนินการ ดังนี้

1. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และวิเคราะห์การ
ทำงานของระบบ E/H Converter เพื่อค้นหาสาเหตุของ
ความบกพร่องที่เกิดขึ้น
2. ทำการคัดสรรอุปกรณ์สมัยใหม่ ที่มีบทบาทในการ
ทำงาน และมีงานในการทำงานเดียวกันหรือใกล้เคียงกับ
อุปกรณ์ที่ชำรุด
3. ทำการดัดแปลงเครื่องจักรในส่วนที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำ
การติดตั้งอุปกรณ์สมัยใหม่ที่มาทดแทน
4. ดำเนินการทดสอบสมรรถนะของระบบ ตามรายการ
การทดสอบสมรรถนะ ที่ระบุไว้เป็นเกณฑ์ในการยอมรับ
ในการตรวจรับเครื่องจักร

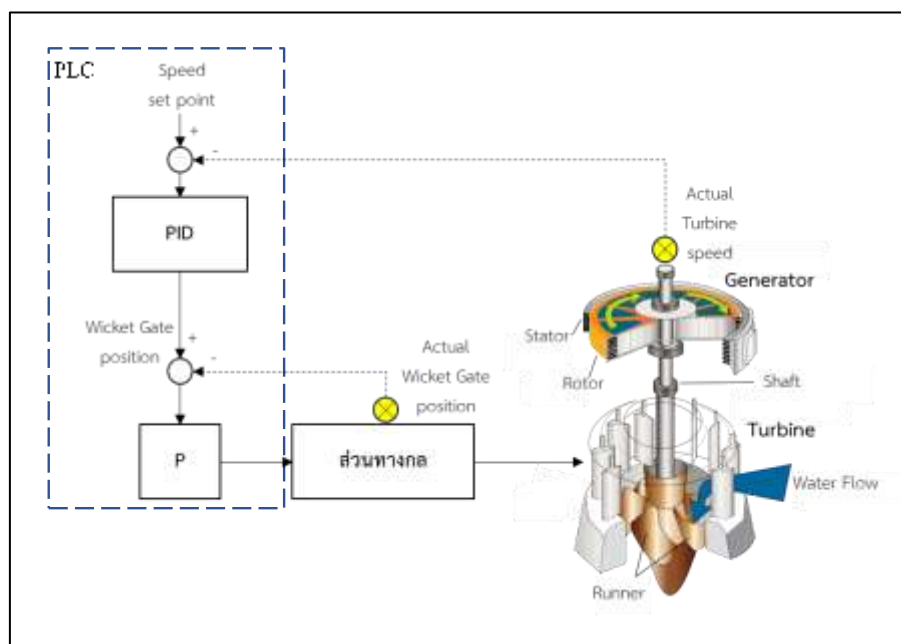
3.1 ระบบ Governor actuator

อุปกรณ์ Governor actuator เป็นอุปกรณ์ทางกลของระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันน้ำ (Governor Control System) มีอุปกรณ์สำคัญ คือ Electro-Hydraulic Converter ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณควบคุมทางไฟฟ้า ($\pm 10V_{DC}$) เป็นสัญญาณไฮดรอลิก ใช้สำหรับควบคุมทิศทางและปริมาณการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก (Governor Oil Control) เพื่อใช้ควบคุมตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่ของใบน้ำร่องทางเข้า สำหรับปรับทิศทางทางไหลเข้ากังหันน้ำ อุปกรณ์ดังกล่าวประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ Electromagnetic Parts และ

Hydraulic Parts ซึ่งส่งสัญญาณไฮดรอลิกไปขับเคลื่อนชิ้นส่วนทางกลเพื่อผลักดัน ใบ Wicket Gate เพื่อบังคับทิศทางกระแสการไหลของน้ำที่เข้าปะทะ Runner อันมีผลต่อความเร็วรอบของเทอร์ไบน์ ดังรูปที่ 1 ทั้งนี้ ส่วนทางกลจะมีการส่งข้อมูลตำแหน่ง Wicket Gate ไปยัง PLC พร้อมทั้งความเร็วรอบของ Runner เพื่อประมวลผลภายใต้ภาระของการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในการกำหนดตำแหน่งของ Wicket Gate เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนด ดังรูปที่ 2 อันส่งผลต่อคุณภาพในการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 1 ชิ้นส่วนทางไฟฟ้าและชิ้นส่วนทางกลในการตรวจจับและควบคุมกังหันน้ำ



รูปที่ 2 การเชื่อมโยงระหว่างส่วนทางกลกับส่วนควบคุม

อุปกรณ์ Electro-Hydraulic Converter มีชิ้นส่วนที่เรียกว่า Pilot spool ทำงานแบบเคลื่อนที่ในแนวแกน หรือเคลื่อนที่ขึ้นและลง เพื่อเปิด-ปิดช่องเพื่อควบคุมอัตราการไหล ในตัวเรือนวาล์วหรือที่เรียกว่า Valve Sleeve ซึ่งถูกขับเคลื่อนให้หมุนรอบตัวเองเพื่อให้เกิดชั้นฟิล์มน้ำมันโดยรอบ Pilot Spool โดยชิ้นส่วนที่บังคับการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ของ Pilot spool คือ Magnetic Coil โดยมีการเคลื่อนที่ของ Pilot spool ตามแรงดันทางไฟฟ้าที่ป้อนเข้าที่ Terminal ทั้งนี้ ชิ้นส่วนที่มีการทำงานแบบเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเอง คือ Valve Sleeve, Ball Bearing, Gear Motor และ Roller Bearing จากการทำงานร่วมกันทั้งสองส่วน ถ้าชิ้นส่วน Pilot Spool ไม่คดงอ, การวางตำแหน่งดี, Oil Lap ถูกต้อง สามารถเป็นที่เชื่อถือเชื่อมั่นได้ว่า อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถทำงานได้ถูกต้องและแม่นยำ สำหรับความถูกต้องตามคำสั่งการเปิดและปิด Pilot Spool ประเมินจาก 3 ปัจจัยประกอบด้วย 1. ความแม่นยำที่เที่ยงตรง 2. ความมีเสถียรภาพในการตอบสนอง และ 3. ความอ่อนล้าหรือความล่าช้าในการทำงานซ้ำ ที่สามารถยอมรับได้ [7-8]

อุปกรณ์ E/H Converter ดังรูปที่ 3 มีหน้าที่รับสัญญาณควบคุม ทิศทาง ความเร็ว และตำแหน่งในการ เปิด-ปิด โดยที่สัญญาณควบคุม-VDC เป็นสัญญาณสั่งปิดอุปกรณ์



รูปที่ 3 อุปกรณ์ E/H converter

ซึ่งอุปกรณ์จะใช้ระยะเวลาสั่งปิดเร็วสุดเมื่อได้รับสัญญาณ -10 VDC สัญญาณควบคุมทางไฟฟ้า 0 VDC เป็นสัญญาณตำแหน่งหยุดนิ่งหรือ Neutral Position สัญญาณควบคุม +VDC เป็นสัญญาณสั่งเปิดอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์จะใช้ระยะเวลาเปิดเร็วสุดเมื่อได้รับสัญญาณ +10 VDC อีกทั้งมีระบบตรวจสอบกลับ หรือ Feedback Report ในการตรวจสอบความถูกต้องตามสัญญาณไฟฟ้าที่มาสั่งการ

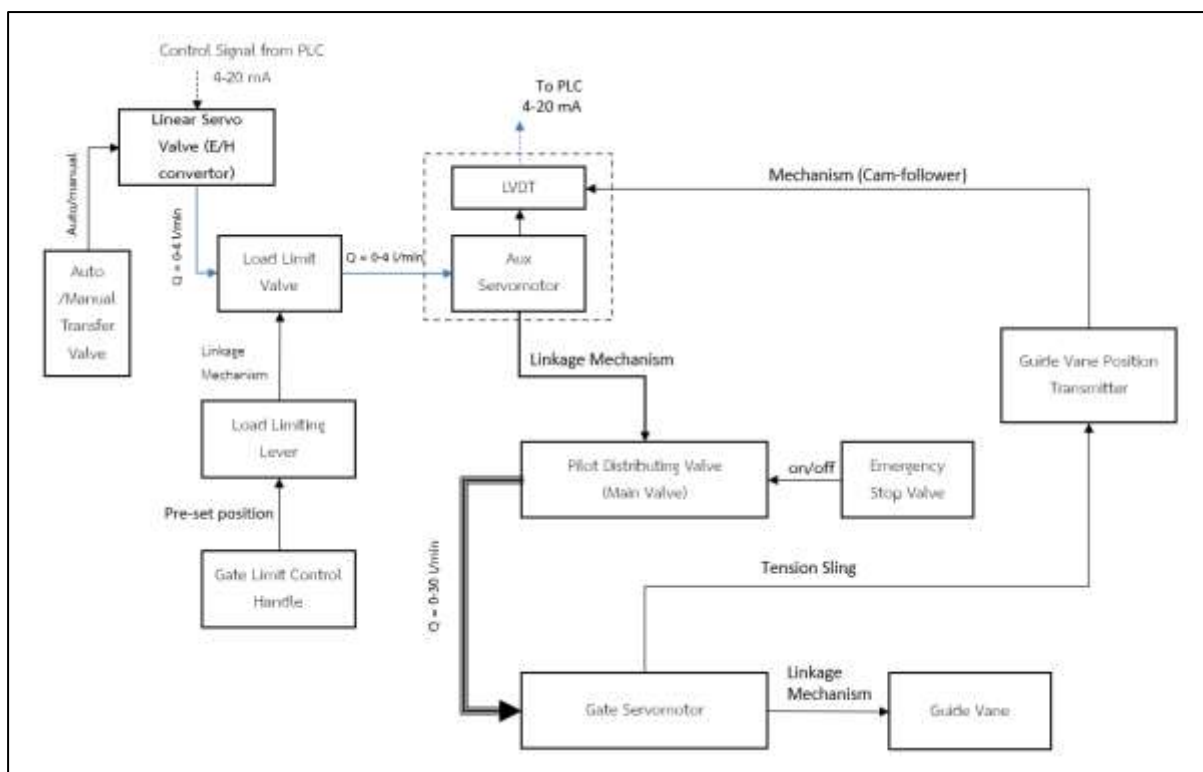
3.2 การสึกหรอทางกลที่เกิดขึ้น

จากการตรวจสอบ พบความเสียหายของฟันเฟืองตัวตาม Pinion Gear จากการขัดถู (Polishing) แสดงในรูปที่ 4 โดยเกิดขึ้นแบบซ้ำๆ จากการที่ฟันเฟืองสัมผัสกันทั้งแบบไถล (Sliding) และการกลิ้ง (Rolling) ในระหว่างการส่งถ่ายกำลัง การสึกหรอแบบนี้จะเกิดขึ้นมากกับการส่งถ่ายกำลังหรือการทำงานของเฟืองที่รอบต่ำๆ ซึ่งจะเป็นเหตุให้ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นบางมากเกินไป เมื่อเกิดการติดขัดจึงทำให้ก้าน Pilot Spool ติดขัด ไม่สามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วได้อย่างแม่นยำเหมือนเดิม ซึ่งจะทำให้ระบบทดกำลังไฮดรอลิกที่เชื่อมต่อกับระบบควบคุมดังกล่าว ทำงานผิดพลาด ซึ่งวาล์วไฮดรอลิกทำหน้าที่บังคับการเคลื่อนที่ของ Auxiliary Servomotor แสดงดังไดอะแกรมการทำงานในรูปที่ 5

เมื่อมีการปรับปรุงระบบจ่ายสัญญาณควบคุม มาเป็น PLC ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จึงได้ทำการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณควบคุม จากเดิม ± 10 VDC เป็น 4-20 mA ดังจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 4 การสึกหรอที่เป็นผลทำให้การหล่อลื่นลดลง และการเคลื่อนที่ของก้าน Servo Valve ติดขัด



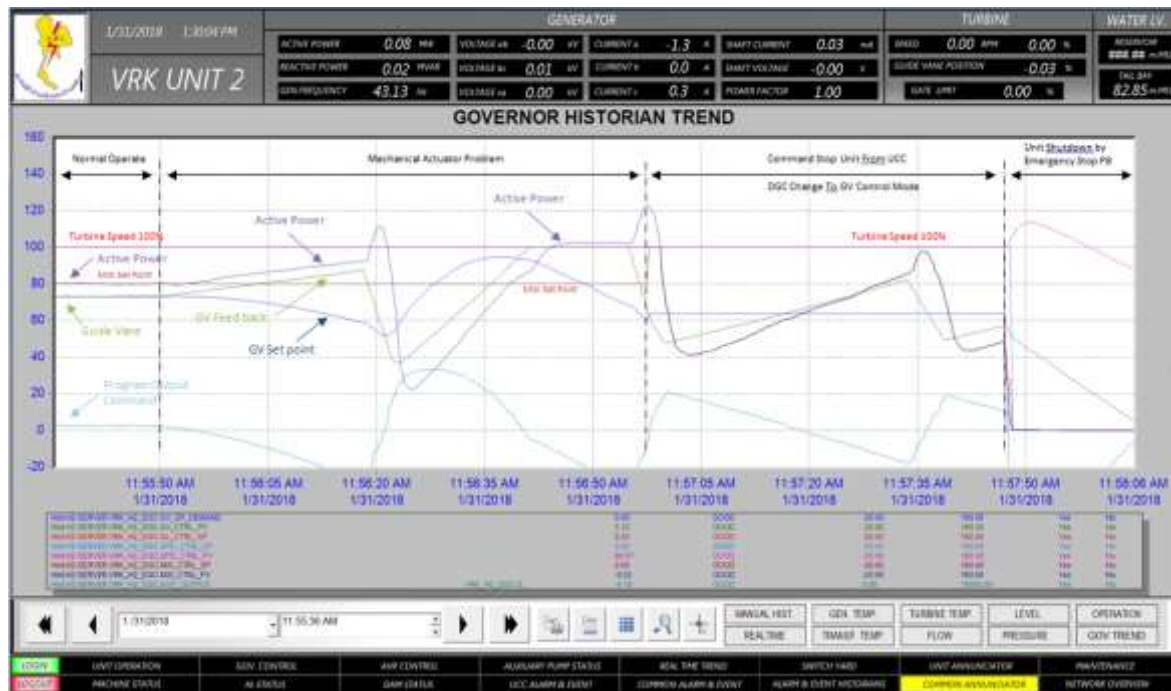
รูปที่ 5 Block diagram แสดงการรับสัญญาณควบคุมจาก PLC ไปสู่การควบคุมตำแหน่งแผ่นบังคับทิศทางไหล โดย Linear Servo Valve (E/H Converter) คืออุปกรณ์ทดแทนอุปกรณ์ที่ชำรุด

4 การทดสอบ

4.1 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมกั้นน้ำก่อนการปรับปรุง

จากการทดสอบ Output Test Mode MW Control ดังแสดงตามรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมกั้นน้ำ ไม่สามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ (ค่า MW Set Point เท่ากับ 80 MW) โดยตรวจสอบพบว่าอุปกรณ์ Governor Actuator ทำงานไปทางด้านเปิด จากเดิมอยู่ที่ตำแหน่ง Neutral Position ส่งผลให้ระบบสั่งเปิดใบน้ำร่องทางเข้า มากขึ้น จากที่เปิดใช้งานอยู่ที่ตำแหน่ง 72% ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยที่ไม่มีคำสั่งการทำงาน (ตั้งแต่เวลา 11:55:50 AM) ในขณะเดียวกันเมื่อ PLC พบปัญหาการทำงานที่ผิดปกติ จึงสั่งลดกำลังการผลิตไฟฟ้าให้กลับมาอยู่ที่ค่า MW Set Point โดยส่งสัญญาณปิด เพื่อลด

ปริมาณการเปิดใบน้ำร่องทางเข้า แต่อุปกรณ์ Governor Actuator ไม่ตอบสนองต่อสัญญาณ PLC จึงส่งสัญญาณให้ลดกำลังการผลิตลงจนถึงค่าการสั่งงานค่าหนึ่ง อุปกรณ์ Governor Actuator จึงปิดตามสัญญาณที่มาสั่งงาน (ที่เวลา 11:56:20 AM) เมื่อผู้ควบคุมการเดินเครื่องเห็นว่าเกิดเหตุการณ์ผิดปกติดังนี้ จึงได้ใช้คำสั่ง Command Stop ใน Guide Vane Control Mode Operation (ที่เวลา 11:57:00 AM โดยประมาณ) แต่ไม่สามารถลงเครื่อง (Stop Unit) ได้ เพราะได้เกิดการ Lag Time และ Lag Load Command Not Complete เนื่องจากองค์ประกอบของ Feedback Command Lag Time & Lag Load ดังนั้นผู้ควบคุมการทดสอบ จึงหยุดการทำงานของเครื่องแบบฉุกเฉิน โดยการกด PB 5E (Emergency Stop) เพื่อยกเลิกการทดสอบ (ที่เวลา 11:57:50 AM โดยประมาณ)



รูปที่ 6 Governor Historian Trend ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ เครื่องที่ 2

4.2 หลักเกณฑ์ในการคัดเลือกอุปกรณ์ไฮดรอลิกเพื่อ

ทดแทนอุปกรณ์ที่ชำรุด

เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ไฮดรอลิกที่มีลักษณะเป็นแบบวาล์วแบบควบคุมทิศทาง พบว่าในปัจจุบันอุปกรณ์ อิเล็กโตรไฮดรอลิกเซอร์โววาล์ว (Electrohydraulic Servo Valve) มักถูกใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน โดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวาล์ว อีกทั้งยังมีความเที่ยงตรงแม่นยำในการทำงานสูง จึงนำมาประยุกต์ใช้เนื่องจากมีสมบัติครบถ้วนทั้งด้านไฟฟ้าและทางกล

เมื่อพิจารณาการทำงานของ Governor Actuator พบว่ามีหลักการทำงานเหมือนกับวาล์วแบบควบคุมทิศทาง (Directional Control Valve) ในระบบไฮดรอลิก ประกอบกับก่อนหน้านี้ได้มีการปรับปรุงระบบควบคุมโดยการใช้อุปกรณ์ Programmable Logic Control (PLC) ซึ่งมีลักษณะการประมวลผลเป็นแบบดิจิทัลเป็นตัวควบคุมหลัก โดยออกแบบและพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้ดีกว่าระบบเดิม ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1207 ทางผู้วิจัย จึงมีหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกอุปกรณ์ Linear Servo Valve ที่มีอัตราการไหลสูงสุด ไม่น้อยกว่าอัตราการไหลสูงสุด ของอุปกรณ์เดิมที่ชำรุด และมีความไวต่อสัญญาณควบคุม

เพียงพอ และมีเสถียรภาพ ซึ่งพิจารณาจากค่า Step Response และค่า Hysteresis นอกจากนี้ยังต้องมีลักษณะ Fail Safe Valve Position สรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์ในการคัดเลือกอุปกรณ์ไฮดรอลิก

Item	Required Specification
Control Method	4/3-way valve (P-T-A-B)
Rate Flow	4 L/min
Max. Operating Pressure	35 MPa
Internal Leak	0.4 L/min or Less
Hysteresis	0.1% or Less
Fail-Safe Function	Fail to Close
Step Response	≤ 4 ms
Power Supply	24 V DC
Current Signal	4 to 20 mA
Hydraulic Operating Fluid	ISO VG68

4.3 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์และระบบควบคุมกักหน้

ในการเก็บรวบรวมข้อมูลระหว่างงานทดสอบ ใช้ Digital Oscillographic Recorder “YOKOKAWA” model

DL750 (Yokogawa (Thailand) Ltd., Bangkok, Thailand, 10310) สำหรับแสดงผลของกระแสไฟฟ้าควบคุม และบันทึกข้อมูลการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในส่วนของความดัน ใช้ Pressure Transducer Recorder “KYOWA” (KYOWA DENGYO (Thailand) CO.,LTD., Bangkok, Thailand, 10260) สำหรับวัดค่าความดันน้ำซึ่งติดตั้งบริเวณ Power Conduit ส่วนของ Spiral Case และ Draft Tube และใช้ Stroke Displacement Transducer สำหรับวัดค่าตำแหน่งการเปิดและปิดของอุปกรณ์ Servo Motor

เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานของระบบที่ปรับปรุงตามข้อกำหนดการทำงาน จึงแบ่งการทดสอบออกเป็น

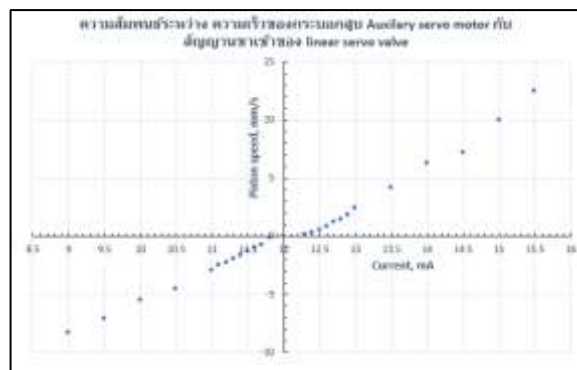
1. การทดสอบ Governor Dry Test เพื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของโหมดควบคุมตำแหน่งของใบนำร่องทางเข้า (Guide Vane Position Control Mode) เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองที่ดีและมีเสถียรภาพ อีกทั้งเป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของระหว่างส่วนทางไฟฟ้ากับส่วนทางกลของระบบ Governor Control โดยมีการทดสอบในขณะที่กังหันน้ำอยู่ในสถานะหยุดนิ่ง คือต้องไม่มีน้ำไหลผ่านประตูน้ำทางเข้า (Intake Gate) และใบนำร่องทางเข้า (Guide Vane) เข้ามาสู่กังหันน้ำ

2. การทดสอบ Governor Wet Test เป็นสถานะที่มีภาระจริง เพื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของโหมดควบคุมความเร็ว (Speed Control Mode) และโหมดควบคุมกำลัง (Power Control Mode) เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองที่ดีและมีเสถียรภาพ อีกทั้งเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ

5 ผลการทดสอบ

5.1 ผลการทดสอบ Governor Dry Test

เมื่อทำการเชื่อมต่อสัญญาณควบคุมระบบ PLC แล้ว จึงทำการจำลองการจ่ายค่า Input Signal ให้กับอุปกรณ์ High Speed Linear Servo Valve (E/H Convertor) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Auxiliary Servomotor Average Speed กับสัญญาณจาก PLC ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่า Auxiliary Servomotor Average Speed ที่ Control Current ต่างๆ

จากผลการทดสอบเมื่อป้อน Input Signal ในย่าน 4–20 mA พบว่าที่ค่า 12 mA เป็นค่า Neutral Position ถ้ามี Input Signal มากกว่า 12 mA Servomotor จะเคลื่อนที่เข้าสู่สถานะเปิด โดยมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามประมาณกระแสที่เปลี่ยนไป ในทางตรงกันข้าม ถ้ามี Input Signal น้อยกว่า 12 มิลลิแอมป์ Servomotor จะเคลื่อนที่เข้าสู่สถานะปิด โดยมีความเร็วของการเคลื่อนที่แปรผันตามปริมาณกระแสสัญญาณเช่นกัน ทำการปรับตั้งความดันน้ำมันป้อนเข้า และความดันด้านขาออกของ Servo Valve เพื่อให้ความเร็วสูงสุดของ Servo Motor สามารถตอบสนองและทำงานได้ตามฟังก์ชันการควบคุมที่กำหนด โดยพบว่าวาล์วสามารถจ่ายน้ำมัน และทำให้ความเร็วของ Auxiliary Servomotor ใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้นกับสัญญาณ Input Signal ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีช่วงที่ไม่ตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมเล็กน้อยที่ 12 ± 0.25 mA. ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากความเร็วที่ได้เทียบกับย่านความเร็วเดิมตามข้อกำหนดของการทำงาน พบว่าเพียงพอต่อการนำไปควบคุมอัตราการจ่ายน้ำมันของ Main Valve เพื่อควบคุม กลไกของแผ่นบังคับทิศทางไหลได้ และพบว่า การตอบสนองของก้าน Auxiliary Servomotor ต่อสัญญาณในช่วงดังกล่าวมีความราบเรียบ ไม่เกิดการกระตุก และมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สำหรับ Dry Test Scheme

5.2 การทดสอบ Governor Wet Test

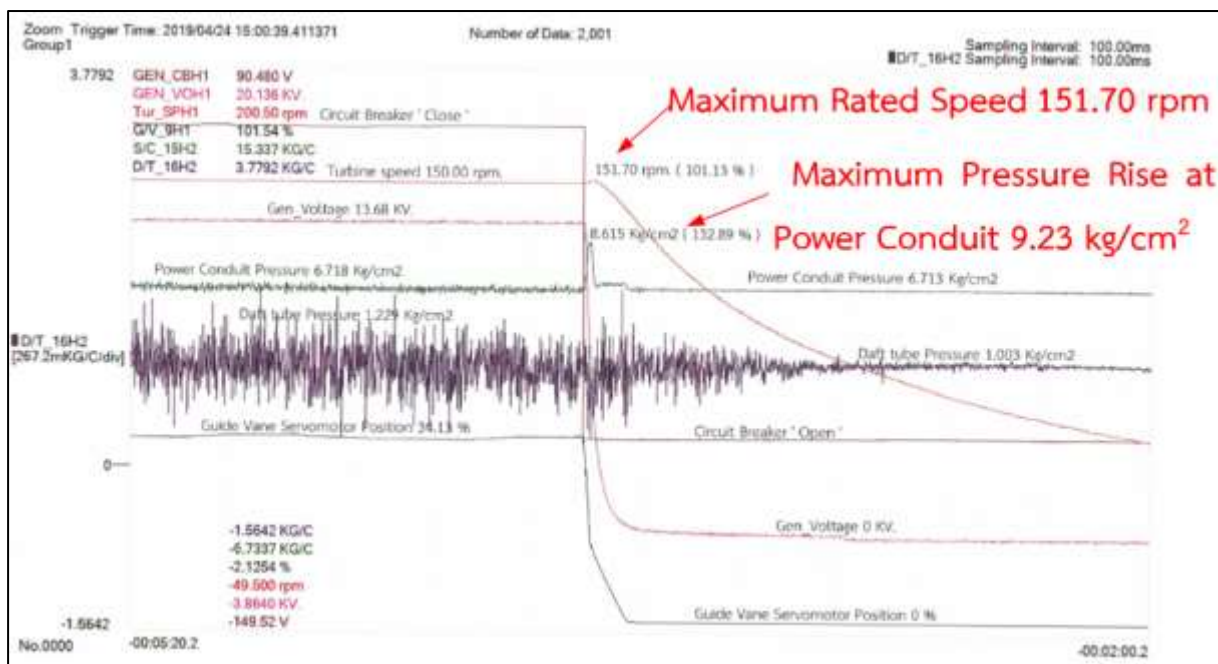
เป็นการทดสอบเพื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ PID และวาล์วควบคุมต่างๆ ในระบบควบคุมการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าฉุกเฉิน เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองที่ดีและ

มีเสถียรภาพ อีกทั้งเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ก่อนนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าใช้งานจริง และทดสอบในโหมดควบคุมความเร็ว และควบคุมกำลังต่อไป

หลังจากการดำเนินการข้างต้น จึงทำการตรวจสอบและทดสอบฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ High Speed Linear Servo Valve โดยทำการจำลองการเกิด Trip ของระบบ โดยเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ตำแหน่ง 34.13% เพื่อจ่าย Load ที่ 15 เมกะวัตต์ เมื่อผู้ควบคุมการทดสอบ สั่ง

Trip Emergency Lock-Out 86U1A, 86U1B ระบบสามารถสั่งปิดใบนำร่องทางเข้า ได้ตามที่กำหนด

จากรูปที่ 8 พบว่าระบบควบคุมความเร็วรอบทำการปิดใบนำร่องทางเข้า (Guide Vane) จาก 34.13 เปอร์เซ็นต์อย่างทันที โดยกักกันถูกปลดการอย่างทันทีเช่นกัน และเนื่องจากยังมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลปะทะกักกันอยู่ จึงให้ค่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นสูงสุดเล็กน้อยเท่ากับ 151.70 รอบ/นาที คิดเป็น 101.31 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Acceptant criteria $\leq 154\%$)



รูปที่ 8 ผลการทดสอบ Unit Protection Trip Test Function Lock-out 86U1A,86U1B

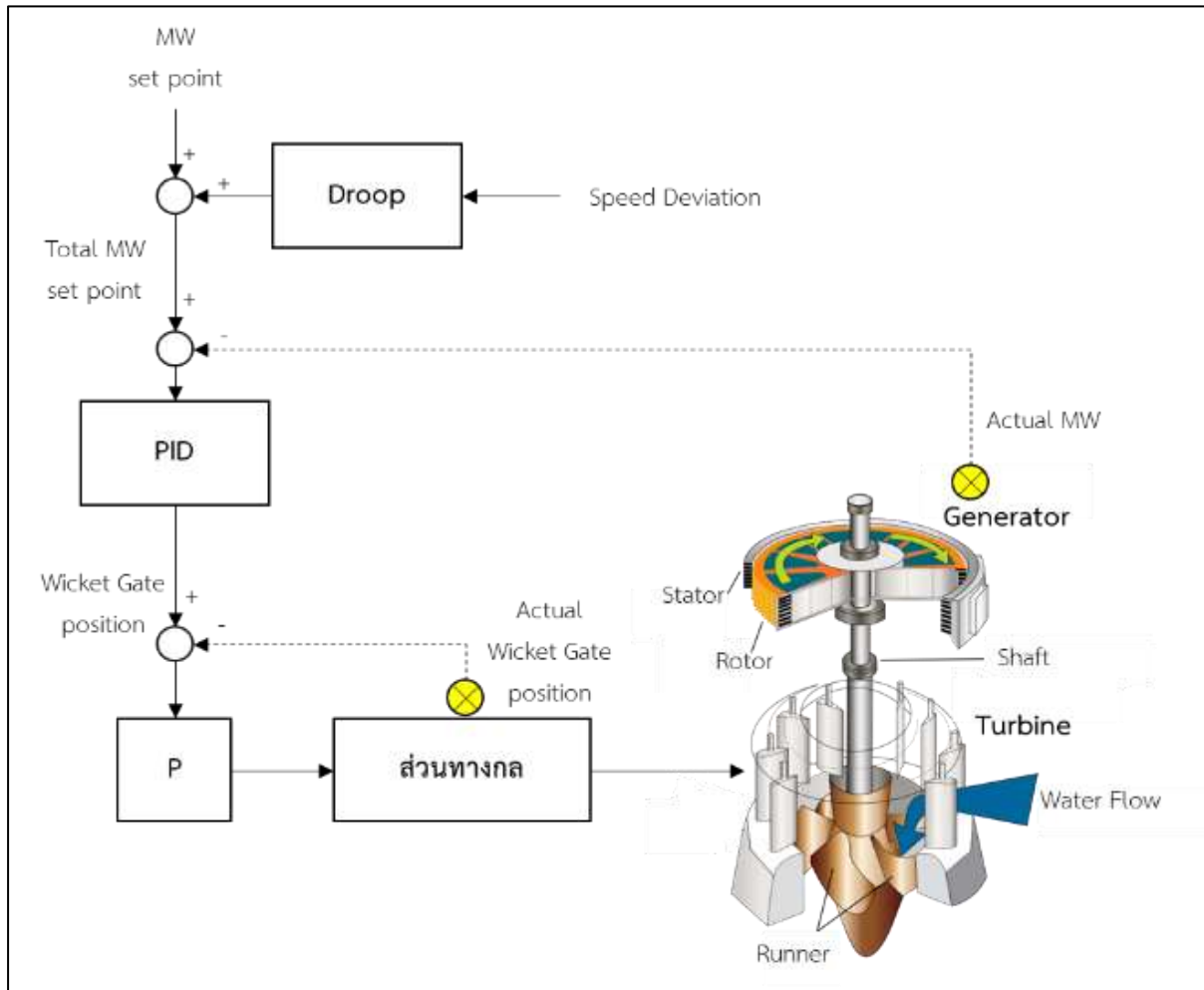
เมื่อมีการลดลงของความเร็วของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ใบนำร่องทางเข้า เนื่องจากการปรับตำแหน่งของใบนำร่อง จึงเกิดการเพิ่มขึ้นของความดันในท่อ Power Conduit โดยมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 8.615 นิวตัน/ตร.ซม. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Acceptant criteria ≤ 11.3 นิวตัน/ตร.ซม. โดยที่กักกันน้ำยังคงหมุนด้วยความเฉื่อยต่อไป หากแต่มีความเร็วลดลงตามลำดับ อันเป็นผลของความเสียดทาน

5.3 Automatic Start-Stop (EGAT-DGC Adjustment On-Load Condition)

ในการทดสอบการเข้าสู่ระบบการจ่ายไฟอัตโนมัติ มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมกักกันน้ำ ในสภาวะ On-Load เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการต่อวงจรเพื่อขนานระบบผลิตกระแสไฟฟ้า (Start Up) เข้ากับระบบการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ภาระทางไฟฟ้าจำลอง และการทดสอบหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Stop Unit) และเพื่อตรวจสอบฟังก์ชันต่างๆ สำหรับเตรียมความพร้อมในการ Start Up เครื่องกำเนิด

ไฟฟ้า เพื่อประเมินการทำงานของอุปกรณ์ High Speed Linear Servo Valve ที่รับสัญญาณควบคุมแบบ Sequence Operation จาก PLC ในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

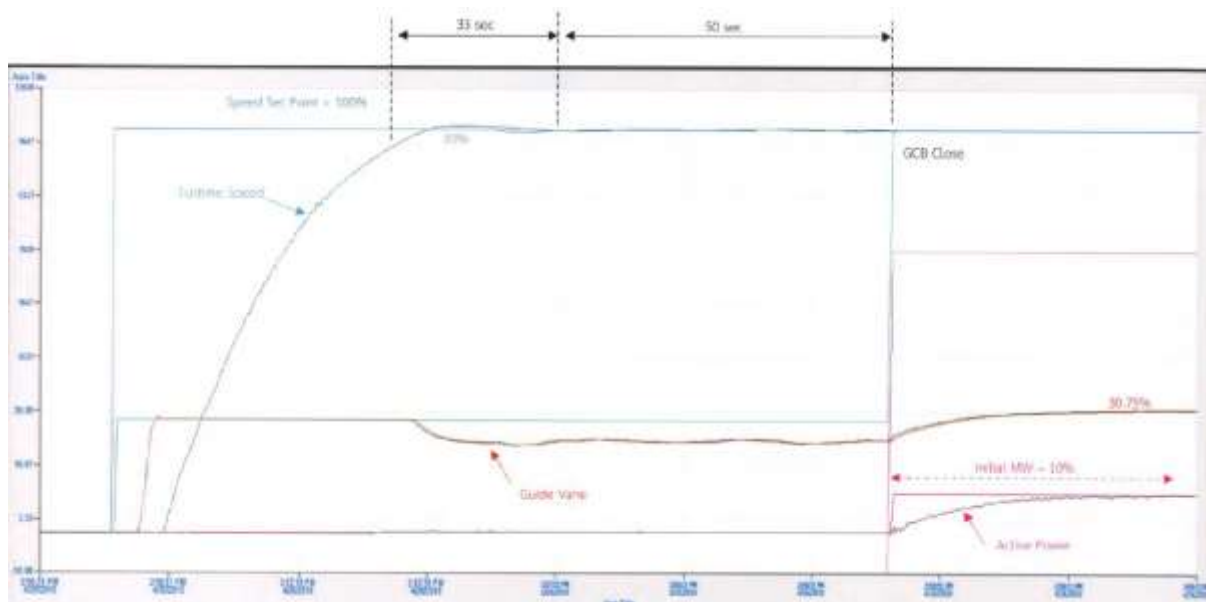
และมีการชดเชยความเร็วรอบผ่านฟังก์ชันควบคุม MW ข่ายกระแสไฟฟ้า ที่คอยสั่งเพิ่มหรือลด MW Set Point อย่างอัตโนมัติ โดยการเบี่ยงเบนของรอบกังหันจะถูกประมวลผลผ่านฟังก์ชัน Droop เพื่อกำหนดค่า Total MW Set Point ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การชดเชยความเร็วรอบเพื่อรักษา MW set point ผ่าน ฟังก์ชัน Droop Control

จากรูปที่ 10 พบว่า เมื่อมี Command Automatic Start ผ่าน อุปกรณ์ High Speed Linear Servo Valve เพื่อสั่งเปิด Guide Vane ไปที่ตำแหน่ง 28% เมื่อความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปที่ 135 RPM (90% Rated Speed) มี Command Excitation “ON” และในขณะที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ระบบทำการปรับตำแหน่งของ Guide Vane เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วรอบที่ Rated Speed 150 RPM ภายในระยะเวลา 33 วินาที โดยที่ Guide Vane เคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 22–23% อีก 50 วินาที ก่อนที่ ผู้ควบคุมจะทำการ Parallel Mode MW Control ต่อไป

จากการทดสอบ Governor Control Start-Stop Test พบว่าอุปกรณ์ High Speed Linear Servo Valve สามารถรับ Command จาก PLC ของระบบในการควบคุมการเปิด-ปิด อุปกรณ์ Guide Vane เพื่อรักษาความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือ Rated Speed ที่ 150 RPM ได้ โดยการทำงานเป็นไปตามเงื่อนไขการควบคุมของระบบ ไม่พบข้อผิดพลาด สามารถรับและตอบสนอง Command จากห้องควบคุมได้ เข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ได้ ในระยะเวลาที่กำหนด และมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับภายใต้เงื่อนไข On-Load Condition



รูปที่ 10 ผลการทดสอบช่วง Initial Load

6 สรุปผลการทดสอบ

จากการตรวจสอบผลตอบแทนของระบบควบคุมตามรายการทดสอบที่กำหนดขึ้นจากเงื่อนไขการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าอุปกรณ์ E/H Convertor เดิม สามารถได้รับการทดแทนด้วยอุปกรณ์ Hydraulic Servo Valve ที่มีย่านทำงานที่เหมาะสม โดยเกณฑ์การคัดเลือกอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ ย่านการทำงานของน้ำมันไฮดรอลิกของ Servo Valve ต้องเทียบเท่าได้กับย่านของ E/H Convertor เดิม นอกจากนี้ ระบบที่ติดตั้งขึ้นใหม่มีการรับสัญญาณชนิด 4–20 mA ทดแทนระบบเดิมที่รับสัญญาณแบบ ± 10 VDC ทำให้อุปกรณ์ใหม่นี้สามารถรับสัญญาณจาก PLC ได้โดยตรงด้วยหลักเกณฑ์การทดแทนอุปกรณ์ดังกล่าว และการปรับตั้งพารามิเตอร์ PID และอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลที่เกี่ยวข้องใหม่เพื่อรองรับอุปกรณ์ที่เปลี่ยนไป จึงทำให้ยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพของการควบคุมความเร็วรอบ ได้ตามเดิม

นอกจากการดำเนินการข้างต้น คณะผู้ดำเนินการยังได้ทำการทดสอบการควบคุมอัตราการจ่ายไฟฟ้าที่ ค่า MW ต่างๆ อีกด้วย ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในบทความฉบับนี้ และด้วยผลของการดำเนินการดังกล่าว ช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าหมายเลข 1 เชื้อนิวเคลียร์ลงกรณ มีสภาพพร้อมจ่ายไฟฟ้าได้อีกครั้ง ถือเป็นความสำเร็จในการใช้ความรู้

ทางวิศวกรรมในการปรับปรุงระบบที่มีความซับซ้อน เป็นการประหยัดงบประมาณด้านการซ่อมบำรุงโรงไฟฟ้าแทนการนำเข้าและติดตั้งชุดควบคุมโรงไฟฟ้าโดยผู้ผลิตจากต่างประเทศ

7 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมวิจัยหน่วยงานกองบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าเชื้อนิวเคลียร์ลงกรณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการดำเนินการให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Thaiprayoon , P. Srinoui , P. Intap, et al., “Fundamentals of Hydropower”, EGAT, Bangkok, Thailand, Second Rep., 2013.
- [2] P. Srinoui , V. Jannui , K. Sarun, et al., “Electro-Hydraulic Governor”, EGAT, Bangkok, Thailand, First Rep. ,1989.
- [3] *Governor and Turbine Auxiliaries supplied to EGAT Khaolerm Project; Turbine Control Device*, Hitachi, Ltd., Ibaragi Prefecture, Japan, 1986, No.3, pp.400-443.
- [4] *Governor Operation and Maintenance Instructions; Plant Feature Governors*, Hitachi, Ltd., Ibaragi Prefecture, Japan, 1986, pp.200-235.

-
- [5] P. Surawattanawan, "Mathematical modeling analysis of positional control system for hydraulic cylinder," *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 17, no. 49, pp. 92–107, 2003.
- [6] D. Duangsoythong , T. Tachahog , V. Kosong, et al., "Digital Governor Control System", EGAT, Bangkok, Thailand, 2013.
- [7] *Guide to Specification of Hydraulic Turbine Control Systems*, IEC 61362, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1998.
- [8] *Hydraulic Turbines—Testing of Control Systems*, IEC 60308, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2005.

การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า ด้วยเทคนิค ABC และ การพยากรณ์ กรณีศึกษาระบบการจัดเก็บสินค้า

The Efficiency Enhancement of Warehouse Management using ABC and Forecasting Technique: A Case Study of Storage System

ธงชัย แสงสุวรรณดี^{1,*}, สกนธ์ คล่องบุญจิต¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Thongchai Saengsuwande^{1,*}, Sakon Klongboonjit¹

¹Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Lat Krabang , Lat Krabang , Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: 63601166@kmitl.ac.th

Received: Jul 22, 2021; Revised: Sep 22, 2021; Accepted: Sep 28, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการจัดการคลังสินค้า สำหรับคลังสินค้ากรณีศึกษา มีปัญหาหลัก 2 ประการ คือ ระยะทาง และระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้าที่มาก และยาวนาน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการจัดการคลังสินค้า เพื่อรับมือกับปัญหาเหล่านี้ ขั้นแรกจะใช้เทคนิค ABC เพื่อจัดกลุ่มสินค้าทั้งหมดในคลังสินค้านี้ตามมูลค่าการสั่งซื้อสินค้า จากนั้นพื้นที่จัดเก็บสินค้าสำหรับสินค้าในกลุ่ม A ที่มีมูลค่าการสั่งซื้อสินค้าสูงจะถูกจัดตำแหน่งใหม่ ผลลัพธ์ที่จากการปรับปรุงแสดงให้เห็นว่าระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้าในคลังสินค้าลดลงประมาณ 70.69% และ 65.97% ตามลำดับ เพื่อรักษาประสิทธิภาพที่ดีของระบบการจัดการคลังสินค้าในอนาคต วิธีการพยากรณ์สามวิธี คือ วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก และวิธีการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลจะถูกทดลองใช้กับสินค้ากลุ่ม A ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับให้เรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลเป็นวิธีการคาดการณ์ที่เหมาะสม โดยมีค่ากำลังการพยากรณ์ 66.67% ที่ 23.64% ค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์

คำสำคัญ: คลังสินค้า, การวิเคราะห์ ABC, การพยากรณ์

Abstract

This research aims to improve the efficiency of warehouse management system. For the warehouse in this case study, there are two main problems which are about long pick up distance and long pick up time affecting to the efficiency of its warehouse management system. To cope with these problems, The ABC technique is firstly applied to group all goods in this warehouse base on the turnover rate of goods. Next, the storage areas of goods, especially group A goods which have high turnover rate, are re-located. The improving results show that the value of pick up distance and pick up time of all goods in warehouse are reduced about 70.69% and 65.97% respectively. To maintain the good efficiency of its warehouse management system in the future, three forecasting methods of the moving average method, the weighted moving average method, and the exponential smoothing method

are trial applied with group A goods. The calculating results show that the exponential smoothing method is the proper forecasting method with 66.67% of forecasting power at 23.64% of mean absolute percentage error.

Keywords: Warehouse, ABC Analysis, Forecasting

1. บทนำ

สืบเนื่องจากการคาดการณ์ภาวะเศรษฐกิจโลกที่คาดว่าจะฟื้นตัวมาจากการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางที่ดี ส่งผลให้มีการคาดการณ์ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันที่จะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นธุรกิจที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และแก๊สธรรมชาติ จำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนการปรับปรุงเพื่อเตรียมความพร้อมกับการขยายตัวของธุรกิจในอนาคตอันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการการใช้และผลิตน้ำมัน เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการสินค้าของลูกค้าได้อย่างสูงสุด

โดยที่คลังสินค้าการศึกษา เป็นคลังที่จัดเก็บสินค้าประเภทเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ สำหรับงานปิโตรเคมี โดยที่คลังสินค้านี้ดำเนินการจัดเก็บสินค้าไว้เป็นจำนวนมาก เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า แต่การดำเนินงานกิจกรรมต่างๆ ในคลังสินค้าส่วนใหญ่ยังไม่ได้มีการวางแผนอย่างเป็นระบบ มีการจัดวางสินค้าที่ไม่เป็นระเบียบ ไม่มีการจัดกลุ่ม หรือจำแนกประเภทของสินค้าที่จะทำการจัดเก็บทำให้ ใช้ระยะทาง และเวลาที่มากในการจัด หรือหยิบสินค้า การควบคุมสินค้าคงคลังทำได้ไม่ดี และมีต้นทุนในการบริหารจัดการคลังสินค้าที่สูง

ดังนั้นเพื่อให้สามารถจัดการสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับรูปแบบการปฏิบัติงานขององค์กร เพื่อให้คลังสินค้านี้มีปริมาณสินค้าคงคลังที่ลดลง สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า และสามารถสามารถลดต้นทุน และค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบการจัดการคลังสินค้าได้ ทางผู้วิจัยจึงนำข้อมูลปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้าในอดีตมาวิเคราะห์ โดยใช้ทฤษฎี ABC Analysis ในการแบ่งกลุ่มสินค้า และปรับปรุงพื้นที่วางสินค้า จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบผลการดำเนินการก่อน และหลังทำการปรับปรุง นำข้อมูลที่ได้จากการแบ่งกลุ่มสินค้ามาทำการวิเคราะห์การพยากรณ์ความต้องการสินค้า

ของลูกค้าในอนาคต โดยใช้หลักทฤษฎีการพยากรณ์ (Forecasting) ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) วิธีการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนัก (Weighted Moving Average) และวิธีการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้พยากรณ์ยอดขายในอนาคต โดยคาดว่าจะมีลักษณะเช่นเดียวกับยอดขายในปัจจุบัน ยอดขายหรืออุปสงค์ต่อความต้องการของสินค้าได้รับอิทธิพลจากแนวโน้ม (Trend) ฤดูกาล (Seasonal) วัฏจักร (Cycle) หรือ เหตุการณ์ผิดปกติ (Irregular Variation) ซึ่งมีความง่ายในการพยากรณ์ และอธิบายต่อผู้บริหาร หรือผู้ใช้ค่าพยากรณ์ให้เข้าใจ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error, MSE) ในการเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ในแต่ละแบบเพื่อให้ได้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำ และเกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

ตัวอย่างของงานวิจัยลักษณะนี้ เช่น งานวิจัย [1] การจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management) เป็นส่วนหนึ่งของต้นทุนสินค้า โดยที่จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของกิจกรรม และการจัดการพื้นที่ในคลังสินค้าให้สามารถสนองตอบต่อกระบวนการรับสินค้า การเก็บรักษา และการเบิกจ่าย งานวิจัย [2] คำว่า “คลัง” ในพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน แปลว่าสถานที่สำหรับเก็บสิ่งของเป็นจำนวนมากๆ ดังนั้นคำว่า “คลังสินค้า” (Warehouse) จึงหมายความว่าสถานที่สำหรับเก็บสินค้าเป็นจำนวนมาก และ “การคลังสินค้า” (Warehousing) หมายถึง การเก็บรักษาสินค้านั่นเอง งานวิจัย [3] ได้ให้คำนิยามไว้ในหนังสือ Effective Management ไว้ว่า “การจัดการ” คือการผสมผสานทรัพยากรต่างๆ เพื่อให้การดำเนินการต่างๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ งานวิจัย [4] งานปฏิบัติการคลังสินค้ามีขั้นตอนและรายละเอียดมาก งานส่วนใหญ่จะเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับ

ด้านการยกขน การจัดเก็บ และหยิบสินค้าตามใบสั่งซื้อ ปฏิบัติการคลังสินค้าจึงใช้แรงงานมาก งานวิจัย [5] สินค้าคงคลัง หมายถึง สินค้าที่มีไว้ใช้ในการดำเนินธุรกิจ โดยสินค้าแต่ละประเภทจะแสดงให้เห็นถึงจำนวนเงินที่ต้องลงทุนอยู่จนกว่าจะถูกจำหน่ายออกไป เป็นการแสดงถึงสัดส่วนการลงทุนของกิจการในการที่จะขายสินค้านั้นต่อลูกค้า สินค้าจะเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จ หรือล้มเหลวได้ เพราะถ้าหากธุรกิจมีการควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพ ก็จะเป็นส่วนที่ช่วยให้ธุรกิจได้รับผลกำไรเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกิจการที่ต้องมีหน้าที่บริการสินค้าให้กับลูกค้าแล้วก็ต้องให้ความสำคัญกับการควบคุมมากยิ่งขึ้น ไมเช่นนั้นอาจทำให้กิจการ มีสินค้าในปริมาณที่ไม่เหมาะสมได้ และนั่นคืออาจมีสินค้าไม่พอกับการจำหน่าย หรือมีสินค้าในปริมาณมากเกินไป แต่ถ้าหากกิจการมีความควบคุมสินค้าอย่างดีปัญหาเหล่านี้จะไม่เกิดขึ้น งานวิจัย [6] อธิบายการวางผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) การวางผังของคลังสินค้าหรือวัสดุโดยทั่วไปมักจะต้องการให้สินค้านั้นมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งของพนักงาน และสินค้านั้นต้องสั้น กระทัดรัด เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ช่องทางเดินควรจะเป็นแคบที่สุดเท่าที่จะทำได้และไม่เป็นทางตัน งานวิจัย [7] การทำงานภายในคลังสินค้าทุกขั้นตอนไม่ว่าจะเป็นการรับสินค้า การขนส่งสินค้า การผลิตสินค้า และอื่นๆ ล้วนแต่มีการกำหนดดัชนี หรือเป้าหมายในการวัดประสิทธิภาพในการทำงาน เพื่อช่วยให้ทราบว่าการดำเนินงานนั้นมีความเหมาะสม และมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน และถ้าไม่เหมาะสมก็ควรพิจารณาปรับปรุงแก้ไขในส่วนนั้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพในการทำงาน งานวิจัย [8] การควบคุมสินค้าคงคลัง เป็นงานที่ทำขึ้นเพื่อให้ค่าใช้จ่าย หรือต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการจัดการคลังสินค้าให้มีสินค้าคงคลังต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามบริษัทก็จะมีสินค้าคงคลังมากมายหลายชนิด ถ้าจะให้ความสนใจควบคุมสินค้าคงคลังทั้งหมดนี้อย่างใกล้ชิดก็จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และเสียเวลามาก ดังนั้นนอกเหนือจากส่วนที่เป็นนโยบายของบริษัทแล้ว การควบคุมสินค้าคงคลังควรพิจารณาถึงความเหมาะสมของชนิดสินค้าคงคลังด้วยทางที่เหมาะสมจึงควรจำแนกประเภทของ

สินค้าคงคลังออกเป็นชนิดที่มีความสำคัญมาก และที่มีความสำคัญรองลงไป วิธีนี้เรียกว่า ABC Analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อจัดลำดับความสำคัญ เพื่อให้สามารถจัดการกับสินค้าประเภทต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม งานวิจัย [9-11] ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีบริหารการจัดเก็บสินค้า ที่เหมาะสมของคลังสินค้าที่ทำการศึกษา โดยทำการศึกษารูปแบบแบ่งกลุ่ม (ABC: Classification) แบ่งสินค้าออกเป็น 3 กลุ่มพิจารณาจากมูลค่าที่มีมูลค่าสูง ปานกลาง และต่ำ แทนด้วยกลุ่ม A B และ C ซึ่งส่วนใหญ่จะมีกลุ่มที่มีมูลค่าสูงประมาณ 70-80% อยู่ในกลุ่ม A และรองลงมา เป็นกลุ่ม B และ C ตามลำดับ ศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของระยะทางที่ใช้ในการจัดเก็บสินค้า ก่อน และหลังทำการปรับปรุง งานวิจัย [12] การพยากรณ์ คือการมองดูอนาคตโดยอาศัยข้อมูล หรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมาแล้วในอดีตนำมาเป็นพื้นฐานของการพยากรณ์ยอดขาย การพยากรณ์ยอดขายจึงเป็นหัวใจสำคัญอย่างยิ่งของการวางแผนการตลาด และสามารถช่วยในการตัดสินใจของผู้บริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าการพยากรณ์นั้นถูกต้อง และเชื่อถือได้ เทคนิคการพยากรณ์การขายมี 2 เทคนิคใหญ่ๆ ได้แก่ เทคนิคการพยากรณ์เชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ ความรู้ และความเข้าใจในวัตถุประสงค์ของการพยากรณ์ และรูปแบบของยอดขายในอดีตจะเป็นตัวแปรสำคัญในการตัดสินใจเลือกเทคนิค หรือวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสม หรือถูกต้องมากที่สุด งานวิจัย[13-15] เป็นการศึกษาความต้องการสินค้าของลูกค้า เพื่อหารูปแบบการพยากรณ์(Forecasting Model) ที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น วิธีการพยากรณ์โดยวิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก วิธีปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล และอื่น ๆ

2. ขั้นตอนการทดสอบ

ในที่นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียดเพื่อหาสาเหตุ และการแก้ไขปัญหาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าในคลังสินค้ากรณีศึกษา โดยมีขั้นตอน และวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

2.1. ทำการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของคลังสินค้ากรณีศึกษา

โดยทำการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์ ผู้บริหาร

เจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้อง และทำการสังเกตการณ์การทำงานต่างๆ ภายในคลังสินค้า เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ ภายในคลังสินค้า
2. ลักษณะของกระบวนการทำงานภายในคลังสินค้า
3. ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะแผนผังของชั้นวางสินค้า

2.2.ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในคลังสินค้ากรณีศึกษา

โดยจะทำการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเบิกสินค้า โดยทำการเก็บข้อมูล ตั้งแต่ 1 ต.ค. 63-31 มี.ค. 64

2.3.ทำการออกแบบแนวทางแก้ปัญหาที่เป็นไปได้สำหรับปัญหาที่พบในคลังสินค้ากรณีศึกษา

จากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลนำมาทำการจัดกลุ่มของสินค้าโดยใช้ทฤษฎี ABC Analysis ตามมูลค่าการตั้งซื้อสินค้า ซึ่งจะสามารถจำแนกรายการสินค้าเป็น 3 กลุ่มเพื่อให้ค่าลงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจัดกลุ่ม ABC มูลค่าการตั้งซื้อสินค้า

กลุ่มสินค้า	มูลค่าการตั้งซื้อรวม (บาท)	เปอร์เซ็นต์	จำนวนรายการสินค้า
A			
B			
C			

จากนั้น นำข้อมูลที่ได้จากการแบ่งกลุ่มสินค้า มาทำการปรับปรุงพื้นที่สำหรับจัดเก็บสินค้าพร้อมเก็บข้อมูลใหม่เกี่ยวกับระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการหยิบสินค้าจากประตูไปถึงชั้นวาง โดยกำหนดประตูเข้า-ออกเป็นประตูเดียวกันจำนวน 1 ประตู แล้วทำการเปรียบเทียบระยะทาง และเวลาที่ใช้ก่อน และหลังทำการปรับปรุง ดังตัวอย่างในรูปที่ 1

A&B1				A&B2				A&B3				A&B4				A&B5			
AA001	AA002	AA003	AA004	AA005	AA006	AA007	AA008	AA009	AA010	AA011	AA012	AA013	AA014	AA015	AA016	AA017	AA018	AA019	AA020
AA021	AA022	AA023	AA024	AA025	AA026	AA027	AA028	AA029	AA030	AA031	AA032	AA033	AA034	AA035	AA036	AA037	AA038	AA039	AA040
AA041	AA042	AA043	AA044	AA045	AA046	AA047	AA048	AA049	AA050	AA051	AA052	AA053	AA054	AA055	AA056	AA057	AA058	AA059	AA060
AA061	AA062	AA063	AA064	AA065	AA066	AA067	AA068	AA069	AA070	AA071	AA072	AA073	AA074	AA075	AA076	AA077	AA078	AA079	AA080
AA081	AA082	AA083	AA084	AA085	AA086	AA087	AA088	AA089	AA090	AA091	AA092	AA093	AA094	AA095	AA096	AA097	AA098	AA099	AA100
AA101	AA102	AA103	AA104	AA105	AA106	AA107	AA108	AA109	AA110	AA111	AA112	AA113	AA114	AA115	AA116	AA117	AA118	AA119	AA120

รูปที่ 1 ตัวอย่างชั้นวางสินค้า

2.4. นำข้อมูลสินค้าในกลุ่ม A ที่ได้จากการแบ่งกลุ่มสินค้าด้วยวิธี ABC Analysis มาทำการพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า

ด้วยวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 แบบ และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์ปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้า โดยวิธีการพยากรณ์แต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

1. การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) เป็นวิธีการพยากรณ์โดยใช้ข้อมูลทางสถิติย้อนหลัง (Time-Series Model) รูปแบบหนึ่ง โดยคำนวณตัวเลขพยากรณ์ จากค่าเฉลี่ยของสถิติย้อนหลังจำนวน n เดือน ดังสมการที่ (1):

$$\text{Moving Average} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (1)$$

โดยที่ V = ยอดขายย้อนหลัง

n = จำนวนเดือนที่ใช้การพยากรณ์

2. การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted moving average) หากข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์มีลักษณะแนวโน้มก็อาจจะใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเข้าช่วยเพื่อเป็นการให้น้ำหนักความสำคัญกับข้อมูลล่าสุด เพื่อให้สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงล่าสุด ดังสมการที่ (2):

$$\text{Moving Average} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times V_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

โดยที่ V = ยอดขายย้อนหลัง

W = ค่าถ่วงน้ำหนัก

n = จำนวนเดือนที่ใช้การพยากรณ์

3. การพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing) เป็นการพยากรณ์โดยใช้สถิติย้อนหลังเพียงเดือนเดียว ร่วมกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อถ่วงน้ำหนัก กับความคลาดเคลื่อนในเดือนที่ผ่านมา ดังสมการที่ (3):

$$F_t = F_{t-1} + \alpha (A_{t-1} - F_{t-1}) \quad (3)$$

โดยที่ F_t = ค่าพยากรณ์ของเดือนปัจจุบัน

F_{t-1} = ค่าพยากรณ์ของเดือนที่ผ่านมา

A_{t-1} = ค่าจริงของเดือนที่ผ่านมา

α = ค่าคงที่ ที่ถูกกำหนดเป็นตัวแปรถ่วง

น้ำหนัก มีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1

โดยใช้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error, MSE) ในการเปรียบเทียบค่าที่พยากรณ์ได้ในแต่ละแบบ ดังสมการที่ (4):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [e_{i(1)}]^2 \quad (4)$$

3. ผลการดำเนินการ

หลังจากเสร็จสิ้นการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการปฏิบัติงาน และดำเนินการในคลังสินค้ากรณีศึกษาแล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นแต่ละประเด็นดังนี้

3.1.การแบ่งประเภทสินค้าที่ทำการจัดเก็บ ด้วยเทคนิคการ

วิเคราะห์แบบ ABC Analysis

โดยใช้มูลค่าการสั่งซื้อสินค้า ตั้งแต่ 1 ต.ค. 63–31 มี.ค. 64 เป็นเกณฑ์ โดยจะเรียงลำดับ จากสินค้าที่มีมูลค่าการสั่งซื้อมากไปน้อยเพื่อจัดกลุ่มสินค้าให้เป็น กลุ่ม A, B และ C ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การจัดกลุ่ม ABC มูลค่าการสั่งซื้อสินค้า

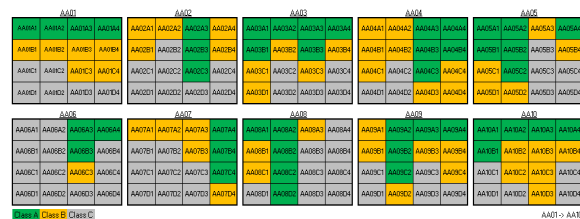
กลุ่มสินค้า	มูลค่าการสั่งซื้อรวม (บาท)	เปอร์เซ็นต์	จำนวนรายการสินค้า
A	26,498,403.53	80%	45
B	4,990,084.81	15%	50
C	1,679,251.92	5%	65

ซึ่งสามารถจำแนกกลุ่มของสินค้าได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม A จำนวน 45 รายการ คิดเป็น 80% ของรายการสินค้าคงคลัง มูลค่าการสั่งซื้อ 26,498,403.53 บาท กลุ่ม B จำนวน 50 รายการ คิดเป็น 15% มูลค่าการสั่งซื้อ 4,990,084.81 บาท และกลุ่ม C จำนวน 65 รายการ คิดเป็น 5% มูลค่าการสั่งซื้อ 1,679,251.92 บาท

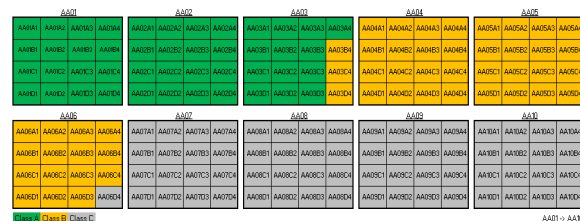
เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการแบ่งกลุ่มสินค้า โดยใช้ทฤษฎี ABC Analysis เปรียบเทียบกับพื้นที่สำหรับจัดเก็บสินค้าแล้วจะเห็นได้ว่าในปัจจุบันคลังสินค้ากรณีศึกษา

การจัดเก็บสินค้าที่กระจัดกระจาย ทำให้ต้องใช้ระยะทางและเวลาที่มากขึ้นในการหยิบสินค้าจากชั้นวาง ดังรูปที่ 2

ใช้ทฤษฎี ABC Analysis ในการจัดกลุ่มสินค้าตามมูลค่าการสั่งซื้อ เพื่อปรับปรุงพื้นที่ในการจัดเก็บสินค้าที่เหมาะสม โดยกำหนดให้สินค้าที่อยู่ในกลุ่มที่มีมูลค่าในการสั่งซื้อสูงอย่างกลุ่ม A อยู่ใกล้ประตูทางเข้าออกให้มากที่สุดเพื่อให้ใช้ระยะเวลา และระยะทางในการหยิบสินค้าจากชั้นวางสั้นที่สุด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การจัดเก็บสินค้าบนชั้นวางในปัจจุบัน



รูปที่ 3 การจัดเก็บสินค้าบนชั้นวางหลังปรับปรุง

3.2.การเปรียบเทียบระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้า

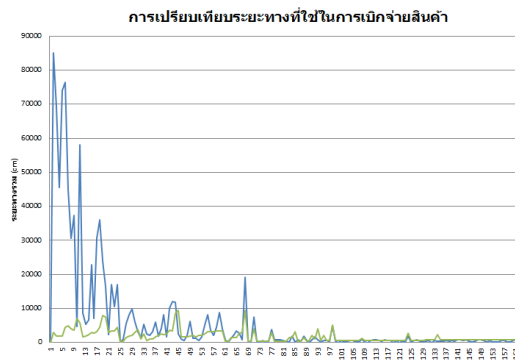
จากการศึกษาแผนผังของคลังสินค้ากรณีศึกษา จะพบว่าพื้นที่สำหรับจัดเก็บสินค้าจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยที่ชั้นล่างจะมีแถวของชั้นวางสินค้าเริ่มต้นตั้งแต่แถว AA ไปจนถึง AH และชั้นบนเริ่มตั้งแต่แถว BA ไปจนถึง BH ในแต่ละแถวจะประกอบไปด้วยชั้นวางจำนวน 10 ล็อก ในแต่ละล็อกจะสามารถวางสินค้าได้ทั้งหมด 4 ระดับ และในแต่ละระดับสามารถวางสินค้าได้ 4 รายการ (SKU) ดังนั้นในชั้นวางแต่ละแถวจะสามารถจัดเก็บสินค้าได้ทั้งสิ้น $10 \times 4 \times 4 = 160$ รายการ โดยในการศึกษารั้วนี้ผู้วิจัยจะทำการศึกษาลินค้าที่ถูกจัดเก็บที่แถว AA ไปจนถึงแถว AH เวลาที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้าจะทำการบันทึกในหน่วยนาที และระยะทางที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้าจากชั้นวางไปถึงประตู บันทึกในหน่วยเซนติเมตร โดยสามารถเปรียบเทียบระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเบิกจ่าย

สินค้าแต่ละรายการก่อน และหลังทำการปรับปรุงได้ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบระยะทาง

การเปรียบเทียบระยะทาง (เซนติเมตร)		
ก่อน-ปรับปรุง	หลัง-ปรับปรุง	ระยะทางที่ลดลง
984,960.00	288,652.50	696,307.50
ระยะทางที่ลดลง (%)		70.69

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าหลังดำเนินการปรับปรุงพื้นที่วางสินค้าโดยใช้ทฤษฎี ABC Analysis แล้วระยะทางรวมที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้าลดลงจากเดิม 696,307.5 เซนติเมตร (6.96 กิโลเมตร) หรือ คิดเป็น 70.69% แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบระยะทางที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้า

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระยะเวลา

การเปรียบเทียบระยะเวลา (นาทื)		
ก่อน-ปรับปรุง	หลัง-ปรับปรุง	ระยะเวลาที่ลดลง
14,101.39	4,798.49	9,302.90
ระยะเวลาที่ลดลง (%)		65.97

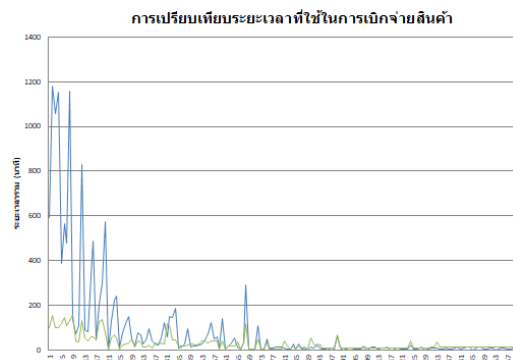
ตารางที่ 5 การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

ยอดขาย (บาท)			ค่าพยากรณ์			ค่าผิดพลาดกำลังสอง (MSE)		
ปี	เดือน	ยอดขาย	2	3	4	2	3	4
2563	ต.ค.	541						
	พ.ย.	297						
	ธ.ค.	556	419.00			18,769.00		
2564	ม.ค.	608	426.50	464.67		32,942.25	20,544.44	

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าหลังดำเนินการปรับปรุงพื้นที่วางสินค้าโดยใช้ทฤษฎี ABC Analysis แล้วระยะเวลารวมที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้าลดลงจากเดิม 9,302.90 นาที (6.46 วัน) หรือ คิดเป็น 65.97% หรือแสดงดังรูปที่ 5

3.3.การพยากรณ์ความต้องการสินค้า เมื่อได้ข้อมูลจากการจำแนกสินค้าคงคลังในคลังสินค้ากรณีศึกษาแล้ว

ผู้วิจัยจะเลือกข้อมูลรายการสินค้าในกลุ่ม A จำนวน 45 รายการ มาทำการวิเคราะห์การพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า ด้วยเทคนิคการพยากรณ์ 3 รูปแบบ และจะเลือกเทคนิคการพยากรณ์ที่ให้ค่า MSE ดีที่สุดสำหรับสินค้าแต่ละรายการโดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ 1 ต.ค. 63–31 มี.ค. 64



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้า

1. การพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า ด้วยเทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) ดังตัวอย่าง สมการที่ (1) ให้ค่าพยากรณ์ และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (ต่อ)

ยอดขาย (บาท)			ค่าพยากรณ์			ค่าผิดพลาดกำลังสอง (MSE)		
ปี	เดือน	ยอดขาย	2	3	4	2	3	4
	ก.พ.	877	582.00	487.00	500.50	87,025.00	152,100.00	141,752.25
	มี.ค.	150	742.50	680.33	584.50	351,056.25	281,253.44	188,790.25
			513.50	545.00	547.75			
ผลรวม						489,792.50	453,897.89	330,542.50
ค่าเฉลี่ย						122,448.13	151,299.30	165,271.25

จากตารางที่ 5 การพยากรณ์ความต้องการสินค้าแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ จะให้การพยากรณ์ที่ดีที่สุด ที่ย้อนหลัง 2 เดือน เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) เป็น 122,448.13 ซึ่งต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับค่าอื่นๆ

2. การพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า ด้วยเทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted moving average) ดังตัวอย่าง สมการที่ (2) ให้ค่าพยากรณ์ และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก

ยอดขาย (บาท)			ค่าพยากรณ์			ค่าผิดพลาดกำลังสอง (MSE)		
ปี	เดือน	ยอดขาย	2	3	4	2	3	4
2563	ต.ค.	541						
	พ.ย.	297						
	ธ.ค.	556	378.33			31,565.44		
2564	ม.ค.	608	469.67	467.17		19,136.11	19,834.03	
	ก.พ.	877	590.67	538.83	523.50	81,986.78	114,356.69	124,962.25
	มี.ค.	150	787.33	733.83	674.10	406,193.78	340,861.36	274,680.81
ผลรวม						538,882.11	475,052.08	399,643.06
ค่าเฉลี่ย						134,720.53	158,350.69	199,821.53

จากตารางที่ 6 การพยากรณ์ความต้องการของสินค้าแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก จะให้การพยากรณ์ที่ดีที่สุด ที่ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ย้อนหลัง 2 เดือน เนื่องจากมีค่า MSE เป็น 134,720.5 ซึ่งต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับค่าอื่นๆ

3. การพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า ด้วยเทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังตัวอย่าง สมการที่ (3) ให้ค่าพยากรณ์ และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล

ยอดขาย (บาท)			ค่าพยากรณ์	Error	Error ²	α	1 - α
ปี	เดือน	ยอดขาย				0.00	1.00
2563	ต.ค.	541					
	พ.ย.	297	541.00	244.00	59,536.00		
	ธ.ค.	556	541.00	15.00	225.00		
2564	ม.ค.	608	541.00	67.00	4,489.00		
	ก.พ.	877	541.00	336.00	112,896.00		
	มี.ค.	150	541.00	391.00	152,881.00		
				210.60	66,005.40		
ผลรวม				MAD	MSE		

จากตารางที่ 7 การพยากรณ์ความต้องการของสินค้าแบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลจะมีค่า MSE เป็น 66,005.40 โดยที่มีค่า Alpha ค่าที่สุดเป็น 0.00

ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) สำหรับวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error, MSE)

รายการสินค้า	การพยากรณ์	ย้อนหลัง (เดือน)	MSE
S00340500 : ข้อต่อสแตนเลสสตีลสามทางขนาด 0.50"	ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่	2	122,448.13
	ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก	2	134,720.53
	ปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล	-	66,005.40

จากตารางที่ 8 พบว่าวิธีการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลเป็นวิธีที่เหมาะสมในการพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error, MSE) ค่าที่สุดเมื่อเทียบกับค่า MSE ของการพยากรณ์อีก 2 วิธี นั่นคือ

1. การพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing) เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า โดยสามารถพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้าได้ประมาณ 66.67% ของรายการสินค้าของรายการสินค้าในกลุ่ม A

2. การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) เป็นวิธีการพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้าที่ตรงลงมา โดยสามารถพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้าได้ประมาณ 28.89% ของรายการสินค้าในกลุ่ม A

3. การพยากรณ์แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted moving average) เป็นวิธีการพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้าได้ถูกต้องน้อยที่สุด โดยสามารถพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้าได้ประมาณ 4.44% ของจำนวนรายการสินค้าในกลุ่ม A

โดยใช้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ในการเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมและใช้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute

Percentage Error, MAPE) ในการแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยใช้การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง และค่า

พยากรณ์ของข้อมูลระหว่างวันที่ 1 ต.ค. 63–31 มี.ค. 64 ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing) มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ หรือความแม่นยำในการพยากรณ์เท่ากับ 23.64% ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลของสินค้าในกลุ่ม A

ยอดขาย (บาท)		ค่าจริง	ค่าพยากรณ์	MAPE
ปี	เดือน			
2563	พ.ย.	5,583.00	6,199.14	15.29
	ธ.ค.	7,247.00	6,084.39	14.65
2564	ม.ค.	10,397.00	6,191.10	28.35
	ก.พ.	5,440.00	6,359.27	32.35
	มี.ค.	4,620.00	6,181.31	27.54
MAPE				23.64

4. สรุป

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า ของคลังสินค้ากรณีศึกษา โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎี ABC Analysis ในการแบ่งกลุ่มสินค้าตามมูลค่าการสั่งซื้อสินค้า เพื่อหาพื้นที่ในการจัดเก็บสินค้าที่เหมาะสมโดยกำหนดให้สินค้าที่อยู่ในกลุ่มที่มีมูลค่าการสั่งซื้อมากอยู่ใกล้ประตูทางเข้าออกมากที่สุด เพื่อให้ใช้ระยะเวลาและระยะทางในการเบิกจ่ายสินค้าจากชั้นวางสินค้าที่สุด แล้วทำการเปรียบเทียบระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้า พบว่าเมื่อดำเนินการปรับปรุงพื้นที่วางสินค้าโดยใช้ทฤษฎี ABC Analysis แล้วระยะทางที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้าโดยรวมจะลดลงจากเดิม 696,307.5 เซนติเมตร (6.96 กิโลเมตร) หรือคิดเป็น 70.69% และระยะเวลาที่ใช้ในการเบิกจ่ายสินค้าโดยรวมจะลดลงจากเดิม 9,302.90 นาที (6.46 วัน) หรือคิดเป็น 65.97% ทำให้สามารถลดระยะเวลารอคอยสินค้าของลูกค้าลงไปได้ ธุรกิจหรือกิจการได้รับประโยชน์จากความพึงพอใจของลูกค้าที่เพิ่มมากขึ้น พนักงาน และเจ้าหน้าที่ในคลังสินค้าสามารถใช้เวลาที่มี

เพิ่มมากขึ้นในการเรียนรู้หรือพัฒนาทักษะอื่นๆ และเมื่อทำการพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้าด้วยวิธีการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Moving Average) และวิธีการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing) พบว่าวิธีการพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing) นั้นมีค่า Alpha=0 ซึ่งหมายความว่ายอดขายจริงก่อนหน้านี้จะไม่ส่งผลต่อการทำนายค่าใด ๆ และ ค่าทำนายจะเป็นค่าคงที่ตลอดเวลา ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับยอดขายจริงของคลังสินค้ากรณีศึกษาในบางเดือน แต่วิธีดังกล่าวก็เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการพยากรณ์ความต้องการสินค้าของลูกค้า โดยมีค่ากำลังการพยากรณ์ 66.67% ที่ 23.64% ค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์ ซึ่งทำให้สามารถนำวิธีการพยากรณ์ที่ได้มาใช้ในการวางแผนการดำเนินงานต่าง ๆ ตั้งแต่ การจัดตั้งงบประมาณ การจัดสรรทรัพยากร การจัดการคลังสินค้า หรือสินค้าคงคลังให้มีความเหมาะสม และเพียงพอต่อความต้องการสินค้าของลูกค้าในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Tanit, *Warehouse & Distribution Management*, Bangkok, Thailand: V-Serve Logistics, 2009.
- [2] A. Kumnai, “Warehouse Management,” 5th ed. Bangkok, Thailand: Focus Media and Publishing, 2016, pp. 33.
- [3] Michael A. Hitt, R. Dennis Middlemist, and Robert L. Mathis, “Effective Management,” MN, USA: West Publishing Company, 1979, pp. 35–36.
- [4] C. Chaiyos, and C. Mayookapan, “Supply Chain and Marketing Channel Management,” Bangkok, Thailand: DKtoday, 2014, pp. 323–344.
- [5] R. Pusadee, “Small Enterprises Administration,” 5th ed. Bangkok, Thailand: Physics center, 2005, pp. 29.
- [6] S. Wiyada Author, “The enhancing efficiency of finished goods warehouse management a case study of silicone paper manufactory,” M.S. Thesis, Faculty of Logistics and Supply Chain Management, Burapha University, Chonburi, Thailand, 2015.
- [7] S. Mathinee, and M. Chumpol, “Efficiency Improvement of Location Assignment of Products in a Warehouse: A Case Study of Srithai Superware Public Company Limited, Suksawad Branch,” M.S. Thesis, Faculty of Logistics Management, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2013.
- [8] O. Thunyathorn, “Forecasting and inventory planning to reduce the problem of delayed shipment: a case study of lens manufacturer,” M.S. Thesis, Faculty of Industrial Development, Thammasat University, Bangkok, Thailand, 2017.
- [9] A. T. James, and D. S. Jerry, “The Warehouse Management Handbook,” 2nd ed. NY, USA: Tompkins press, 1998, ch. 34, pp. 823–848.
- [10] Stock, J.R., and Lambert, D.M., “Warehousing,” in *Strategic Logistics Management*, 4th ed., NY, USA: McGraw-Hill, 2001, ch. 10, sec. 4, pp. 70–89.
- [11] R. Handanhal, and M. B. Ram, “ABC analysis for inventory management Bridging the gap between research and classroom,” *American Journal of Business Education*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 257–264.
- [12] R. Guntalee, “Basic concepts of sales forecasting,” in *Sales Forecasting*, 2nd ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Printing House, 2002, ch. 1, pp. 1, 26–27.
- [13] W. Nittaya, “Opimal fabric inventory management for textile industry,” M.S. Thesis, Faculty of Industrial Engineering and Management, Silpakorn University, Bangkok, Thailand, 2013.
- [14] S. Napasorn, “Inventory management for producing and distributing factory of frozen products,” M.S. Thesis, Faculty of Industrial Development, Thammasat University, Bangkok, Thailand, 2017.
- [15] B. L. Bowerman, R. T. O' Connell and A.B. Koehler, “Exponential Smoothing,” in *Forecasting, Time series, and Regression: An Applied Approach*, 4th ed. IL, USA: Thomson Brooks, 2005, ch. 8, pp. 391–392.

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาการจัดตารางงานพยาบาล

โรงพยาบาลกรณีศึกษาแห่งหนึ่ง

Optimization of Nurse Scheduling Problem: A hospital case study

กัญธารณ์ ทองโสภ¹และ อุดม จันทร์จรัสสุข^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Kantaporn Thongsopa¹ and Udom Janjarassuk^{1,*}

¹Department of Industrial Engineering, School of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Ladkrabang,

Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: udom.ja@kmitl.ac.th

Received: Aug 15, 2021. Revised: Sep 27, 2021 Accepted: Sep 30, 2021

บทคัดย่อ

การจัดตารางงานของพยาบาลเป็นงานที่ต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้จัดตารางงาน ซึ่งมักต้องใช้เวลาในการจัดที่นาน และมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูง อีกทั้งยังได้ตารางที่ขาดความสมดุลของภาระงานระหว่างพยาบาล และไม่สอดคล้องกับความต้องการของโรงพยาบาล ในบทความวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางงานพยาบาล เพื่อแก้ปัญหาการจัดภาระงานที่ไม่สมดุล โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Linear Program) และได้้นำแบบจำลองไปทดลองกับโรงพยาบาลกรณีศึกษา จากการทดลองพบว่าผลจากแบบจำลองสามารถลดความแตกต่างของภาระงานที่มอบหมายให้พยาบาลแต่ละคน จากจำนวน 3 ผลัดเหลือเพียง 1 ผลัด หรือคิดจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 0.790 เป็น 0.444 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า การจัดตารางงานของพยาบาลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถครอบคลุมเงื่อนไขต่างๆ ของโรงพยาบาล ใช้เวลาจัดตารางงานที่น้อยลง และช่วยกระจายภาระงานของพยาบาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดตารางงานพยาบาล, การกระจายงาน, การหาค่าที่เหมาะสม, วิธีแม่นยำ

Abstract

Nurse Scheduling is a complicated task which highly relies on the experience of scheduler. It usually takes a long time to finish the task. The chance of human error is high, resulting in unbalanced workloads among nurses and inconsistency with the requirements of the hospital. Therefore, this research examines the nurse scheduling problems in order to find a way to assign nurses to shifts properly, and to solve the unbalanced workload problem. A mixed-integer linear program was used to experiment with the case study problem in a hospital. The results showed that the difference in workload among nurses can be reduced from three shifts to only one shift with the help of the mathematical model. In terms of the difference in workload measured by the standard deviation, it was reduced from 0.790 to 0.444. In conclusion, the proposed mathematical model is capable of covering all scheduling conditions of the hospital. It also helps distribute the workloads of nurses effectively.

Keywords: Nursing Scheduling Problem, Work Distribution, Optimization, Exact solution

1. บทนำ

อาชีพพยาบาลเป็นวิชาชีพที่ต้องคอยดูแลผู้ป่วยตลอดเวลา ในปัจจุบันพยาบาลส่วนมากมักได้รับมอบหมายงานที่ยาวนานและมากเกินไปที่ระเบียบพยาบาลกำหนด [1] จากรายงาน ในปี 2019 ของสภาการพยาบาลและการผดุงครรภ์ ผลสำรวจพบว่าชั่วโมงการทำงานของพยาบาลเฉลี่ยเกินกว่า 12 ชั่วโมงต่อวัน [2] ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของพยาบาลที่ต่ำลง ทำให้เกิดความเครียด ร่างกายเกิดการเหนื่อยล้า ส่งผลให้ดูแลผู้ป่วยได้ไม่ดีพอ [3] ดังนั้นการกำหนดตารางงานที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การบริการมีประสิทธิภาพ

โรงพยาบาลกรณีศึกษา เป็นโรงพยาบาลประเภททั่วไประดับตติยภูมิ ที่ให้บริการอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ภายในโรงพยาบาลมีหลายหน่วยงาน โดยที่หัวหน้าแต่ละหน่วยงานต้องจัดให้มีพยาบาลเพื่อให้บริการผู้ป่วยตลอดเวลา โดยที่โรงพยาบาลแห่งนี้มีการจัดตารางงานขึ้นเป็นรายเดือน

ปัจจุบันโรงพยาบาลกรณีศึกษา มอบหมายให้หัวหน้าแต่ละแผนกเป็นผู้จัดตารางงาน โดยอาศัยจากประสบการณ์การทำงาน แต่เนื่องด้วย การจัดตารางงานมีความซับซ้อน ด้วยลักษณะงานของพยาบาลและข้อจำกัดต่างๆ ของโรงพยาบาล ทำให้ตารางงานที่จัดโดยหัวหน้าแผนกมีการจัดสรรภาระงานที่ไม่สมดุล ใช้เวลาในการจัดนาน และไม่ปฏิบัติตามระเบียบของโรงพยาบาล ซึ่งโรงพยาบาลกรณีศึกษา ได้ตระหนักถึง ผลเสียที่เกิดขึ้นกับพยาบาล จึงต้องการพัฒนาและปรับปรุงระบบการจัดตารางงานของพยาบาลให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ในบทความนี้จึงมุ่งเน้นการนำเสนอแนวความคิดที่เกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดตารางงานพยาบาลภายใต้เงื่อนไขของโรงพยาบาลกรณีศึกษา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยกระจายภาระงานให้พยาบาลแต่ละคนได้ปฏิบัติงานอย่างเท่าเทียมกัน ลดระยะเวลาในการจัดตารางงาน และจัดตารางงานให้

เป็นไปตามระเบียบ เพื่อตอบสนองความต้องการของโรงพยาบาล

เนื้อหาส่วนที่เหลือของบทความประกอบด้วย ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดตารางงานของพยาบาล ลักษณะการทำงานและปัญหาการจัดตารางงานของโรงพยาบาลกรณีศึกษา การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง และสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการจัดตารางเวลาของเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์มีความซับซ้อน ผู้จัดตารางงานต้องพิจารณาเงื่อนไขหลายอย่าง อาทิเช่น จำนวนบุคลากร กฎหมายของประเทศ และนโยบายของโรงพยาบาล [4] จากการศึกษางานวิจัยเรื่องการจัดตารางงานของพยาบาล พบว่าโรงพยาบาลจำเป็นต้องมีการจัดตารางงานที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากการให้พยาบาลทำงานมากเกินไปจะมีผลกระทบต่อสุขภาพของพยาบาล [5] โดยทั่วไป การจัดตารางงานโดยหัวหน้าพยาบาลผู้มีประสบการณ์มักต้องใช้เวลาและไม่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขของโรงพยาบาล [6] ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของพยาบาลลดลง และอาจทำให้โรงพยาบาลขาดประสิทธิภาพในการให้บริการผู้ป่วย การจัดตารางงานให้พยาบาลอย่างเหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของการให้บริการดูแลผู้ป่วย [7]

ปัญหาการจัดตารางงานของพยาบาลในประเทศไทยและต่างประเทศจะมีลักษณะคล้ายกันเนื่องจากกฎระเบียบเงื่อนไขหรือวิธีการปฏิบัติงานของพยาบาลเป็นแบบมาตรฐานสากล แต่ปัญหาอาจจะแตกต่างกันตามแนวคิดหรือวัตถุประสงค์ของการจัดตาราง เช่น ต้องการจัดตารางงานให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด[4],[8],[9] ต้องการให้เกิดความเท่าเทียมกันในการปฏิบัติงาน ต้องการสร้างความพอใจให้กับพยาบาล[10–12] ต้องการให้มีจำนวนพยาบาลในแต่ละช่วงเวลาปฏิบัติงานน้อยที่สุด [13] หรือต้องการตอบสนองการให้บริการผู้ป่วยสูงสุด[14]

การแก้ปัญหาคำถามการจัดตารางงานของพยาบาลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแม่นยำ (Exact method) และวิธีฮิวริสติก (Heuristic Method) ซึ่งต้องอาศัยซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [3] การหาคำตอบของแบบจำลองด้วยวิธีแม่นยำ มักถูกนำไปใช้แก้ปัญหาที่ไม่ใหญ่มากเนื่องจากต้องใช้เวลาในการหาคำตอบนาน ซึ่งวิธีแม่นยำตรงจะให้คำตอบเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) [15] ส่วนการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก มักถูกนำไปใช้แก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากวิธีนี้จะให้คำตอบใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด (Near Optimal Solution) แต่จะใช้เวลาสั้นกว่าวิธีการแบบแม่นยำสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ [16]

จากการศึกษาปัญหาของโรงพยาบาลกรณีศึกษา ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้วิธีแม่นยำในการหาคำตอบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหการจัดตารางงานพยาบาลภายใต้ข้อจำกัดของโรงพยาบาล และให้เกิดความเท่าเทียมในการปฏิบัติงานของพยาบาล

3. ปัญหาการจัดตารางงานของโรงพยาบาลกรณีศึกษา

จากที่ได้เข้าไปศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลการจัดตารางงานพยาบาลของโรงพยาบาลกรณีศึกษา สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1. ลักษณะการทำงาน

การเข้างานของพยาบาล จะมี 3 ผลัดต่อวัน โดยผลัดแรกของวันจะเป็นผลัดดึก มีเวลาปฏิบัติงานตั้งแต่ 24:00 น. ถึง 8:00 น. ผลัดที่ 2 เป็นผลัดเช้าปฏิบัติงานตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 16:00 น. และผลัดสุดท้ายของวันเป็นผลัดบ่ายปฏิบัติงานตั้งแต่เวลา 16:00 น. ถึง 24:00 น. โดยผลัดการทำงานจะมี 2 แบบ คือผลัดปกติ และ ผลัดล่วงเวลา โดยผลัดล่วงเวลาคือผลัดที่พยาบาลทำงานเกินกว่าภาระงานขั้นต่ำที่ โรงพยาบาลกำหนด ซึ่งจะได้คำตอบแทนที่มากกว่าผลัดปกติ ในกรณีที่พยาบาลมีการเข้าอบรมหรือลาพักร้อน โรงพยาบาลจะนับเข้าผลัดปกติ และเพิ่มจำนวนคนเข้าผลัดทำงานให้เพียงพอ เช่น ผลัดเช้าต้องการพยาบาล 3 คน แต่มีพยาบาลไปอบรมหรือลาพักร้อน 1 คน

หมายความว่าโรงพยาบาลจะต้องจัดให้มีพยาบาลเข้าผลัดเช้า 4 คน

3.2. ปัญหาการจัดตารางงาน

การจัดตารางทำงานของพยาบาลของโรงพยาบาลกรณีศึกษายังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ปัญหาที่พบมี 3 ประการ คือ 1. ปัญหาการจัดตารางงาน แล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของโรงพยาบาล จากการศึกษาค้นคว้าแผนกจะเป็นผู้จัดตารางงาน หลังจากจัดตารางงานเสร็จเรียบร้อยแล้วต้องนำไปส่งให้ผู้ช่วยพยาบาล และหัวหน้าพยาบาลตรวจทานอีกครั้ง ซึ่งมักพบความผิดพลาดของการจัดตารางที่ไม่เป็นไปตามระเบียบของโรงพยาบาล 2. ปัญหาของการกระจายงานที่ไม่สมดุล พยาบาลได้รับมอบหมายงานไม่เท่าเทียมกัน เช่น มีจำนวนผลัดล่วงเวลาที่ต่างกันมาก ซึ่งจะส่งผลให้คำตอบแทนที่ได้ไม่เท่ากัน 3. ปัญหาการจัดตารางงานที่ใช้เวลานาน ใช้เวลาในการจัดตารางงาน 4-5 วัน จึงทำให้การจัดตารางงานของพยาบาลเป็นไปอย่างล่าช้า

ตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างของตารางงานพยาบาล แผนกหอผู้ป่วยหญิง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2562 ของโรงพยาบาล

กรณีศึกษา (โดยแสดงข้อมูลเฉพาะสัปดาห์แรกเพื่อประกอบการอธิบาย) และแสดงสรุปผลรวมจำนวนผลัดทั้งเดือนที่โรงพยาบาลใช้ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2562 ซึ่งแผนกมีจำนวนพยาบาลทั้งหมด 10 คน โดยโรงพยาบาลต้องการให้จำนวนการมอบหมายผลัดรวมใกล้เคียงกับจำนวนผลัดเฉลี่ย เช่น เดือนพฤษภาคม มีวันทำการ 20 วัน นำไปหารด้วย 3 (ซึ่งเป็นจำนวนผลัดต่อวัน) ได้จำนวนผลัดเฉลี่ยเท่ากับ 6.6 ดังนั้น

ในเดือนพฤษภาคม พยาบาลแต่ละคนควรได้ 6 หรือ 7 ผลัดสำหรับแต่ละช่วงเวลาของผลัดการทำงาน แต่จากตารางจะเห็นได้ว่า การกระจายภาระงานยังทำได้ไม่ดีพอ และไม่สอดคล้องกับความต้องการของโรงพยาบาล ตัวอย่างเช่น พยาบาลคนที่ 3 มีจำนวนผลัดเข้ารวม 9 ผลัด แต่พยาบาลคนที่ 4 มีจำนวนผลัดเข้ารวม 6 ผลัด ซึ่งต่างกันถึง 3 ผลัด

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของตารางงานพยาบาล แผนกหอผู้ป่วยหญิง เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2562 ของโรงพยาบาลกรณีศึกษา

วันที่	1			2			3			4			5			6			7			...	รวมจำนวนผลัด			
คนที่	ค	ช	บ	ค	ช	บ	ค	ช	บ	ค	ช	บ	ค	ช	บ	ค	ช	บ	ค	ช	บ		ค	บ	ช	OT
/ผลัด	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)					(0)
1								ช0	บ		ช		ค			ค				ช			8	5	7	13
2		ช		ค		บ0										ช0			ค		บ0		6	7	7	13
3	ค		บ0		ช		ค		บ0		ช0		ค										5	6	9	13
4		ช0		ค			ค							ช0	บ		ช0	บ		ช0	บ	...	7	7	6	14
5		ช								ค0		บ		ช		ค		บ0		ช			7	7	6	13
6		ช		ช0		บ		ช		ค0		บ		ช						ช0			6	6	8	13
7	ค				ค			ช0	บ	ช0				ช0	บ		ช0	บ		ช			7	7	6	14
8	ค0		บ	ช			ค						ค		บ0		ช		ค0		บ		7	7	6	12
9		ช0	บ	ช0		บ		ช		ช0		บ				ค			ค				7	7	6	11
10		อ			อ			อ		ค												...	6	6	8	11

ค = ผลัดคึก, ช = ผลัดเช้า, บ = ผลัดบ่าย, 0 = ผลัดล่วงเวลา, อ = อบรม, V = ลาพักร้อน

3.3.เงื่อนไขของการจัดตารางงาน

เงื่อนไขและข้อกำหนดต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการพิจารณาเพื่อจัดตารางงานของพยาบาลของโรงพยาบาลกรณีศึกษา แบ่งออกได้เป็นเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

1. จำนวนพยาบาลในแต่ละผลัด จะต้องเท่ากับ จำนวนพยาบาลที่โรงพยาบาลกำหนด
2. จำนวนวันทำงานทั้งหมดของพยาบาล จะต้องเท่ากับ จำนวนวันทำการในแต่ละเดือน (จำนวนวันทำการ คือ จำนวนวันของเดือน โดยที่ไม่นับวันหยุดนักขัตฤกษ์)
3. จำนวนผลัดที่มากที่สุดที่พยาบาลทำงานได้ใน 1 วันคือ 2 ผลัด
4. ไม่สามารถมีผลัดปกติ 2 ผลัด ใน 1 วัน ดังนั้นผลัดใดผลัดหนึ่งจะถูกคิดเป็นผลัดการทำงานล่วงเวลา และผลัดที่เกินมาจากจำนวนวันทำการแต่ละเดือนจะนำไปคิดเป็นผลัดล่วงเวลา
5. ห้ามให้พยาบาลทำงานผลัดคึกติดกับผลัดเช้าของวันเดียวกัน (เนื่องจากผลัดคึกเป็นผลัดแรกของวัน)
6. ห้ามให้พยาบาลทำงานผลัดบ่ายติดกับผลัดคึกของวันถัดไป
7. ห้ามพยาบาลลาหยุดงานติดต่อกันเกิน 7 วัน

8. ห้ามให้พยาบาลทำงานในผลัดคึกติดต่อกันเกิน 3 วัน
9. ต้องการให้จำนวนผลัดเช้า ผลัดบ่าย ผลัดคึก และผลัดการทำงานล่วงเวลาของพยาบาลแต่ละคนมีจำนวนใกล้เคียงกัน
10. หากพยาบาลมีอบรมหรือลาพักร้อน จะถูกพิจารณาเป็นผลัดการทำงานปกติ (ผลัดเช้า) ซึ่งจะไม่ถูกนำมาคิดเป็นผลัดการทำงานล่วงเวลา (การอบรมหรือลาพักร้อน จะนับว่าพยาบาลมาทำงาน แต่การจัดตารางงานจะต้องจัดให้มีพยาบาลคนอื่นเข้าไปทำงานแทน)
11. ในวันเสาร์-อาทิตย์ จะต้องมีการกระจายผลัดให้พยาบาลแต่ละคนที่สมดุลกัน
12. ห้ามพยาบาลที่เพิ่งเข้าทำงานใหม่ขึ้นผลัดการทำงานร่วมกัน

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดในการแก้ไขปัญหการจัดตารางงานของพยาบาล โดยการลดความต่างสูงสุดของจำนวนผลัดที่ได้รับมอบหมายของพยาบาลทั้งแบบปกติ และแบบล่วงเวลา โดยพยายามทำให้ผลรวมของผลต่างจากค่าเฉลี่ยให้มีค่าน้อยที่สุด นั่นคือทำให้ผลต่างของจำนวนผลัดที่ได้รับมอบหมาย

และจำนวนผลัดการทำงานเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด เพื่อให้เกิดความยุติธรรมในการมอบหมายงาน โดยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแนวความคิดที่นำเสนอ เพื่อแก้ไขปัญหาการจัดตารางงานภายใต้ข้อจำกัดของโรงพยาบาลกรณีศึกษา

4.1.สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์

เซต (Set)

N คือ เซตของพยาบาลของแผนก

S คือ เซตของผลัดการทำงานของวัน $S = \{1, 2, 3\}$ โดยที่ ผลัดที่ 1 คือผลัดดึก ผลัดที่ 2 คือผลัดเช้า และผลัดที่ 3 คือผลัดบ่าย

ดัชนี (Index)

i, h คือ ดัชนีของพยาบาล โดยที่ $i, h \in N$

j คือ ดัชนีของผลัดการทำงาน โดยที่ $j \in S$

l, k คือ ดัชนีของวันในแต่ละเดือน โดยที่ $l, k = 1, 2, \dots, D$
เมื่อ D คือ จำนวนวันของเดือนนั้น

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

$x_{ijk} = \begin{cases} 1; \text{ พยาบาล } i \text{ ทำงานผลัด } j \text{ วันที่ } k \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

$v_{ijk} = \begin{cases} 1; \text{ พยาบาล } i \text{ ทำงานผลัด (ปกติ) } j \text{ วันที่ } k \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

$Z_{ijk} = \begin{cases} 1; \text{ พยาบาล } i \text{ ทำงานผลัด (ล่วงเวลา) } j \text{ วันที่ } k \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

$d_{ijk} = \begin{cases} 1; \text{ พยาบาล } i \text{ ทำงาน ในวันที่ } k \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

คือ ผลต่างจากจำนวนผลัดค่าเฉลี่ย (ปกติ) ของผลัดที่ j ของพยาบาล i โดยที่ $a_{ij} \geq 0$

คือ ผลต่างจากจำนวนผลัดค่าเฉลี่ย (ล่วงเวลา) ของพยาบาล i โดยที่ $b_i \geq 0$

r_i คือ จำนวนวันที่พยาบาล i มาทำงานใน 1 เดือน

คือ จำนวนผลัดการทำงานของพยาบาล i ทั้งหมดใน 1 เดือน

u_{ik} คือ จำนวนผลัดการทำงานของพยาบาล i ในวันที่ k
คือ จำนวนพยาบาลทั้งหมด ที่ลาพักร้อน/อบรมวันที่ k

t_i คือ จำนวนผลัดการทำงานล่วงเวลาทั้งหมดของพยาบาล i ใน 1 เดือน

พารามิเตอร์ (parameter)

$P_{jk} = \begin{cases} 1; \text{ พยาบาล } i \text{ ลาหยุดในวันที่ } k \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

$\eta_{ik} = \begin{cases} 1; \text{ พยาบาล } i \text{ อบรม, ลาพักร้อนในวันที่ } k \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

$e_k = \begin{cases} 1; \text{ วันที่ } k \text{ ตรงกับวันเสาร์หรืออาทิตย์} \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

$\theta_i = \begin{cases} 1; \text{ พยาบาล } i \text{ เป็นพยาบาลเข้าทำงานใหม่} \\ 0; \text{ กรณีอื่น} \end{cases}$

D คือ จำนวนวันในแต่ละเดือนเช่นเดือนมีนาคมเท่ากับ 31 วัน

δ คือ จำนวนผลัดการทำงาน (ปกติ) เฉลี่ยทั้งหมด ในแต่ละเดือน

β คือ จำนวนผลัดการทำงาน (ล่วงเวลา) เฉลี่ยทั้งหมดในแต่ละเดือน

w คือ จำนวนวันทำการของพยาบาล

α คือ จำนวนผลัดขั้นต่ำของพยาบาล ที่ต้องปฏิบัติงานในวันเสาร์หรืออาทิตย์ของเดือนนั้นๆ

A_{jk} คือ จำนวนพยาบาลที่ทางโรงพยาบาลกำหนดในแต่ละผลัด

4.2.สมการวัตถุประสงค์ (Objective Functions)

วัตถุประสงค์ของการจัดตารางงานพยาบาล ประกอบด้วย การให้มอบหมายงานในผลัดปกติ และ ผลัดล่วงเวลาให้มีความเท่าเทียมกัน นั่นคือ มีผลรวมของจำนวนผลัดที่ต่างจากค่าเฉลี่ยที่ควรจะเป็นทั้งในผลัดแบบปกติและผลัดแบบล่วงเวลาที่น้อยที่สุด โดยที่สมการวัตถุประสงค์คือ สมการที่ (1)

$$\text{Minimize } \sum_{i \in N} \sum_{j \in S} a_{ij} + \sum_{i \in N} b_i \quad (1)$$

4.3.เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

เงื่อนไขที่ (2) และ (3) มาจากสมการที่ (4) แยกเป็น 2 เงื่อนไข โดยใช้ค่าสมบูรณ์-เงื่อนไข (Absolute Value in Constraint) เพื่อให้สมการทั้ง 2 เงื่อนไขใช้เป็นการหาค่าผลต่างจากจำนวนผลัดปกติเฉลี่ย

$$\sum_{k=1}^D x_{ijk} - \delta \leq a_{ij} \quad ; \forall i \in N, \forall j \in S \quad (2)$$

$$\delta - \sum_{k=1}^D x_{ijk} \leq a_{ij} \quad ; \forall i \in N, \forall j \in S \quad (3)$$

$$|\sum_{k=1}^D x_{ijk} - \delta| \leq a_{ij} \quad (4)$$

เงื่อนไขที่ (5) และ (6) มาจากสมการที่ (7) แยกเป็น 2 เงื่อนไข โดยใช้ค่าสมบูรณ์-เงื่อนไข โดยทั้ง 2 เงื่อนไขใช้ในการหาค่าผลต่างจากจำนวนผลัดล่วงหน้าเฉลี่ย

$$t_i - \beta \leq b_i \quad ; \forall i \in N \quad (5)$$

$$\beta - t_i \leq b_i \quad ; \forall i \in N \quad (6)$$

$$|t_i - \beta| \leq b_i \quad (7)$$

เงื่อนไขที่ (8)–(13) เป็นเงื่อนไขเพื่อให้ตอบสนองความต้องการของโรงพยาบาล เงื่อนไขที่ (8) เป็นเงื่อนไขที่ทำให้จำนวนพยาบาลที่ทำงานในผลัดคึกมีเพียงพอต่อความต้องการของโรงพยาบาล เงื่อนไขที่ (9) เป็นเงื่อนไขทำให้มีจำนวนพยาบาลที่ทำงานในผลัดเช้าเพียงพอต่อความต้องการของโรงพยาบาล หลังจากหักพยาบาลที่เข้าอบรมหรือลาพักรื้อนออกแล้ว เนื่องจากพยาบาลที่เข้าอบรมหรือลาพักรื้อนจะถูกนับรวมในผลัดเช้าแบบปกติ เงื่อนไขที่ (10) เป็นเงื่อนไขทำให้มีจำนวนพยาบาลที่ทำงานในผลัดบ่ายเพียงพอต่อความต้องการของโรงพยาบาล เงื่อนไขที่ (13) บังคับให้พยาบาลมีจำนวนวันทำงานต้องไม่น้อยกว่าจำนวนวันทำการ เงื่อนไขที่ (12) บังคับให้จำนวนวันทำงานของแต่ละคนต่างกันได้ไม่เกิน 1 วัน เงื่อนไขที่ (13) บังคับให้จำนวนผลัดในวันที่ได้รับมอบหมาย ต้องไม่เกิน 2 ผลัดต่อวัน

$$\sum_{i \in N} x_{i1k} = A_{1k} \quad ; \forall k = 1, \dots, D \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i2k} - c_k = A_{2k} \quad ; \forall k = 1, \dots, D \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i3k} = A_{3k} \quad ; \forall k = 1, \dots, D \quad (10)$$

$$r_i \geq w \quad ; \forall i \in N \quad (11)$$

$$r_i - r_h \leq 1 \quad ; \forall i, h \in N \quad (12)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ijk} \leq 2 \times d_{ik} \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (13)$$

เงื่อนไขที่ (14)–(16) เป็นเงื่อนไขเพื่อป้องกันการทำงานในผลัดที่ห้ามทำ เงื่อนไขที่ (14) เป็นการห้ามทำงานผลัดคึกติดกับผลัดเช้า ภายในวันเดียวกัน เงื่อนไขที่ (15) เป็นการ

ป้องกันการทำงานผลัดบ่าย ติดกับผลัดคึก ของวันถัดไป เงื่อนไขที่ (16) ป้องกันการทำงานในผลัดคึกติดต่อกันเกิน 3 วัน

$$x_{i1k} + x_{i2k} \leq 1 \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (14)$$

$$x_{i3k} + x_{i,1,k+1} \leq 1 \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D - 1 \quad (15)$$

$$\sum_{k=l}^{l+3} x_{i1k} \leq 3 \quad ; \forall i \in N, \forall l = 1, \dots, D - 3 \quad (16)$$

เงื่อนไขที่ (17)–(23) เป็นเงื่อนไขหาจำนวนผลัดจำนวนพยาบาล และจำนวนวันทำงาน เงื่อนไขที่ (17) เป็นการหาการมอบหมายงานผลัด (ปกติ) เงื่อนไขที่ (18) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการหาจำนวนวันทำงานพยาบาล ใน 1 เดือน เงื่อนไขที่ (19) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการหาจำนวนผลัดการทำงานทั้งหมดใน 1 เดือนของพยาบาลแต่ละคน เงื่อนไขที่ (20) เป็นเงื่อนไขการหาจำนวนผลัดการทำงาน ของพยาบาลแต่ละคน ในวันที่ k เงื่อนไขที่ (21) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการหาจำนวนผลัดการทำงานล่วงหน้าทั้งเดือนของพยาบาลแต่ละคน เงื่อนไขที่ (22) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการหาจำนวนผลัดการทำงานล่วงหน้า โดยคิดจากผลรวมของผลัดทั้งหมดหักลบด้วยจำนวนวันทำการ เพื่อให้ผลัดการทำงานที่เกินกว่าจำนวนวันทำการเป็นผลัดล่วงหน้า เงื่อนไขที่ (23) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการหาผลรวมของพยาบาลที่ไปอบรมหรือลาพักรื้อน

$$x_{ijk} - z_{ijk} = y_{ijk} \quad ; \forall i \in N, \forall j \in S, \forall k = 1, \dots, D \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^D d_{ik} = r_i \quad ; \forall i \in N \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^D \sum_{j \in S} x_{ijk} = v_i \quad ; \forall i \in N \quad (19)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ijk} = u_{ik} \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^D \sum_{j \in S} z_{ijk} = t_i \quad ; \forall i \in N \quad (21)$$

$$t_i = v_i - w \quad ; \forall i \in N \quad (22)$$

$$\sum_{i \in N} \eta_{ik} = c_k \quad ; \forall k = 1, \dots, D \quad (23)$$

เงื่อนไขที่ (24)–(32) เป็นเงื่อนไขตามกฎระเบียบของอาชีพที่เป็นไปตามกฎหมายของประเทศ และระเบียบของโรงพยาบาลกรณีศึกษา เงื่อนไขที่ (24) ป้องกันการ

มอบหมายงานในวันที่พยาบาลลาหยุด เงื่อนไขที่ (25) บังคับให้พยาบาลต้องปฏิบัติงานอย่างน้อย 1 ผลัดในวันที่ได้รับมอบหมายงาน เงื่อนไขที่ (26) เป็นเงื่อนไขบังคับให้วันที่พยาบาล i มีอบรมให้นับเป็นผลัดเข้าปกติ เงื่อนไขที่ (27) เป็นเงื่อนไขป้องกันไม่ให้มอบหมายงานเกิน 1 ผลัดในวันที่พยาบาลที่มีการเข้าอบรมหรือลาพักร้อน เงื่อนไขที่ (28) บังคับให้ผลัดล่วงหน้าจะต้องอยู่ในวันที่ได้รับมอบหมายให้มีการปฏิบัติงาน เงื่อนไขที่ (29) บังคับให้ใน 1 วันถ้ามีการทำงาน 2 ผลัดต้องมีผลัดใดผลัดหนึ่งเป็นการทำงานล่วงหน้าไม่เกิน 1 ผลัด เงื่อนไขที่ (30) บังคับให้ใน 1 วันมีการทำงานล่วงหน้าไม่เกิน 1 ผลัด เงื่อนไขที่ (31) เป็นเงื่อนไขบังคับจำนวนผลัดขั้นต่ำที่ต้องทำเสาร์อาทิตย์ เงื่อนไขที่ (32) เป็นเงื่อนไขบังคับแต่ละผลัดจะอนุญาตให้มีพยาบาลใหม่เพียงคนเดียวเท่านั้น

$$x_{ijk} \leq 1 - P_{ik} \quad ; \forall i \in N, \forall j \in S, \forall k = 1, \dots, D \quad (24)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ijk} \geq d_{ik} \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (25)$$

$$\eta_{ik} \leq y_{i2k} \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (26)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ijk} \leq 2 - \eta_{ik} \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (27)$$

$$x_{ijk} \geq z_{ijk} \quad ; \forall i \in N, \forall j \in S, \forall k = 1, \dots, D \quad (28)$$

$$\sum_{j \in S} z_{ijk} \geq u_{ik} - 1 \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (29)$$

$$\sum_{j \in S} z_{ijk} \leq 1 \quad ; \forall i \in N, \forall k = 1, \dots, D \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^D \sum_{j \in S} (x_{ijk} \times e_k) \geq \alpha \quad ; \forall i \in N \quad (31)$$

$$\sum_{i \in N} (x_{ijk} \times \theta_i) \leq 1 \quad \forall j \in S, \forall k = 1, \dots, D \quad (32)$$

5. การดำเนินงานทดลองและผลการทดลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ได้กับทุกแผนกภายในโรงพยาบาลกรณีศึกษา แต่ในบทความฉบับนี้จะทดสอบเฉพาะข้อมูลของแผนกหอผู้ป่วยหญิงเท่านั้น และนำเสนอรายละเอียดขั้นตอน ผลการทดลองงานวิจัย

5.1. ขั้นตอนการทดลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากแนวคิดที่นำเสนอ ในหัวข้อที่ผ่านมา จะถูกนำไปพัฒนานบนโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.7 เพื่อหาผลัดการทำงาน

ให้พยาบาลแต่ละคน ซึ่งข้อมูลจากโรงพยาบาลกรณีศึกษา ที่นำไปใช้ในการหาคำตอบ จะเป็นข้อมูลทฤษฎี ซึ่งเป็นข้อมูลตารางการทำงานจริงของเดือนพฤษภาคม ถึงกรกฎาคม พ.ศ.2562 ที่จัดโดยหัวหน้าพยาบาล ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลจำนวนวันทำงาน และวันหยุดของโรงพยาบาลและวันลาของพยาบาลแต่ละคน
2. ข้อมูลจำนวนพยาบาลของแต่ละเดือน ซึ่งอาจจะมีจำนวนไม่เท่ากัน เนื่องจากมีการโยกย้ายภายในโรงพยาบาลหรือมีการลาป่วย ลาออก
3. ข้อมูลผลัดการทำงาน ของพยาบาลแต่ละคน

5.2. ผลการทดลอง

ผลลัพธ์จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) จากการใช้ข้อมูลของเดือนพฤษภาคม มีค่าวัตถุประสงค์ (Objective Value) เป็น 18.2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากตารางจริงที่จัดด้วยมือ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.8 จะเห็นว่า แบบจำลองสามารถลดจำนวนผลต่างรวมของผลัดการทำงานของพยาบาลได้ 39%

เพื่อให้การเปรียบเทียบสามารถทำได้ง่ายขึ้น ในบทความนี้จะใช้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการแสดงความแตกต่างของจำนวนผลัดการทำงานของพยาบาลโดยรวม โดยการกระจายผลัดให้กับพยาบาล ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 ปัจจุบันโรงพยาบาลกรณีศึกษา มีการกระจายงานได้ไม่ดีพอ ดูได้จากในตารางที่ใช้จริงในด้านซ้ายมือ ตัวอย่างเช่น พยาบาลคนที่ 1 ได้ผลัดคิก 8 ผลัด แต่พยาบาลคนที่ 3 ได้ผลัดคิก 5 ผลัด ซึ่งมีค่าต่างกันมาก แต่จะเห็นว่าตารางจากแบบจำลองที่เรานำเสนอขึ้น จำนวนของแต่ละผลัด จะมีค่าต่างกันไม่เกิน 1 ผลัด จากข้อมูลในตารางที่ 2 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากตารางที่ใช้จริง ผลัดคิกมีค่าเท่ากับ 0.800 ผลัดเช้ามีค่าเท่ากับ 0.671 ผลัดบ่ายมีค่าเท่ากับ 1.044 และผลัดล่วงหน้ามีค่าเท่ากับ 1.005 ส่วนค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากตารางจากแบบจำลอง ผลัดคิกมีค่าเท่ากับ 0.500 ผลัดเช้ามีค่าเท่ากับ 0.458 ผลัดบ่ายมีค่าเท่ากับ 0.400 และผลัดล่วงหน้ามีค่าเท่ากับ 0.458 ซึ่งมีค่าลดลงทุกตัว

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบจำนวนผลัดการทำงานที่พยาบาลแต่ละคนได้รับและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่าง ตารางที่ใช้จริง (เดือนพฤษภาคม 2562) และตารางจากแบบจำลอง

พยาบาล	จำนวนผลัดการทำงานของพยาบาลแต่ละคน							
	ที่ใช้จริง				แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
	ผลัดดึก	ผลัดเช้า	ผลัดบ่าย	ผลัดล่วงเวลา	ผลัดดึก	ผลัดเช้า	ผลัดบ่าย	ผลัดล่วงเวลา
1	8	5	7	13	7	7	6	13
2	6	7	7	13	7	7	6	13
3	5	6	9	13	7	6	7	13
4	7	7	6	14	6	7	7	13
5	7	7	6	13	6	7	7	12
6	6	6	8	13	6	7	7	12
7	7	7	6	14	7	6	7	12
8	7	7	6	12	6	7	7	13
9	7	7	6	11	7	6	7	13
10	6	6	8	11	6	7	7	13
S.D.	0.800	0.671	1.044	1.005	0.500	0.458	0.400	0.458

ตารางที่ 3 เป็นตารางสรุปค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้จากตารางที่ใช้จริงของโรงพยาบาลกรณศึกษา ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2562 โดยเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากตารางที่ใช้แบบจำลอง จากตาราง “เก่า” หมายถึงค่าที่คำนวณจากตารางที่ใช้จริง และ “ใหม่” คือค่าที่คำนวณจากตารางของแบบจำลอง จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าลดลงทุกเดือนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งหมายความว่า การจัดตารางงานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถกระจายงานได้เท่าเทียมกันมากขึ้น

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง ตารางที่ใช้จริง และตารางจากแบบจำลอง (พฤษภาคม ถึง กรกฎาคม พ.ศ.2562)

ผลัด	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					
	พฤษภาคม		มิถุนายน		กรกฎาคม	
	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่
ดึก	0.8	0.5	0.64	0.3	0.66	0.5

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง ตารางที่ใช้จริง และตารางจากแบบจำลอง (พฤษภาคม ถึง กรกฎาคม พ.ศ.2562) (ต่อ)

ผลัด	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					
	พฤษภาคม		มิถุนายน		กรกฎาคม	
	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่
เช้า	0.67	0.46	0.64	0.49	1.2	0.4
บ่าย	1.04	0.4	0	0.46	0.83	0.46
ล่วงเวลา	1.00	0.46	1.02	0.5	0.98	0.4
ค่าเฉลี่ย	0.878	0.455	0.575	0.438	0.918	0.440

จากการทดลองจัดตารางงานของเดือนพฤษภาคม ถึง กรกฎาคม พ.ศ.2562 ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตรวจสอบตารางงานที่ได้กับหัวหน้าพยาบาล ที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการจัดตารางงานพบว่า ตารางที่ได้มีความเหมาะสม สามารถกระจายภาระงานได้ดี และเป็นไปตามเงื่อนไขของโรงพยาบาลกรณศึกษา อีกทั้งยังสามารถจัดได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาเพียง 3.9 วินาที

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ปัญหาการจัดตารางการทำงานของพยาบาลเป็นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับการให้บริการของโรงพยาบาล ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางงานพยาบาล เพื่อแก้ปัญหาการจัดภาระงานที่ไม่สมดุล จัดไม่เป็นไปตามกฎระเบียบและความต้องการของโรงพยาบาล ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดในการลดความแตกต่างของจำนวนผลัดที่พยาบาลได้รับมอบหมาย โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาผลัดการทำงาน of พยาบาลทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด และนำไปทดลองใช้กับข้อมูลโรงพยาบาลกรณีศึกษาจริง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า พยาบาลทุกคนได้รับจำนวนผลัดการทำงานที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น ซึ่งลดความต่างของจำนวนผลัดการทำงานรวม จากตารางงานที่ใช้ปัจจุบันสูงสุด 3 ผลัด เหลือเพียง 1 ผลัด โดยสามารถลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนภาระงานจาก 0.790 เหลือ 0.444 อีกทั้งสามารถจัดตารางได้ตามเงื่อนไขของโรงพยาบาล ดังนั้นแนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาระบบการจัดตารางงานของโรงพยาบาลกรณีศึกษาในปัจจุบันได้ โดยจะต้องพัฒนาให้สามารถใช้งานได้ง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงพยาบาลอื่นๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Abhichartitubtra, W. Kunaviktikul, S. Turale, O. A. Wichaikhum, and W. Srisuphan, "Analysis of a government policy to address nursing shortage and nursing education quality," *International Nursing Review*, vol. 64, no. 1, pp. 22–32, 2017, doi: 10.1111/inr.12257.
- [2] A. Nantsupawat, W. Kunaviktikul, R. Nantsupawat, O. A. Wichaikhum, H. Thienthong and L. Poghosyan, "Effects of nurse work environment on job dissatisfaction, burnout, intention to leave," *International Nursing Review*, vol. 64, no. 1, pp. 91–98, 2017, doi: 10.1111/inr.12342.
- [3] E. K. Burke, P. De Causmaecker, G. Vanden Berghe, and H. Van Landeghem, "The state of the art of nurse rostering," *Journal of Scheduling*, vol. 7, pp. 441–499, 2004, doi: 10.1023/B:JOSH.0000046076.75950.0b.
- [4] P. S. Chen, Y. J. Lin and N. C. Peng, "A two-stage method to determine the allocation and scheduling of medical staff in uncertain environments," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 99, pp. 174–188, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.07.018.
- [5] Cheang, B., Li, H., Lim, A. and Rodrigues, B., "Nurse rostering problems a bibliographic survey," *European journal of operational research*, vol 151, no. 3, pp. 447–460, 2003, 10.1016/S0377-2217(03)00021-3.
- [6] J. Tewinburanuwong, "Application of genetic algorithms for staff nurse scheduling," M.Eng. Thesis, Dept. Industrial Engineering, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2000.
- [7] R. M'Hallah and A. Alkhabbaz, "Scheduling of nurses: A case study of a Kuwaiti health care unit," *Operations Research for Health Care*, vol. 2, no. 1–2, pp. 1–19, 2013, doi: 10.1016/j.orhc.2013.03.003.
- [8] A. A. El Adoly, M. Gheith and M. Nashat Fors, "A new formulation and solution for the nurse scheduling problem: A case study in Egypt," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 2289–2298, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.09.007.
- [9] B. Jaumard, F. Semet and T. Vovor, "A generalized linear programming model for nurse scheduling," *European Journal of Operational Research*, vol. 107, no. 1, pp. 1–18, 1998, doi: 10.1016/S0377-2217(97)00330-5.
- [10] R. Jenal, W. R. Ismail, L. C. Yeun and A. Oughalime, "A cyclical nurse schedule using goal programming," *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, vol. 43A, no. 3, pp. 151–164, 2011, doi: 10.5614/itbj.sci.2011.43.3.1.

- [11] A. Dumrongsiri and P. Chongphaisal, "Nurse scheduling in a hospital emergency department: A case study at a thai university hospital," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 40, no.1, pp. 187–196, 2018.
- [12] A. A. Constantino, D. Landa-Silva, E. L. de Melo, C. F. X. de Mendonça, D. B. Rizzato and W. Romão, "A heuristic algorithm based on multi-assignment procedures for nurse scheduling," *Annals of Operations Research*, vol. 218, pp. 165–183, 2014, doi: 10.1007/s10479-013-1357-9.
- [13] M. B. S. Kumar, M. G. Nagalakshmi and D. S. Kumaraguru, "A Shift Sequence for Nurse Scheduling Using Linear Programming Problem," *IOSR Journal of Nursing and Health Science*, vol. 3, no. 6, pp. 24–28, 2014, doi: 10.9790/1959-03612428.
- [14] J. F. Bard and H. W. Purnomo, "Real-time scheduling for nurses in response to demand fluctuations and personnel shortages," in *PATAT 2004. Proceedings of the 5th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*, Pittsburgh, PA USA, Aug. 18–20, 2004, pp. 67–87.
- [15] G. Laporte and Y. Nobert, "A Branch and Bound Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem," *Operations-Research-Spektrum*, vol. 5, pp. 77–85, 1983, doi: 10.1007/BF01720015.
- [16] J. J. S. Chávez, J. W. Escobar*, M. G. Echeverri, and C. A. P. Meneses, "A heuristic algorithm based on tabu search for vehicle routing problems with backhauls," *Decision Science Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 171–180, 2018, doi: 10.5267/j.dsl.2017.6.001.

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมความร้อนด้วย ตามูเชิงปรับตัว และการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค PI Controller Design of Heat Control Systems using ATS and PSO

สุชาวดี จินสุทธิ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี

ย่านยาว สามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

Suchawadi Chinsut

Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Suphanburi

Yan Yao, Sam Chuk, Suphan Buri, 72130, Thailand

* Corresponding Author E-mail: Suchawadi.C@rmutsb.ac.th

Received: Aug 02, 2021; Revised: Aug 22, 2021; Accepted: Aug 30, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทำให้ผลการตอบสนองของเอาต์พุตในระบบมีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งได้มาจากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อนำพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ปรากฏอยู่ มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกระบวนการค้นหา ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาขึ้น ในบทความนี้เลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ทำการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งอุณหภูมิและอุณหภูมิกระแส นอกจากนี้มีการตรวจสอบความสมจริงในขณะการออกแบบ เพื่อให้ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบขึ้นสามารถนำไปสร้างจริงได้ในทางปฏิบัติ

คำสำคัญ: ตัวควบคุมพีไอ, การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO), การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS)

Abstract

This paper presents the artificial intelligence-based PI controller design that results in better performance of the system output response compared with the conventional method. The mathematical model using AC-DC-AC power conversion circuit with a PI controller derived from the generalized state-space averaging method to take control parameters that appear in the model as an objective function in search process. The design of this controller will be applied in conjunction with a heat control systems for a small fuel ethanol production plants that has been developed. The adaptive tabu search and the particle swarm optimization method are used as the searching algorithms for this paper. The algorithm searches the controller parameters of both temperature and

current. In addition, the realism is checked the limitation of control signal to confirm that the resetting parameters can be implemented.

Keywords: PI Controller, Particle Swarm Optimization (PSO), Adaptive Tabu Search (ATS)

1. บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยมีแนวคิดที่จะผลิตเชื้อเพลิงที่สามารถใช้เอทานอลผสมกับน้ำมัน เช่นน้ำมัน E20 และ E85 เป็นต้น หรือแนวคิดแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิง จากสิ่งที่มีอยู่มาประยุกต์เพื่อให้เกิดประโยชน์ ซึ่งในงานวิจัย [1] มีการสร้างระบบเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ที่พบว่ามีระบบทำความร้อนให้แก่น้ำมัน ที่เกิดจากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร ซึ่งจะถูกลั่นลำดับส่วนโดยการให้ความร้อนจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุด และนำไปผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อทำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ ในกระบวนการทั้งหมดนี้ระบบทำความร้อนเป็นส่วนสำคัญในการกลั่นเอทานอล ถ้าหากการทำงานมีประสิทธิภาพต่ำ หรือมีข้อผิดพลาดของระบบควบคุม อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเอทานอล ดังนั้นในระบบทำความร้อนที่มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพ ควรมีตัวควบคุมที่ดี โดยตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้ คือ ตัวควบคุมพีไอ เพราะมีโครงสร้างที่ง่าย ให้สมรรถนะการใช้งานคงทนในช่วงการทำงานที่กว้าง และสามารถใช้กับระบบอื่นๆได้ ในทางปฏิบัติการปรับค่าพารามิเตอร์ต้องทดลองปรับค่า (Trial and Error) ซึ่งเกิดความยุ่งยากและใช้เวลานาน อีกทั้งค่าที่ได้มักจะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุด จึงได้มีการคิด และพัฒนาวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมหลายวิธี

ในบทความจึงนำเสนอการออกแบบปรับปรุงพารามิเตอร์ตัวควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย ATS [2], การออกแบบวงจรกรองและระบบควบคุมด้วย GA [3], การค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

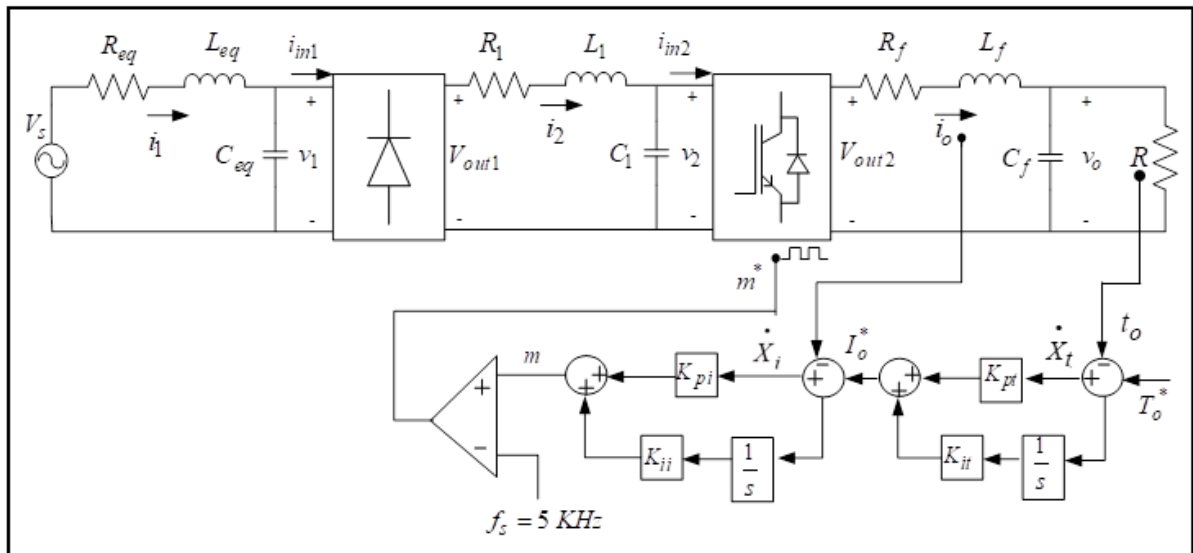
ดีด้วย PSO [4] และอื่นๆ โดยในบทความนี้ได้เลือกนำเสนอวิธีการปัญญาประดิษฐ์ 2 วิธี คือ วิธีการค้นหาแบบตามู่งปรับตัว (Adaptive Tabu Search; ATS) และการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อย มีหลักการค้นหาปรับปรุงตัวควบคุมที่คล้ายคลึงกัน และให้ประสิทธิภาพในการค้นหาที่ดีเช่นกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองทางฝั่งเอาต์พุตที่ดีที่สุด ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำไปคำนวณหาสัญญาณการควบคุม และในการนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยระบบที่ศึกษาในบทความนี้จะมีส่วนประกอบหลักเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้างกล่าว ส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-Varying Model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในระบบ จะส่งผลเมื่อนำไปวิเคราะห์ ทำให้เกิดความยุ่งยากด้วยเหตุนี้จึงต้องอาศัยวิธีในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-Invariant Model) ซึ่งในที่นี้เลือกใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalize State-Space Averaging Method: GSSA) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อย ให้ความถูกต้องแม่นยำสูง และเป็นที่นิยมในการนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังหนึ่งเฟส ซึ่งรายละเอียดการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัย [5] โดยจะมีเนื้อหาหลักเกี่ยวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อาศัยวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ด้วยการใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง ซึ่งจากการยืนยันผลสามารถแสดงให้เห็นแล้วว่าได้แบบจำลองที่มีความ

ถูกต้องและแม่นยำ อีกทั้งพบว่าแบบจำลองดังกล่าวใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็วกว่าแบบจำลองสวิตช์ในโปรแกรม MATLAB ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ในบทความจึงมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับอัลกอริทึมสำหรับการหาจุดที่ดีที่สุด (Optimization) ที่มีการค้นหาแบบซ้ำ ๆ ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ทั้ง 2 วิธี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ จะแสดงให้เห็นว่าผลการตอบสนองอุณหภูมิเอาต์พุตมีสมรรถนะดียิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การยืนยันผลการออกแบบตัวควบคุมจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB รวมทั้งมีการตรวจสอบความสมจริงในขณะการออกแบบ เพื่อให้ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบขึ้นสามารถนำไปสร้างจริงได้ในทางปฏิบัติ

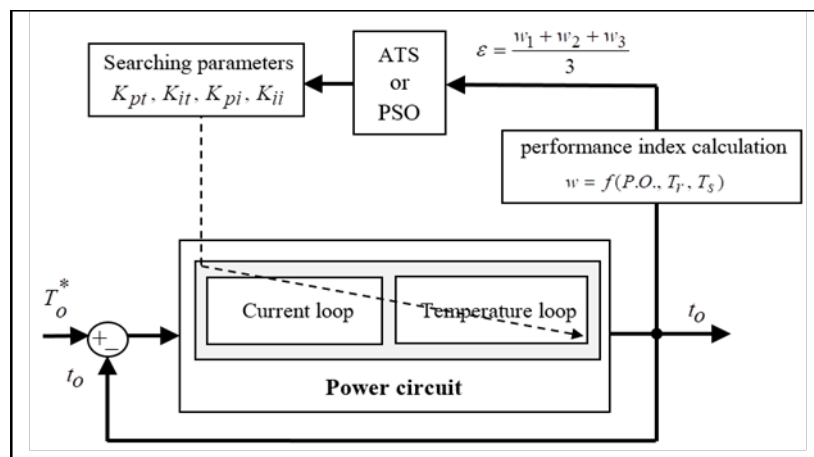
2. แบบจำลองพลวัตระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

ระบบที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 1 จะอาศัยตัวควบคุมพีไอที่เป็นระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา เป็นการนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเข้ามาวิเคราะห์ โดยใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจรรีเลย์ (Complex Fourier Series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองแสดงดังสมการที่ (1) โดยจะปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (K_p, K_i, K_d, K_f) ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่มีตัวควบคุมพีไอ พบได้จาก [5] โดยจากสมการถือเป็นองค์ที่สำคัญในนำไปประยุกต์ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ที่ทำให้สมรรถนะของผลการตอบสนองของอุณหภูมิดียิ่งขึ้น โดยมีกระบวนการดังรูปที่ 2

$$\begin{aligned}
 x_1 &= -\frac{R_1}{L_1}x_1 - \frac{1}{L_1}x_2 - \frac{4}{\pi L_1}x_6 \\
 x_2 &= \frac{1}{C_1}x_1 - \frac{8K_{pi}\sqrt{x_7^2+x_8^2}}{\sqrt{2\pi C_1 A_r}}x_8 - \frac{5.2K_{pt}K_{pi}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2}}{\sqrt{2\pi C_1 A_r}}x_8 + \frac{4K_{it}K_{pi}}{\sqrt{2\pi C_1 A_r}}X_t x_8 + \frac{4K_{ii}}{\sqrt{2\pi C_1 A_r}}X_i x_8 + \frac{4K_{pt}K_{pi}T_o^*}{\sqrt{2\pi C_1 A_r}}x_8 \\
 x_3 &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_3 + \omega x_4 - \frac{1}{L_{eq}}x_5 \\
 x_4 &= -\omega x_3 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_4 - \frac{1}{L_{eq}}x_7 + \frac{1}{2L_{eq}}Vm \\
 x_5 &= \frac{1}{C_{eq}}x_3 - \omega x_6 \\
 x_6 &= \frac{2}{\pi C_{eq}}x_1 + \frac{1}{C_{eq}}x_4 - \omega x_5 \\
 x_7 &= -\frac{R_f}{L_f}x_7 + \omega x_8 - \frac{1}{L_f}x_9 \\
 x_8 &= \frac{4K_{pi}\sqrt{x_7^2+x_8^2}}{\sqrt{2\pi L_f A_r}}x_2 + \frac{2.6K_{pt}K_{pi}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2}}{\sqrt{2\pi L_f A_r}}x_2 - \frac{2K_{it}K_{pi}}{\sqrt{2\pi L_f A_r}}X_t x_2 - \frac{2K_{ii}}{\sqrt{2\pi L_f A_r}}X_i x_2 - \frac{2K_{pt}K_{pi}T_o^*}{\sqrt{2\pi L_f A_r}}x_2 - \omega x_7 - \frac{R_f}{L_f}x_8 - \frac{1}{L_f} \\
 x_9 &= \frac{1}{C_f}x_7 - \frac{1}{RC_f}x_9 + \omega x_{10} \\
 x_{10} &= \frac{1}{C_f}x_8 - \omega x_9 - \frac{1}{RC_f}x_{10} \\
 x_t &= T_o^* - 1.3\sqrt{x_9^2+x_{10}^2} \\
 x_i &= -2\sqrt{x_7^2+x_8^2} - 1.3\sqrt{x_9^2+x_{10}^2} + K_{it}X_t + K_{pt}T_o^*
 \end{aligned} \tag{1}$$



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุมพีไอ [5]



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

พิจารณาออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการดั้งเดิม สำหรับใช้เป็นพื้นฐานในการกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งพบว่าได้ค่าพารามิเตอร์ คือ $K_{pt} = 10.309$, $K_{it} = 0.02$, $K_{pi} = 0.0025$ และ $K_{ii} = 9.03125$ รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถดูได้ใน [5]

ในลำดับถัดไปจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS และ PSO ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2 พบว่าวิธีดังกล่าว จะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ตัว ได้แก่ K_{pt} , K_{it} , K_{pi} , และ K_{ii} ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามความสัมพันธ์ในสมการ

ที่ (1) ซึ่งในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมจะทำการกำหนดค่าอุณหภูมิอ้างอิง (T_o^*) ในย่านการทำงานที่ต้องการ และจะอาศัยการประเมินค่าผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบ (w) โดยสมการที่ (2)

$$w(T_{Rp,u}, T_{Sp,u}, P.O.p.u) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O \quad (2)$$

โดยที่ PO คือ เปอร์เซนต์การพุ่งเกิน, T_R คือ ช่วงเวลาขึ้น และ T_S คือ ช่วงเวลาเข้าที่ σ , α และ γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของ PO, T_R และ T_S กำหนดให้มีค่าเป็น 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ โดยอัลกอริทึมทั้ง 2 วิธี มีกลไกการค้นหาโดยใช้ค่า w ที่ได้จากการนำชุดข้อมูลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย (ε) ส่งให้กับกลไกการ

ค้นหาการประมวลผลจนกระทั่งได้ค่า ε น้อยที่สุด ที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุด

3. การออกแบบปรับปรุงตัวควบคุมฟuzzy ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

3.1. หลักการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy ด้วย ATS

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่ถูกพัฒนามาจากวิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu Search: TS) [6] ที่มีการค้นหาคำตอบด้วยเงื่อนไขการค้นหาคำตอบใหม่ที่เริ่มต้นจากคำตอบปัจจุบัน โดยใช้หลักการเดิน (move operator) อาศัยการประเมินค่าคำตอบรอบข้าง ในรัศมีเริ่มต้นที่กำหนด และอีกเงื่อนไข คือ การเลี่ยงเส้นทางที่ค้นหาที่ทำการวนรอบอยู่กับที่ (Cycle Avoidance) ซึ่งในส่วนวิธี ATS [7] ได้รับการพัฒนาด้วยการเพิ่ม 2 กลไก คือ การเดินย้อนรอย (Back Tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive Radius) สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหาคำตอบ และประเมินคำตอบที่ดีที่สุด เป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0)

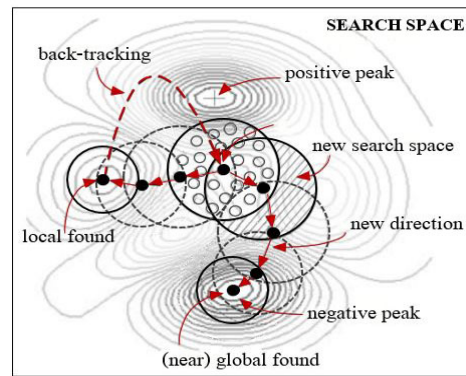
ขั้นตอนที่ 2 สุ่มเลือกคำตอบรอบข้างจำนวน N โดยนำ S_0 มาเป็นศูนย์กลาง เพื่อสุ่มคำตอบบริเวณใกล้เคียง ในรัศมีการค้นหา R ประเมินคำตอบรอบข้าง โดยนำคำตอบที่ดีที่สุด (S_1) เทียบกับ S_0 และทำการประเมินเป็นคำตอบใหม่ (S_{new}) ในรอบการค้นหาปัจจุบัน และจะกลายเป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) ในรอบการค้นหาถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อ $count_n < count_{set}$ ทำการค้นหาในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง จนกระทั่งได้คำตอบตามที่เงื่อนไขกำหนดหรือ $count_n > count_{set}$ ในกรณีที่การค้นหาไม่พบคำตอบที่ดีขึ้น กลไกการเดินย้อนรอยจะถูกนำมาใช้

ขั้นตอนที่ 4 เข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย โดยเลือกคำตอบที่ดีที่สุด จากการค้นหาในพื้นที่เดิม กำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

ขั้นตอนที่ 5 เข้าสู่กลไกการปรับรัศมีการค้นหา เพื่อกระชับพื้นที่ให้แคบลง แสดงได้ดังรูปที่ 3

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อค้นหาคำตอบครบจำนวนรอบที่กำหนด จะได้คำตอบที่ดีที่สุด ถูกส่งมาเป็นคำตอบของกระบวนการ ซึ่งในที่นี้ คือ K_p , K_i , K_d และ K_{ii}



รูปที่ 3 กลไกการเดินย้อนรอย และปรับรัศมีการค้นหา

กระบวนการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy ด้วย ATS โดยทำการกำหนดค่าอุณหภูมิในย่านการทำงานที่ต้องการ ซึ่งในบทความนี้ทำการพิจารณา 2 กรณี คือ 1. กำหนดค่า T_0^* เปลี่ยนจากอุณหภูมิ 85°C ไปเป็น 100°C และกรณีที่ 2. จากอุณหภูมิ 105°C ไปเป็น 90°C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เอทานอลทั้งหมดแยกตัวออกจากของเหลว จากนั้นกำหนดขอบเขต บน-ล่าง ของพารามิเตอร์ K_p , K_i , K_d และ K_{ii} โดยมีค่าเป็น [20.00 0.50], [1.00 0.005], [0.50 0.0001], [100 1.00] ตามลำดับ และทำการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบ ได้แก่

- จำนวนค่าคำตอบเริ่มต้น เลือกใช้ค่าเท่ากับ 30 คำตอบ
- จำนวนคำตอบรอบข้าง เลือกใช้ค่าเท่ากับ 20 คำตอบ
- รัศมีการค้นหาคำตอบ เลือกใช้ค่าเท่ากับ 20
- ตัวประกอบการปรับลดรัศมี (DF) เลือกใช้เท่ากับ 1.1

จำนวนรอบ (Round) เลือกใช้ค่าเท่ากับ 30 รอบ โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเกิดจากการทดสอบและเก็บผลจากการค้นหาแบบวนซ้ำด้วย ATS ที่ให้ค่า w ต่ำสุด รายละเอียดเพิ่มเติม สามารถพบได้ใน [7–8]

3.2. หลักการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy ด้วย PSO

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค หรือที่เรียกว่า PSO เป็นอัลกอริทึมการค้นหาเชิงประชากร โดยมีอนุภาคย่อย ๆ รวมกลุ่มกันเคลื่อนที่ไปในปริภูมิเกิน (hyperspace) เพื่อค้นหาคำตอบ ซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่แต่ละอนุภาคเปลี่ยนไปตามข้อมูลการค้นหาที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น ๆ

และข้อมูลจากการค้นหาอนุภาคที่เจอคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่ม [9–10] สามารถสรุปขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขอบเขตการค้นหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 2 สุ่มเวกเตอร์ตำแหน่ง (Position vector: $\vec{P}$) และเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector: $\vec{V}$) ของแต่ละอนุภาค ในกลุ่มประชากร โดยเวกเตอร์ทั้ง 2 จะมีมิติเท่ากับจำนวนของตัวแปรที่ต้องการค้นหาคำตอบ ซึ่งในบทความนี้มี 4 มิติ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3)

$$\vec{P}_i = \begin{bmatrix} K_{pt,i} \\ K_{it,i} \\ K_{pt,i} \\ K_{it,i} \end{bmatrix}, \quad \vec{V}_i = \begin{bmatrix} V_{1,i} \\ V_{2,i} \\ V_{3,i} \\ V_{4,i} \end{bmatrix}; \quad \begin{array}{l} i = \text{จำนวนอนุภาค} \\ \text{ย่อย } (1,2,3,\dots, NP) \end{array} \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดดีกว่าค่าที่ดีที่สุดของกลุ่ม หรือดีที่สุดแบบวงกว้าง (gbest)
- กรณีที่ 2 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดดีกว่าค่า ค่าที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเดียวกัน (pbest)

ขั้นตอนที่ 4 ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาค ในสมการที่ (4) โดยที่พจน์สองเรียกว่า องค์ประกอบเชิงปริชาณ (Cognitive Component) ใช้แทนประสบการณ์ค้นหาของแต่ละอนุภาค และพจน์สาม คือองค์ประกอบทางสังคม (Social Component) ใช้แทนประสบการณ์ค้นหาของกลุ่ม

$$\vec{V}(new) = \vec{V}(old) + \underbrace{\rho_p (\vec{P}_{pbest,i} - \vec{P}_i(old))}_{\text{cognitive component}} + \underbrace{\rho_g (\vec{P}_{gbest,i} - \vec{P}_i(old))}_{\text{social component}} \quad (4)$$

โดยที่ ρ_p, ρ_g คือตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบทั้ง 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $r_p C_p$ และ $r_g C_g$ ตามลำดับ (C_p, C_g คือค่าคงที่ความเร่ง)

ขั้นตอนที่ 5 ปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคในรอบการค้นหาต่อไป ด้วยความสัมพันธ์สมการที่ (5)

$$\vec{P}_i(new) = \vec{P}_i(old) + \vec{V}_i(new) \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $iteration < iteration_{max}$ ให้ทำการค้นหาซ้ำจนกระทั่งได้ค่าที่เหมาะสม หรือ $iteration > iteration_{max}$ ให้หยุดการค้นหา โดยคำตอบที่ดีที่สุดแบบ $gbest$ จะถูกส่งมาเป็นคำตอบของระบบ [11]

สำหรับกระบวนการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วย PSO ทำเช่นเดียวกับการออกแบบด้วย ATS คือ ทำการกำหนดค่าย่านอุณหภูมิทำงานที่ต้องการ กำหนดค่าขอบเขตของพารามิเตอร์ บน-ล่าง และกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของการค้นหาเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและเลือกค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบ ดังนี้

- จำนวนอนุภาคการค้นหา (NP) เท่ากับ 30 คำตอบ
- ค่าคงที่ความเร่งแบบ C_p เท่ากับ 1
- ค่าคงที่ความเร่งแบบ C_g เท่ากับ 0.5

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์การค้นหาที่เหมาะสม จะนำไปสู่การออกแบบปรับปรุงตัวควบคุมพีไอ โดยประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบ (w) ในสมการที่ (2) ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมทั้ง 4 ที่ให้ผลตอบสนองอุณหภูมิเอ็ดพุตที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถศึกษาแนวทาง และกระบวนการเพิ่มเติมได้ใน [12] โดยยกตัวอย่างการเขียนอัลกอริทึมพื้นฐานของ PSO แสดงในอัลกอริทึมที่ 1

อัลกอริทึมที่ 1 พื้นฐานการค้นหาคำตอบด้วย PSO

Begin

While $N < N_{max}$ do

for each particle i do

Update the velocity according equation (4);

Update position according to equation (5);

Calculate the fitness value;

$N++$;

end for

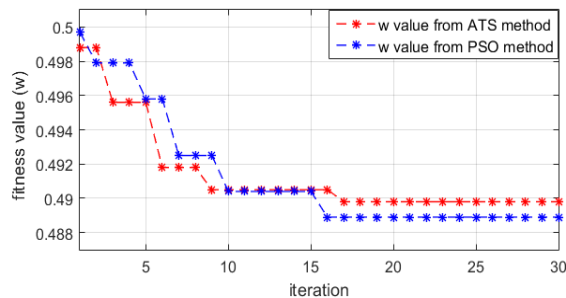
Update the $pbest$ and $gbest$ in the population;

end while

End

4. ผลการออกแบบตัวควบคุม

จากระบบที่พิจารณาตามรูปที่ 1 สำหรับกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ไอดีด้วยอัลกอริทึม ATS และ PSO มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ให้ผลตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตที่ดีขึ้นผ่านการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ w ของการค้นหาที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ สามารถแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่า w ของการค้นหาด้วย ATS และ PSO

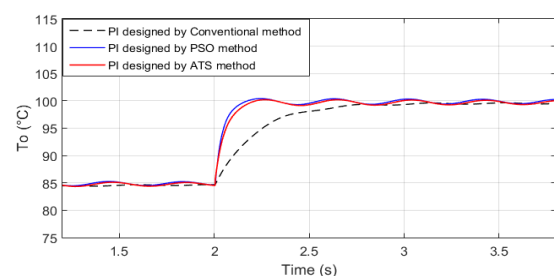
จากรูปที่ 4 แสดงค่า w สำหรับการค้นหาในแต่ละรอบที่มีค่าลดลงเรื่อย ๆ พบว่าค่าเข้าหาค่าตอบที่ดีที่สุดของค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม ที่สามารถทำให้ผลการตอบสนองมีสมรรถนะที่ดีขึ้น ทั้งอัลกอริทึม ATS และ PSO โดยพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้จากกลไกการค้นหาทั้ง 2 วิธี เมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิมมีค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในระบบที่พิจารณา

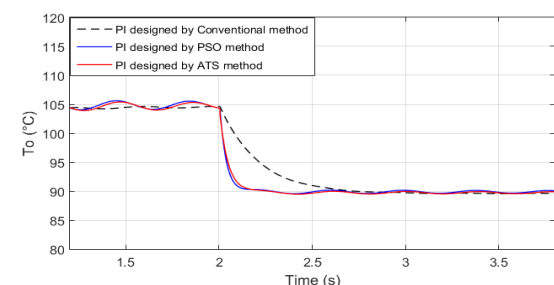
วิธีการออกแบบ	พารามิเตอร์ตัวควบคุม		
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี ATS	วิธี PSO
K_{pt}	10.309	14.3659	9.6820
K_{it}	0.02	0.1513	0.2535
K_{pi}	0.0025	0.0989	0.0745
K_{ii}	9.0312	29.9500	42.0264
w	0.8934	0.4898	0.4889

ยืนยันผลการออกแบบปรับปรุงตัวควบคุมที่ไอดีด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ โดยจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต ซึ่งทำการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมกับการออกแบบด้วย ATS และ PSO โดยมี

การปรับเปลี่ยนย่านอุณหภูมิ ใน 2 กรณี ที่เวลา $t=2$ วินาที พบว่าตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี สามารถควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบได้ถูกต้อง ตามจุดทำงานที่ต้องการ และพบว่าผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกัน ในสภาวะอยู่ตัว แต่จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมที่ไอดีด้วย ATS และ PSO ให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตทั้ง ในช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และการพุ่งเกินชั่วคราว ที่ดีกว่า จึงส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมทั้ง 2 กรณี ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5-6



รูปที่ 5 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อ T_o^* เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิ 85°C ไปเป็น 100°C

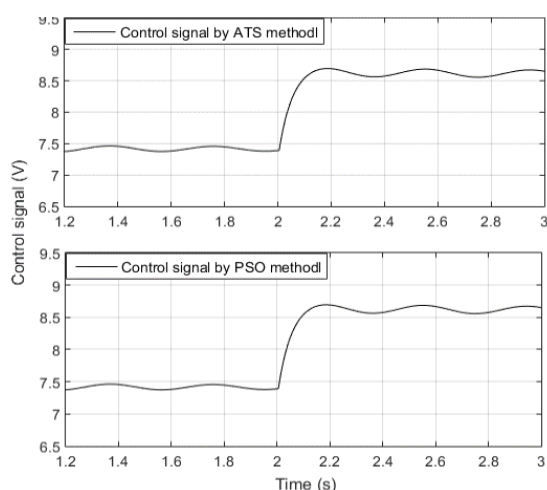


รูปที่ 6 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อ T_o^* เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิ 105°C ไปเป็น 90°C

ในบทความนี้ผู้วิจัยได้คำนึงถึงความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ จึงกำหนดเงื่อนไขตรวจสอบความสมจริง ด้วยการคำนวณสัญญาณควบคุม (m) ที่มีค่าอยู่ภายในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 10 เนื่องจากเป็นช่วงการพิจารณาเปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยม เพื่อนำไปสร้างสัญญาณการสวิตช์ฟีดแบ็คเปิดยูเอ็ม โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6) และมีผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งยกตัวอย่างการพิจารณาที่ย่านอุณหภูมิในกรณีที่ 1

$$m = -K_{pi}i_o - 0.65K_{pt}K_{pi}v_o + K_{it}K_{pi}X_t + \frac{K_{ii}X_i + K_{pt}K_{pi}T_o^*}{K_{ii}X_i + K_{pt}K_{pi}T_o^*} \quad (6)$$

โดยจากการตรวจสอบความสมจริง ในกระบวนการ ออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีอัลกอริทึม ATS และ PSO คำนวณตามความสัมพันธ์ ร่วมกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งพบว่าระดับ ของสัญญาณอยู่ภายในช่วง 0 ถึง 10 ตามเงื่อนไข ดังนั้น จึงถือได้ว่าตัวควบคุมพีไอ ที่ทำการออกแบบขึ้นด้วยวิธี ทางปัญญาประดิษฐ์ มีความสมจริง และสามารถนำไปใช้ ในงานได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับการทดสอบ ในชุด ทดสอบควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของเครื่องต้นแบบผลิต เชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาขึ้น



รูปที่ 7 สัญญาณควบคุม m เมื่อ T_o^* เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จาก 85°C ไปเป็น 100°C

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ตัว ควบคุมพีไอของระบบควบคุมความร้อนสำหรับ เครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ด้วยวิธีการ ทางปัญญา ประดิษฐ์ ที่เป็นการนำอัลกอริทึม ATS และ PSO มาค้นหาคำตอบ โดยองค์ประกอบในกระบวนการ ออกแบบพิจารณาพร้อมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบ มีการตรวจสอบผลการออกแบบทั้ง ความถูกต้องของ คำตอบ และสมรรถนะของผลการตอบสนองอุณหภูมิ

เอาต์พุต โดยเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี กับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม พบว่าการออกแบบ ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ให้ผลการตอบสนองของ อุณหภูมิเอาต์พุตของระบบมีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นและดีกว่า นอกจากนี้ได้นำเสนอการตรวจสอบสัญญาณการควบคุม ของตัวควบคุมพีไอที่ถูกออกแบบขึ้น บ่งบอกได้ว่าตัว ควบคุมนี้มีความสมจริง สามารถนำไปใช้งานได้จริงอย่างมี ประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Boontawan, "Retrofitting of Pilot Plant for the Extractive Fermentation of Bio-ethanol using Vacuum Fractionation technique," Research reports., Dept. Biotechnology of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2018, pp. 14–25
- [2] S. Sujitjorn, T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and K. Areerak, "Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design," in *Integrated Intelligent Systems for Engineering Design*, X. F. Zha and R.J. Howlett, Eds, Amsterdam, Netherlands, IOS Press, 2006, pp. 233–257
- [3] T. Narongrit, K-L. Areerak and K-N. Areerak, "Design of an Active Power Filter using Genetic Algorithm Technique," in *The 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED' 10)*, Cambridge, United Kingdom, Feb 20–22, 2010, pp.46–50.
- [4] X. Li, M. Chen and Y. Tsutomu, "A method of searching PID controller's optimized coefficients for buck converter using particle swarm optimization," in *2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive*

- Systems (PEDS)*, Apr 22–25, 2013, pp. 238–243, doi: 10.1109/PEDS.2013.6527021
- [5] S. Chinsut, “The Implementation of Heat Control Systems for Small Fuel Ethanol Production Plants,” M.Eng., Dept. Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2019.
- [6] K-N. Areerak, and S. Sujitjorn, “Performanc Comparison between Genetic Algorithm and Tabu Search Methods,” *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 9, 2002, pp. 61–68.
- [7] D. Puangdownreong, K.-N. Areerak, A. Srikaew, S. Sujitjorn and P. Totarong, “System Identification via Adaptive Tabu Search,” in *IEEE International Conferenc on Industrial Technology (ICIT02)*, Bangkok, Thailand, Dec. 11–14, 2002, pp. 915–920, doi: 10.1109/ICIT.2002.1189290.
- [8] K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, K-L. Areerak and A. Srikaew, “The controller design of three-phase controlled rectifier using an adaptive tabu search algorithm,” in *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Khon Kaen, Thailand, May 17–19, 2011, pp. 605–608, doi: 10.1109/ECTICON.2011.5947911.
- [9] S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak and K-L. Areerak, “The Applicayion of Averaging Model for Optimized Cascade PI Controllers of Buck Converters using Aftificial Intelligence Techniques,” *European Journal of Scientific Research*, Volume 98, No 3, 2013, pp. 339-353.
- [10] R. Eberhart and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory,” in *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, Oct 04-06, 1995, pp. 39–43, doi: 10.1109/MHS.1995.494215.
- [11] J. Seekuka, P. Piamsa-Nga, R. Rattanawaorahirunkul, “Automatic voltage regulator using PID controller based on particle swarm optimization,” in *2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Phuket, Thailand, Oct 12–13, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICITEED.2017.8250498
- [12] R. Rapeepong, J. Seekuka and K-L. Areerak, “The Optimal Cascade PI Controller Design of buck converters,” in *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Phetchaburi, Thailand, May 16–18, 2012, pp.1–4, doi: 10.1109/ECTICon.2012.6254130.

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อคัดแยกงานเสียของผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์

Regression Analysis Applying for Defection Rescreening of Microelectronics Product

นิชานัช เกศมุกดา*

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลาชา พุทธมณฑล นครปฐม 73170

Nichanach Katemukda*

Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom, 73170, Thailand

*Corresponding Author E-mail: Nichanach.kat@rmutr.ac.th

Received: Aug 20, 2021; Revised: Oct 12, 2021; Accepted: Oct 14, 2021

บทคัดย่อ

เนื่องจากในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มีขนาดเล็ก เบาหรือบางลง ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ของคอมพิวเตอร์ พกพา อุปกรณ์เก็บข้อมูล อุปกรณ์มือถือ เป็นต้น จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีบทบาทเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตหลักแห่งหนึ่งที่มีการผลิตชิ้นส่วนเหล่านี้เป็นจำนวนมากและมีอยู่หลายบริษัทด้วยกัน บริษัทดังกล่าวมีทั้งที่เป็นบริษัทที่ทำการรับจ้างผลิตและมีผลิตภัณฑ์เป็นของตนเอง เนื่องด้วยชิ้นส่วนไมโครอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กจึงทำให้แผงวงจรที่ใช้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ความกว้าง 100 มิลลิเมตร และความยาว 200 มิลลิเมตร ทั้งนี้โรงงานกรณีศึกษามีการพบของเสียจากชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบในขั้นสุดท้ายก่อนส่งมอบให้ลูกค้า โดยสาเหตุหลักพบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในของแผงวงจรมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ในการหาเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศภายในนั้นจะต้องทำการตัดขวางเพื่อดูและทำการวัดค่าซึ่งถือเป็นการตรวจสอบแบบต้องทำลายและใช้ระยะเวลานาน ดังนั้นการวิจัยนี้จึงทำการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดที่มีอยู่คือเครื่องเอ็กซเรย์วัดเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศ และหาความสัมพันธ์กับการวัดเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศหลังจากการตัดขวาง แล้วใช้การวิเคราะห์การถดถอยในการหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กันของทั้งสองตัวแปรเพื่อทำนายเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศภายในของแผงวงจร โดยผลการวิจัยพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศที่ได้จากวัดโดยเครื่องเอ็กซเรย์สามารถใช้ทำนายเปอร์เซ็นต์ความเป็นโพรงของรูในแผ่นวงจรหลังการตัดขวางได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการไม่เท่ากับศูนย์ที่ความเชื่อมั่น 95% และค่า Adjusted R-Square เท่ากับ 88.18% ทำให้โรงงานกรณีศึกษาสามารถคัดแยกแผงวงจรที่ไม่ผ่านมาตรฐานได้โดยไม่ทำลาย ประหยัดเวลาในการคัดแยก และได้รับการยอมรับจากทั้งโรงงานกรณีศึกษาและผู้ผลิตแผงวงจร

คำสำคัญ: การวิเคราะห์การถดถอย, ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, คุณภาพ

Abstract

Consumer devices, such as laptops, personal data storage, and smart phones, are currently thin, compact, and light-weight. As a result, microelectronics is widely used in consumer electronics. Thailand is home to a number of manufacturers that provide microelectronics products to the market. There are two types of electronics manufacturer: provider solutions and owner brands. The print circuit board dimension 100×200×1 millimeters is now being used in the manufacturing case study. They discovered that the product failed at the test station (Functional Test), with the bulk of the root cause being a void in the through hole that exceeded the customer's requirements. A cross section and measurement are required to check the void in the through hole. This is a destructive measurement with a long lead time, and the factory does not want to rescreen any units by using a destructive method. The goal of this study is to use regression analysis to estimate void % using X-Ray image measurement as a predictor. The research found that the regression model may be used to re-screen defective printed circuit boards (the regression coefficient is not zero at 95 percent confidence intervals, and the adjusted R-square is 88.18 percent) without destroying the part. This is a practical and time-saving method. Furthermore, the factory and the supplier both acknowledge and agree on this regression model.

Keywords: Regression analysis, Microelectronics, Quality

1. บทนำ

ในปัจจุบันสินค้าเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์หลาย ๆ อย่าง เช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต มีความต้องการลดขนาดหรือความหนาของผลิตภัณฑ์ลง จึงทำให้มีการออกแบบผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ ๆ ที่มีขนาดเล็กลง [1] ทำให้สามารถพกพาได้สะดวกมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคและส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ดังกล่าวต้องมีขนาดเล็กลงด้วย ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งนี้ประเทศไทยก็เป็นหนึ่งในประเทศที่เป็นฐานการผลิตหลักของชิ้นส่วนไมโครอิเล็กทรอนิกส์และมีบริษัทชั้นนำของโลกตั้งฐานการผลิตหลักที่ประเทศไทย โดยมีทั้งที่เป็นบริษัทที่ทำการรับจ้างผลิตและมีผลิตภัณฑ์เป็นของตนเอง [2] ทั้งนี้บริษัทที่มีผลิตภัณฑ์เป็นของตัวเอง เช่น ไมโครชิป เอวีเอ็กซ์ เป็นต้น เนื่องจากชิ้นส่วนที่ผลิตมีขนาดเล็กจึงทำให้กระบวนการผลิตและกระบวนการประกอบจะต้องใช้เครื่องจักรและเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง รวมถึงวัตถุดิบที่ใช้ก็ต้องมีการตรวจสอบคุณภาพก่อนการใช้งานอยู่เสมอเพื่อให้ได้คุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ [3] ในการวิจัยนี้เป็นโจทย์ปัญหาของโรงงานการศึกษาที่มีการผลิตและประกอบผลิตภัณฑ์ไมโคร

อิเล็กทรอนิกส์ โดยโรงงานกรณศึกษาพบว่ามีความเสี่ยงที่ไม่ผ่านกระบวนการทดสอบขั้นสุดท้ายทำให้ไม่สามารถส่งมอบผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้าได้ จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาพบว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการตรวจสอบมาจากแผงวงจรที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยพบว่าแผงวงจรมีรูโพรงอากาศภายในโพรงมากกว่า 40% ซึ่งเป็นค่าที่เกินกว่ามาตรฐานกำหนด และในการตรวจสอบข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการตรวจสอบจะเป็นการทดสอบแบบทำลาย โดยทำการตัดขวางชิ้นงานเพื่อวัดเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศที่อยู่ในแผงวงจรว่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ [4] ทั้งนี้การทำการตัดขวางนอกจากจะทำลายแผงวงจรแล้วยังต้องใช้เวลาในการทำก่อนข้างงาน ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทรัพยากรต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแรงงานคน วัสดุ รวมถึงเครื่องจักร ดังนั้นทางโรงงานกรณศึกษาจึงต้องการทำการวิจัยเพื่อศึกษาหาวิธีที่สามารถตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศที่อยู่ในรูของแผงวงจรโดยไม่ทำลายและใช้เวลาน้อยที่สุดก่อนที่จะนำแผงวงจรเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งพบว่าเครื่อง X-ray ในปัจจุบันสามารถทำการจำลองและคำนวณเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศที่อยู่ในรูของแผงวงจรได้ ดังนั้นทางเลือกหลักคือการใช้เครื่อง X-ray เพื่อทำการจำลองรูโพรงอากาศ

และคำนวณเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศ แต่ทางผู้ผลิตแผงวงจรจะไม่รับคืนตัวแผงวงจรและเปลี่ยนตัวแผงวงจรใหม่ให้หากโรงงานกรณีศึกษาไม่พิสูจน์ด้วยการตัดขวาง ดังนั้นการวิจัยจึงต้องหาสมการความสัมพันธ์ที่ทำให้ผู้ผลิตแผงวงจรยอมรับในการใช้เครื่อง X-ray จำลองและคำนวณเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศที่อยู่ในรูของแผงวงจร โดยมีการประยุกต์และนำการวิเคราะห์การถดถอยมาใช้ในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศจากการ X-ray เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ของโพรงอากาศจากการทำการตัดขวางจริง ทั้งนี้เนื่องจากการทำการตัดขวางต้องใช้ทรัพยากรค่อนข้างมากและประกอบกับต้องใช้เครื่องจักรในการทำงานให้กับผลิตภัณฑ์อื่นและต้องการสูญเสียแผงวงจรในจำนวนที่น้อยที่สุด ทางโรงงานกรณีศึกษาจึงมีเงื่อนไขที่จะใช้จำนวนตัวอย่างในการทำการตัดขวางให้น้อยที่สุดเบื้องต้นทางโรงงานกรณีศึกษากำหนดจำนวน 8 ตัวอย่างก่อน ดังนั้นการวิจัยจึงต้องทำการพิสูจน์ด้วยว่าจำนวน 8 ตัวอย่างนี้สามารถยอมรับได้ในการสร้างสมการการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายได้หรือไม่ หรือจำนวนที่เหมาะสมและยอมรับได้ระหว่างโรงงานกรณีศึกษาและผู้ผลิตแผงวงจรคือเท่าใด

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

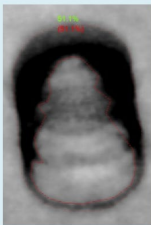
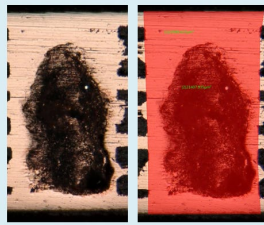
1. เพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมกับเงื่อนไขในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาและผู้ผลิตแผงวงจร
2. เพื่อสร้างสมการที่ยอมรับได้และใช้ทำนายเปอร์เซ็นต์ค่าโพรงอากาศของแผงวงจรโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศจากการ X-ray

3. ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Microelectronics)

ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Microelectronics) คือหนึ่งในสาขาย่อยของอิเล็กทรอนิกส์โดยไมโครอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีความสัมพันธ์กับการศึกษาและการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีขนาดเล็กมาก [5] โดยตัวอย่างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ ไดโอด ชิปปะมวลผล เป็นต้น กระบวนการหลักของไมโครอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบไปด้วย 1) กระบวนการติด

ชิป (Die attach) [6] 2) การเชื่อมวงจรด้วยลวด (Wire bonding) [7] และ 3) การประกอบชิ้นสุดท้าย [8] ผลผลิตของโรงงานกรณีศึกษาเป็นผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาเองเป็นผู้รับจ้างผลิตและต้องทำหน้าที่ในการปกป้องลิขสิทธิ์ของลูกค้า ดังนั้นในการวิจัยนี้จะไม่สามารถแสดงรูปหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของผลิตภัณฑ์ได้ ยกเว้นตัวอย่างรูป X-ray และรูปหลังการตัดขวาง ขนาดของแผงวงจรที่ใช้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ความกว้าง 100 มิลลิเมตร และความยาว 200 มิลลิเมตร โดยกระบวนการหลักคือจะมีการหยอดกาวที่มีส่วนผสมของโลหะเงินและทำการวางแผนชิปลงบนกาว โดยขนาดของตัวชิปคือ 3×4 มิลลิเมตร จากนั้นนำเข้าไปอบเพื่อให้ตัวชิปกับตัวบอร์ดแผงวงจรติดกัน หลังจากนั้นก็นำเข้าสู่กระบวนการเชื่อมวงจรด้วยลวดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ไมครอน เสร็จแล้วพนักงานจะทำการตรวจสอบโดยใช้กล้องขนาดกำลังขยาย 30 เท่า เพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องต่าง ๆ ในตัวงาน และทำการหยอดกาวเพื่อปิดฝาตัวงาน เสร็จแล้วนำเข้าเครื่องทดสอบสำหรับตัวงานที่ได้รับผลว่าผ่านก็จะนำส่งให้กับลูกค้าเป็นขั้นตอนสุดท้าย ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นหนึ่งในชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านการสื่อสาร ทั้งนี้แผงวงจรดังกล่าวได้อ้างอิงมาตรฐาน IPC Standard ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยมาตรฐานที่ใช้ในกรณีนี้คือ IPC Class 2 โดยหัวข้อที่ใช้คือ IPC 6018C [9] ซึ่งในรูปปิดของแผงวงจรจะต้องมีวัสดุเติมเต็มอยู่อย่างน้อย 60% ของรู หรือในทางกลับกันก็จะมีโพรงอากาศในรูที่สามารถยอมรับได้ไม่เกิน 40% ทั้งนี้ไม่สามารถที่จะมองเห็นวัสดุที่อยู่ในรูด้วยการมองด้วยตาได้เนื่องจากรูนั้นถูกปิดอยู่ ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาสามารถดูตำแหน่งของรูได้จากแบบของแผงวงจร โดยใช้เครื่อง X-ray ที่มีความละเอียดระดับ 4K ซึ่งเป็นเครื่อง X-ray รุ่นที่มีความละเอียดสูงสุดในปัจจุบันที่โรงงานกรณีศึกษาใช้อยู่และเทคนิคดังกล่าวมีการนำมาใช้เพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องของตัวแผงวงจรเช่นกัน [10] รวมถึงมีการนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย [11] และเทคนิคการตัดขวางก็ถูก

นำมาใช้ในการดูปริมาณโพรงในรูปของตัวแปรจริงเช่นกัน [12] ซึ่งทางผู้ผลิตแผงวงจรยอมรับในวิธีการการตัดขวางแล้วทำการวัดมากกว่า โดยรูปที่ 1 จะแสดงตัวอย่างรูปโพรงอากาศในรูปแผงวงจรโดยใช้เครื่อง 4K X-ray เปรียบเทียบกับการใช้กล้อง Digital Microscope ถ่ายรูปหลังจากการตัดขวาง อย่างไรก็ตามทางผู้ผลิตแผงวงจรก็สามารถยอมรับวิธีการอื่นได้เช่นกัน หากสามารถแสดงได้ว่าสามารถใช้แทนวิธีการตัดขวางได้ โดยการวิจัยจะทำการนำแผงวงจรมาทำการ X-ray และทำการจำลองโพรงอากาศในรูปเสร็จแล้วทำการส่งแผงวงจรนั้นให้หน่วยงานต่อไปในการทำการตัดขวางแล้ววัดและส่งข้อมูลกลับมาโดยดูจากชิ้นงานจริงหลังทำการตัดขวางแล้วว่ามีเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศคิดเป็นเท่าไรของรูปในแผงวงจรนั้น จากนั้นทำการคำนวณเพื่อทดสอบว่าจำนวนตัวอย่างที่น้อยที่สุดตามเงื่อนไขที่ยอมรับได้เป็นเท่าไร โดยในเบื้องต้นให้ใช้จำนวน 8 แผงวงจรในขั้นแรก จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเพื่อทำการสร้างสมการในลำดับถัดไป

X-ray image	Optical image from Cross section
	
Percent void is 51.10%	Percent void is 48.22%

รูปที่ 1 ตัวอย่างแสดงรูปโพรงอากาศในรูปแผงวงจรโดยใช้เครื่อง 4K X-ray เปรียบเทียบกับการใช้กล้อง Digital Microscope ถ่ายรูปหลังจากการตัดขวาง

4. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

(Simple Linear Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นสถิติที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) และตัวแปรตาม (Dependent Variable) รวมไปถึงจนถึงการสร้างสมการเชิงเส้นตรงที่สามารถใช้ในการทำนายตัวแปรตามที่สนใจในระบบได้

[13] ทั้งนี้สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon \quad (1)$$

โดย Y_i คือ ตัวแปรตาม

X_i คือ ตัวแปรอิสระ

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์

ϵ_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

ข้อตกลงเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายคือ 1) ค่าคาดหวังของค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ 2) ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ 3) ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน 4) ค่าความคลาดเคลื่อนไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ทั้งนี้การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายใช้การทดสอบแบบ Chi-square ที่ Degree of Freedom (df) = p โดย p คือจำนวนตัวแปรอิสระ โดยสามารถเขียนสมการเพื่อการทดสอบสมมติฐานได้ดังสมการที่ (2) และสมการที่ (3)

$$H_0: \beta_i = 0 \quad (2)$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \quad (3)$$

หากการทดสอบมีนัยสำคัญทางสถิติหรือยอมรับ H_1 แสดงว่าสมการการทำนายมีอยู่และตัวแปรอิสระสามารถทำนายตัวแปรตามได้

ทั้งนี้การหาจำนวนตัวอย่างก็เป็นหนึ่งในโจทย์ปัญหาหลักที่ทางโรงงานกรณีศึกษาต้องการวิจัยเนื่องจากจำนวนตัวอย่างในการนำไปทำการตัดขวางมีอย่างจำกัดและต้องการเสียแผงวงจรจำนวนน้อยที่สุดในการนำไปทำการตัดขวาง โดยสมการในการคำนวณจำนวนตัวอย่างเป็นไปดังสมการที่ (4) [14]

$$N = \left[\frac{(Z_{\alpha/2} + Z_\beta) \sigma_y}{\lambda_1 \sigma_x} \right]^2 \quad (4)$$

โดย N คือ จำนวนตัวอย่าง

α คือ Probability of type I error

β คือ Probability of type II error

σ_x คือ ค่าความเบี่ยงเบนของตัวแปรอิสระ

σ_y คือ ค่าความเบี่ยงเบนของตัวแปรตาม

λ_1 คือ ค่าความชันของสมการเชิงเส้น

ในงานวิจัยนี้ใช้ α ที่ 0.05 และใช้ β ที่ 0.2 [15] ซึ่งค่าดังกล่าวได้นำเสนอให้กับโรงงานกรณีศึกษาและทางโรงงานกรณีศึกษาได้ทำการประชุมกับผู้ผลิตแผงวงจรและยอมรับค่าตามสถิติที่นำเสนอ ทั้งนี้ผู้ผลิตแผงวงจรได้ให้เพิ่มค่า Adjusted R-square ที่ยอมรับได้คือมากกว่า 80% ถึงจะยอมรับสมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อใช้ในการทำนายและยอมรับคืนแผงวงจรที่ไม่ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดคือมีค่าโพรงอากาศมากกว่า 40% โดยค่า $Z_{0.05/2} = 1.96$ และค่า $Z_{(1-0.2)} = 0.84$

ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีการนำการถดถอยเชิงเส้นมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในหลายด้าน เช่น ใช้ในการทำนายการไหลของกระแสไฟในการใช้งานแต่ละช่วง [16] ใช้ในการทำนายเครื่องจักรก่อนที่จะเสื่อมสภาพเพื่อทำการซ่อมบำรุงก่อนเกิดการหยุดการทำงาน [17] ใช้ในการทำนายคุณภาพของน้ำ [18] ใช้ในการทำนายคุณภาพของการผลิตท่อ [19] เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้เป็นครั้งแรกในการหาความสัมพันธ์ของการวัดในสองวิธีและนำสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายมาใช้ในการคัดแยกงานที่ไม่ได้มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ออกได้โดยไม่ต้องทำลาย

5. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นแรกนำแผงวงจรมาทำการ X-ray โดยใช้เครื่อง 4K X-ray (Nordson Dage รุ่น Quadra 7, Dage Precision Industries Limited, Buckinghamshire, United Kingdom) พร้อมทั้งวัดค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศโดยเครื่อง X-ray เมื่อเสร็จแล้วจะนำแผงวงจรดังกล่าวส่งไปให้หน่วยงานที่ทำหน้าที่ตัดขวางดำเนินการตัดผ่านตรงกลางของรูแผงวงจร จากนั้นจะใช้กล้อง Digital Microscope (Keyence รุ่น VHX-6000, Keyence Corporation, Osaka, Japan) ทำการถ่ายภาพพร้อมทั้งคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์

โพรงอากาศเทียบกับปริมาตรของรู โดยค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศเทียบกับปริมาตรภายในรูของแผงวงจรแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศเทียบกับปริมาตรภายในรูของแผงวงจร

PCBA	X-ray	Digital Microscope (Cross section)
1	51.10%	48.22%
2	64.00%	54.62%
3	44.30%	34.36%
4	41.30%	38.15%
5	53.70%	45.13%
6	36.90%	31.58%
7	34.10%	28.54%
8	37.20%	25.85%

จากนั้นทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายโดยใช้โปรแกรม Spreadsheet ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวมีลิขสิทธิ์และเป็นของโรงงานกรณีศึกษา โดยค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของ X-ray เป็นตัวแปรอิสระ (X) และค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของการวัดหลังจากทำการตัดขวางเป็นตัวแปรตาม (Y) เมื่อได้ค่าความชันของสมการเชิงเส้นแล้ว ก็ทำการคำนวณหาว่าจำนวนตัวอย่างที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้เป็นลำดับถัดไป

6. ผลการทดลอง

ผลของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายโดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 1 ทำให้ทราบค่าความชันคือ 0.943 จึงนำค่าดังกล่าวไปคำนวณจำนวนตัวอย่างดังสมการที่ (4) พบว่า จำนวนตัวอย่างที่ต้องการคือ 8.68 แผงวงจร กล่าวได้ว่าต้องมีตัวอย่างอย่างน้อย 9 แผงวงจร ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงทำการเพิ่มตัวอย่างมาอีก 1 ตัว ในตารางที่ 2 จะแสดงค่าโพรงอากาศของทั้ง 9 แผงวงจร พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และข้อมูลชุดนี้จะถูกนำไปใช้ในการหาสมการถดถอย

เชิงเส้นอย่างง่ายเพื่อใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศในรูของแผงวงจร

โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์จากการ X-ray เป็นตัวแปรอิสระ

ผลของการคำนวณสมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายสามารถสรุปสถิติที่สำคัญเพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าสมการเชิงเส้นอย่างง่ายดังกล่าวสามารถยอมรับได้เพื่อใช้ทำนายตามเงื่อนไขหรือไม่แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของทั้งสองวิธี พร้อมทั้ง ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

PCBA	X-ray	Digital Microscope (Cross section)
1	51.10%	48.22%
2	64.00%	54.62%
3	44.30%	34.36%
4	41.30%	38.15%
5	53.70%	45.13%
6	36.90%	31.58%
7	34.10%	28.54%
8	37.20%	25.85%
9	42.30%	32.48%
ค่าเฉลี่ย	44.99%	37.66%
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.096	0.097

ตารางที่ 3 สรุปสถิติเพื่อใช้ในการตัดสินใจ

ค่าทางสถิติ	ค่าที่ได้จาก สมการ
Adjusted R-Square	88.18%
R-Square (Predict)	84.42%
ค่า P-Value ของสมการการถดถอย	0.00
ค่า P-Value ของสัมประสิทธิ์การถดถอย	0.00

ทั้งนี้ค่า P-value ของสมการการถดถอยและค่า P-value ของสัมประสิทธิ์การถดถอยมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีสมการการถดถอย (Rejected $H_0: \beta_1 = 0$) ดังแสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA

ANOVA	df	SS	MS	F	P-Value
Regression	1	0.067	0.067	60.687	0.00
Residual	7	0.008	0.001		
Total	8	0.075			

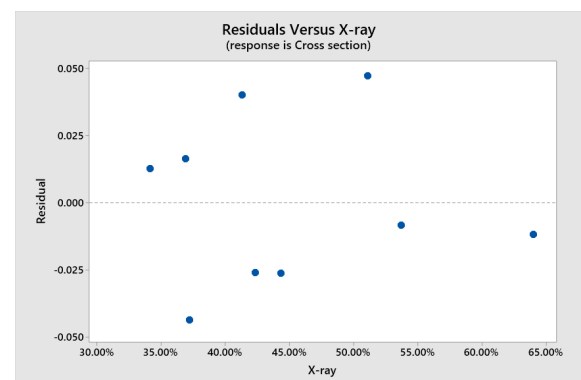
ค่าผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0.000 ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อน ไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งตัวแปรอิสระและตัวแปรตามดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนแจกแจงแบบปกติดังแสดงในรูปที่ 4 สมการถดถอยเชิงเส้นสามารถใช้การอธิบายหรือทำนายตัวแปรตามได้ 88.18% ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ตกลงกับทางผู้ผลิตแผงวงจรที่ ค่า Adjusted R-Square ต้องมีค่ามากกว่า 80% ทั้งนี้ค่า R-Square (Predict) ก็มีค่ามากกว่า 80% เช่นกัน โดยสมการถดถอยเชิงเส้นดังกล่าวสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$\hat{Y} = 0.95X - 0.05 \quad (5)$$

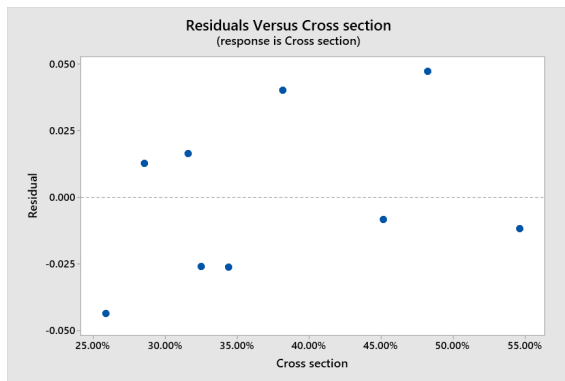
โดย $\hat{Y}$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศจากการพยากรณ์

X คือ ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของการ X-ray

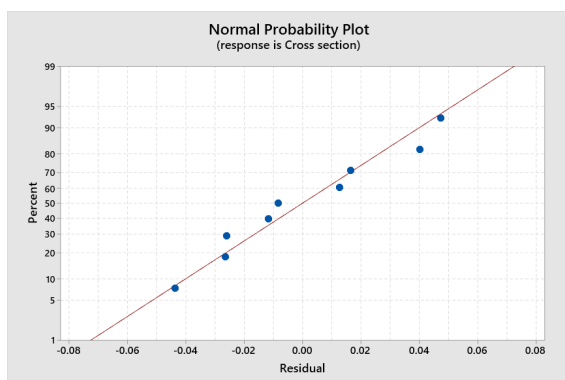
เมื่อนำข้อมูลค่าความชื้นมาคำนวณหาจำนวนตัวอย่างอีกครั้งจะได้ค่าเท่ากับ 8.78 ซึ่งจำนวนตัวอย่าง 9 แผงวงจรยังเพียงพอและสามารถลดต้นทุนในการทำ การตัดขวางและทำให้เสียจำนวนแผงวงจรจากการตัดขวางน้อยที่สุดได้



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับตัวแปรอิสระ



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับตัวแปรตาม



รูปที่ 4 กราฟแสดงการแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อน

7. อภิปรายผลการทดลอง

โจทย์การวิจัยทั้งสองข้อสามารถตอบคำถามการวิจัยได้ดังนี้

1) จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายคือจำนวน 9 แผงวงจร โดยจำนวนดังกล่าวสามารถยอมรับได้ตามหลักการการคำนวณจำนวนตัวอย่างและได้รับการยอมรับจากโรงงานกรณศึกษาและผู้ผลิตแผงวงจร เป็นการลดต้นทุนในการทำการตัดขวางและจำนวนแผงวงจรที่จะต้องทำลาย

2) สมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายสามารถยอมรับได้ตามเงื่อนไขของทั้งโรงงานกรณศึกษาและผู้ผลิตแผงวงจร โดยสามารถใช้ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศจากการ X-ray มาทำการแทนค่าในสมการการถดถอยอย่างง่ายในสมการที่ (3) เพื่อนำผลที่ได้ดังกล่าวมาทำการตัดแยกแผงวงจรที่ไม่ได้มาตรฐานออกและส่งกลับให้กับผู้ผลิตแผงวงจรต่อไป โดยผลการทดลองดังกล่าวทำให้

โรงงานกรณศึกษามีแผงวงจรใช้ในการผลิตได้ต่อไปโดยไม่กระทบกับแผนการส่งมอบงานให้กับลูกค้า

8. สรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าสมการการถดถอยสามารถใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศได้ (R-square (Predict) 84.42%) โดยสมการดังกล่าวเป็นที่ยอมรับตามหลักการทางสถิติ (P-Value ของ Regression model < 0.05) และตอบ โจทย์ตามความต้องการของโรงงานกรณศึกษาและผู้ผลิตแผงวงจรในการคัดแยกแผงวงจรที่ไม่ได้มาตรฐานออกก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ทั้งนี้ผู้ผลิตแผงวงจรแจ้งทางโรงงานกรณศึกษาว่าได้ทำการปรับปรุงกระบวนการแล้ว เนื่องจากปัญหาในการตั้งค่าเครื่องจักรก่อนการผลิตในตอนเริ่มต้น จึงทำให้มีรุ่นการผลิตที่จะต้องทำการคัดออกเป็นจำนวนหนึ่ง โดยทางผู้ผลิตจะแจ้งรุ่นที่ผลิตในช่วงเวลาดังกล่าวให้กับโรงงานกรณศึกษาเป็นทางการต่อไป โดยการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้สถิติเพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาในด้านอุตสาหกรรม ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นและสามารถลดต้นทุนให้กับทางโรงงานกรณศึกษาได้และยังสามารถมีแผงวงจรใช้ในการผลิตได้ต่อไป เนื่องจากในสถานการณ์โควิด 19 ทำให้วัตถุดิบมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการผลิตในช่วงที่การส่งมอบมีความสำคัญสูง ทั้งนี้หากในอนาคตโรงงานกรณศึกษายังพบของเสียอยู่เป็นประจำ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมกับทางผู้ผลิตเครื่อง X-ray ในการเพิ่มการวัดและส่งผ่านข้อมูลลงในสมการได้โดยอัตโนมัติและสามารถคัดแยกได้ในทันที ซึ่งในปัจจุบันยังต้องใช้พนักงานในการทำการ X-ray วัดตำแหน่งแล้วทำการแทนค่าเพื่อตัดสินใจอีกครั้งหนึ่งในสมการแล้วจึงทำการคัดแยกงาน

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลจากโรงงานกรณศึกษา ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

รัตนโกสินทร์ในการสนับสนุนส่งเสริมให้เกิดงานวิจัย
และเผยแพร่การตีพิมพ์ในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Iwai, K. Kakushima and H. Wong, "Challenges for future semiconductor manufacturing," *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 43–81, 2006.
- [2] L. Errighi and C. Bodwell, "Global trends in the E&E industry," *Electrical and electronics manufacturing in Thailand: Exploring challenges and good practices in the workplace*, Bangkok, Thailand: International Labor Organization, 2017, ch. 2, pp. 2–4.
- [3] T. F. Edgar, S. W. Butler, W. J. Campbell et al., "Automatic control in microelectronics manufacturing: Practices, challenges, and possibilities," *Automatica*, vol. 36, no. 11, pp. 1567–1603, 2000, doi: 10.1016/S0005-1098(00)00084-4.
- [4] X. Wu and W. Sha, "Experimental study of the voids in the electroless copper deposits and the direct measurement of the void fraction based on the scanning electron microscopy images," *Applied Surface Science*, vol. 225, no. 7, pp. 4259–4266, 2009, doi: 10.1016/j.apsusc.2008.11.015.
- [5] R. Noyce, "Microelectronics," *Scientific American*, vol. 237, no. 3, pp. 62–69, 1977.
- [6] H. Zhang, J. Minter and N. C. Lee, "A Brief Review on High-Temperature, Pb-Free Die-Attach Materials," *Journal of Electronic Materials*, vol. 48, pp. 201–210, 2019, doi: 10.1007/s11664-018-6707-6.
- [7] H. George, "The Technical Introduction to the Third Edition," in *Wire Bonding in Microelectronics*, 3rd ed. New York, NY, USA.: McGraw-Hill, 2010, ch. 1, sec. 1.1, pp. 2–3.
- [8] B. Razavi, "Introduction to microelectronics," in *Fundamental of microelectronics: with robotics and bioengineering application*, 3rd ed., California, CA, USA.: John Wiley & Sons Inc., 2021, ch. 1, sec. 1.1, pp. 1–2.
- [9] *Qualification and Performance Specification for High Frequency (Microwave) Printed Boards*, IPC-6018, 2016.
- [10] X. Huang, S. Zhu, X. Huang et al., "Detection of plated through hole defects in printed circuit board with X-ray," presented at the 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Changsha, China, Aug. 11–14, 2015, doi: 10.1109/ICEPT.2015.7236817.
- [11] M. Pacheco and D. Goyal, "X-ray computed tomography for non-destructive failure analysis in microelectronics," presented at 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium, Anaheim, CA, USA., Jun. 17, 2010, doi: 10.1109/IRPS.2010.5488820.
- [12] W. P. Dow and H. H. Chen, "A novel copper electroplating formula for laser-drilled micro via and through hole filling," *Circuit World*, vol. 30, no. 3, pp. 33–36, 2004, doi: 10.1108/03056120410520597.
- [13] D. Montgomery, E. Peck and G. Vining, "Simple Linear Regression," *Introduction to Regression Analysis*, New Jersey, NJ, USA.: John Wiley & Sons Inc., 2006, ch. 2, sec. 2.1, pp. 12–13.
- [14] W. D. Dupont and W. D. Plummer, "Power and Sample Size Calculations for Studies Involving Linear Regression," *Controlled Clinical Trials*, Vol. 19, no. 6, pp. 589–601, 1998, doi: 10.1016/s0197-2456(98)00037-3.
- [15] S. W. Choi and D. H. D. Tran, "Calculating sample size Alpha, Beta, Mu and Sigma – it's all Greek," *Journal of the Association of Anaesthetists*, vol. 71, no. 4, pp. 462–264, 2016, doi: 10.1111/anae.13369.

- [16] T. Hong, M. Gui, M. E. Baran and H. L. Willis, "Modeling and forecasting hourly electric load by multiple linear regression with interactions," presented at IEEE PES General Meeting, Minnesota, MN, USA, Jul. 25–29, 2010, doi: 10.1109/PES.2010.5589959.
- [17] T. Abbasi, K. H. Lim, N. S. Rosli, I. Ismail and R. Ibrahim, "Development of Predictive Maintenance Interface Using Multiple Linear Regression," presented at International Conference on Intelligent and Advanced System (ICIAS), Kuala Lumpur, Malaysia, Aug 13–14, 2018, doi: 10.1109/ICIAS.2018.8540602.
- [18] A. K. Kada, V. M. Wagh, A. A. Muley, B. N. Umrikar and R. N. Sankhua, "Prediction of water quality index using artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Shivganga River basin, India," *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 5, pp. 951–962, 2019, doi: 10.1007/s40808-019-00581-3.
- [19] Garcíá, J. Sánchez, L. Rodríguez-Picón, L. Mendez and H. Ochoa, "Using regression models for predicting the product quality in a tubing extrusion process," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 30, pp. 2535–2544, 2019, doi: 10.1007/s10845-018-1418-7.

การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้ เหลือเศษน้อยที่สุด

Application of Building Information Modeling to Analyze Rebar Cutting Patterns with Minimum Waste

ณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว¹, วิทยา ศรีสมบุญ^{2,*} และ นุชิดา เพ็ชรเทศ³

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา พังงาสุขลา ศรีราชา ชลบุรี 20230

²คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เชียงเครือ

เมืองสกลนคร สกลนคร 47000

³บริษัท 프리สเตรสซิ่ง เทคนิค (ประเทศไทย) จำกัด ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Narongrit Wongwai¹, Wittaya Srisomboon^{2,*} and Nuthida Phetthet³

¹Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Thung Sukhla, Sriracha,
Chonburi, 20230, Thailand

²Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, Chiang
Khruca, Mueang Sakon Nakhon, Sakon Nakhon, 47000, Thailand

³Prestressing Technique (Thailand) Company Limited, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding Author E-mail: fsewys@ku.ac.th

Received: Aug 18, 2021; **Revised:** Oct 18, 2021; **Accepted:** Oct 19, 2021

บทคัดย่อ

ปัญหาที่พบในงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กคือปริมาณเศษเหล็กที่สูงเสียเป็นจำนวนมากจากการใช้รูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่ไม่มีประสิทธิภาพส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของโครงการสูงขึ้นและการขาดดุลทางเศรษฐกิจของประเทศจากการนำเข้าเหล็กเส้นที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี งานวิจัยนี้นำเสนอการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นจากแบบจำลองสารสนเทศอาคารกับแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุด การศึกษาแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือส่งออกข้อมูลเหล็กเส้นจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ขั้นตอนที่สองคือการวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุด และขั้นตอนที่สามคือการนำข้อมูลการตัดเหล็กเส้นกลับเข้าสู่พารามิเตอร์ของชิ้นส่วนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมก่อสร้างในด้านการช่วยลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากกระบวนการตัดให้น้อยลง ส่งผลให้การใช้ทรัพยากรมีประสิทธิภาพมากขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้าง ผลของจำนวนเศษเหล็กเส้นที่น้อยลงยังช่วยลดปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจากงานก่อสร้างและปัญหาการขโมยเศษเหล็กเส้นโดยคนงานก่อสร้าง นอกจากนี้งานวิจัยนี้มีความสำคัญทางวิชาการในแง่การพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถค้นหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากการตัดได้มากขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยสามารถใช้คำนวณปัญหาที่มีเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดหลายความยาว และการเชื่อมโยงข้อมูลการตัดเหล็กเส้นกลับไปยังกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารทำให้ลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการทำงาน

คำสำคัญ: อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, เศษเหล็กน้อยที่สุด, แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

Abstract

The problem encountered in constructing reinforced concrete buildings is a large amount of rebar scrap wasted due to the inefficient use of rebar cutting patterns. As a result, the project costs are higher, and the country's economic deficit from rebar imports increases each year. This study presents the interconnection of two data sources, Building Information Modeling (BIM) and Linear Programming Model, to analyze and find effective rebar cutting patterns to minimize rebar waste and cost. Rebar data from BIM was exported and analyzed the cutting pattern to minimize the scrap. Later the rebar cutting data were imported into the parameters of BIM elements. The results from the study showed that rebar scraps were successfully reduced from the cutting process. This study had at least two significances. In terms of construction, it effectively used resources, reduced the construction cost, and avoided the rebar waste smuggling problem from the construction site. In terms of educational value, this study can also be used to calculate standard length rebar, which is cut into several lengths. In addition, importing the cutting data back to the BIM model can reduce the time and mistakes in the operation.

Keywords: Reinforced Concrete Buildings, Minimum Rebar Waste, Building Information Modeling, Linear Programming Model

1. บทนำ

ปัญหาใหญ่ที่พบในงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กคือโครงสร้างมักถูกออกแบบให้ใช้เหล็กเส้นที่มีหลายขนาดความยาว ซึ่งต้องสั่งซื้อเหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน (เหล็กเส้นยาว 10 หรือ 12 เมตร) มาตัดตามความยาวที่ต้องการ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เหลือเศษเหล็กจากการตัดเป็นจำนวนมากอันส่งผลกระทบให้ค่าใช้จ่ายของโครงการสูงขึ้น นอกจากนี้การปฏิบัติงานจริงของโครงการก่อสร้างในประเทศไทยส่วนใหญ่จะให้ช่างเหล็กเป็นผู้รับผิดชอบในการวางแผนการตัดเหล็กเส้นแทนวิศวกรโครงการ ดังนั้นประสิทธิภาพของแผนการตัดเหล็กเส้นจึงขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของช่างเหล็กเป็นหลัก ซึ่งการวางแผนตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้างให้เหลือเศษน้อยที่สุดเป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อนสูง หากวางแผนไม่ดีจะส่งผลให้เหลือเศษเหล็กที่ไม่สามารถใช้ในโครงสร้างต่อไปได้ แม้ว่าปริมาณการใช้เหล็กในอุตสาหกรรมก่อสร้างจะปรับตัวลดลงจากผลกระทบของสถานการณ์ระบาดของโควิด-19 แต่กระนั้นข้อมูลในปี 2563 ยังแสดงให้เห็นว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยใช้ปริมาณเหล็กเส้นสูงถึง 3.74 ล้านตัน และมีสัดส่วนการนำเข้าสูงถึงร้อยละ 63.14 [1] จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากการตัดโดยทั่วไปคิดเป็นร้อยละ 8.9 [2] และโครงการก่อสร้างที่มี

ระบบควบคุมการตัดเหล็กเส้นที่ดีสามารถลดปริมาณเศษเหล็กเส้นเหลือเพียงร้อยละ 6 [2] หากคิดปริมาณเศษเหล็กเส้นร้อยละ 5 จะมีปริมาณสูงถึง 1.87 แสนตันต่อปี เมื่ออ้างอิงข้อมูลราคาต่อหน่วยของเหล็กเส้นเฉลี่ย 20,000 บาทต่อตันปี จากกรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์ จะส่งผลให้มีมูลค่าความสูญเสียจากปริมาณเศษเหล็กสูงถึง 3,740 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นหากสามารถลดปริมาณเศษเหล็กดังกล่าวจะช่วยให้ประเทศไทยลดการนำเข้าเหล็กเส้นได้ถึง 1.18 ล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่าการขาดดุลทางเศรษฐกิจที่ลดลงได้ถึง 2,360 ล้านบาทต่อปี

ปัญหาการตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้างให้เหลือเศษน้อยที่สุดจัดอยู่ในรูปแบบปัญหาการตัดวัสดุคงคลังแบบหนึ่งมิติ (One-Dimensional Cutting Stock Problem) ซึ่งเป็นที่สนใจในการวิจัยอย่างต่อเนื่องมานานหลายทศวรรษซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางประกอบด้วย 1.แนวทางการตัดทีละชิ้น (Item-Oriented Approach) โดยพิจารณาการตัดวัสดุทีละชิ้นเรียงตามความยาวที่ต้องการ [3],[4] และ 2.แนวทางการหารูปแบบการตัด (Pattern-Oriented Approach) ซึ่งเป็นแนวทางที่งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นมากกว่าแนวทางแรก โดยเริ่มจากการสร้างรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Effective Cutting Pattern) ก่อน จากนั้นจึงคำนวณจำนวนเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ

เพื่อให้ได้ความยาวและจำนวนท่อนครบตามที่ต้องการ [5-7] อย่างไรก็ตามการหาคำตอบของแบบจำลองของปัญหาดังกล่าวเป็นไปได้ยากเนื่องจากจำนวนรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพมีจำนวนมากมาย โดยสามารถคำนวณได้ด้วยทฤษฎีการจัดหมู่ (Combination Theory) ตามสมการที่ (1)

$$C_r^n = \frac{(N+r-1)!}{(N-1)!r!} \quad (1)$$

อาทิเช่น ถ้าความยาวของเหล็กเส้นที่ต้องการ (N) มีจำนวน 20 ความยาว และจำนวนท่อนการตัดต่อรูปแบบ (r) มีจำนวน 5 ท่อน จะมีรูปแบบที่เป็นไปได้มากถึง 42,504 รูปแบบ จึงทำให้งานวิจัยที่ผ่านมาใช้แนวทางแบบฮิวริสติก (Heuristic Approach) ในขั้นตอนการหารูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ อาทิเช่น วิธี Random search algorithm [8] และวิธี Intensive search algorithm [9],[10] จึงอาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับการคำนวณปัญหาที่มีเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดหลายความยาว

อีกปัญหาหนึ่งของการตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้างคือ

การนำเหล็กเส้นที่ตัดแล้วไปคัดตามรูปทรงและเสริมในตำแหน่งที่ถูกต้องตามแบบ แม้ว่าจะมีรูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่มีประสิทธิภาพ แต่หากเกิดความผิดพลาดในการเสริมเหล็กก็ส่งผลให้เกิดความสูญเสียเหล็กเพิ่มเติมแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมา [11-13] ได้นำเสนอกระบวนการส่งออกข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling : BIM) เพื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหลือน้อยที่สุด แต่ไม่ได้นำเสนอแนวทางการเชื่อมโยงข้อมูลของเหล็กที่ตัดแล้วกลับไปยังแบบจำลองสารสนเทศอาคาร จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปวิธีการและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมาได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นจากแบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือน้อยที่สุดโดยพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหารูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นรวมทั้งพัฒนาแนวทางการเชื่อมโยงเชื่อมโยงข้อมูลของเหล็กเส้นที่ตัดแต่ละท่อนกลับไปยังชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

ตารางที่ 1 วิธีการและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

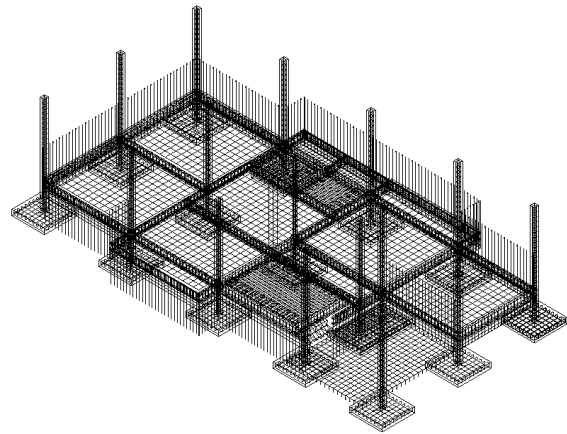
งานวิจัย	วิธีการ	ข้อจำกัด
[3],[4]	ใช้แนวทางการตัดทีละชิ้น (Item-Oriented Approach) ด้วยวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เช่น Bin Packing Algorithm, Custom Heuristic Algorithm	- อาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด - ใช้เวลานานในการคำนวณเนื่องจากต้องคำนวณการตัดทีละชิ้น
[5-10]	ใช้แนวทางการหารูปแบบการตัด (Pattern-Oriented Approach) ด้วยวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เช่น Random search algorithm, Intensive search algorithm เพื่อหารูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพและใช้วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) เพื่อหาจำนวนการตัดซ้ำ	- อาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด - คำตอบที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งไม่เท่ากันสม่ำเสมอ (Inconsistent) - ไม่ได้พิจารณาการใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานหลายความยาวมาตัดเพื่อช่วยเพิ่มโอกาสในการหาคำตอบที่เหมาะสมได้มากขึ้น
[11-13]	ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในการส่งออกข้อมูลเหล็กเส้นมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือน้อยที่สุด	ไม่ได้นำเสนอการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นที่ตัดกลับไปยังแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงาน เช่น ตำแหน่งการเสริมเหล็ก และรูปแบบการตัดเหล็ก

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยใช้บ้านพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ชั้น พื้นที่ 210 ตารางเมตร เป็นกรณีศึกษา แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

2.1. กรอบแนวคิดการเชื่อมโยงข้อมูล

ข้อมูลเป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) หากสามารถพัฒนากลไกการเชื่อมโยงข้อมูลองค์ประกอบของอาคารซึ่งประกอบด้วย [14] ข้อมูลกราฟิก (Graphic) ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ เช่น ขนาด ระยะ สี วัสดุ และข้อมูลที่ไม่ใช่กราฟิก (Non-Graphic) เช่น ราคา รุ่น ผู้ผลิต รวมทั้งความสัมพันธ์ด้านพารามิเตอร์เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะให้เป็นอัตโนมัติและลดการทำงานด้วยบุคคล จะส่งผลให้ข้อมูลมีความถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว นำไปสู่การวิเคราะห์และใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมิติ โดยแบบจำลอง BIM ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สร้างจากโปรแกรม Autodesk Revit 2020 เวอร์ชันเพื่อการศึกษา [14] ด้วยระดับการพัฒนา (Level of Development : LOD) ตามขั้นตอนการจัดทำแบบก่อสร้าง (Construction Documents) โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่เดิม เช่น ขนาดและตำแหน่งของโครงสร้างคอนกรีต (Geometry) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก รูปแบบการเสริม (Layout Rule) จำนวน ระยะห่าง ความยาวรวมทั้งหมดของเหล็กเส้น รูปทรงของเหล็กเสริม (Shape) ประเภทของโครงสร้างคอนกรีต (Host_Category) และข้อมูลพารามิเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาใหม่ ได้แก่ รหัสประจำชิ้นส่วนเหล็กเส้น (Rebar_ID) รหัสประจำชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต (Host_ID) รูปแบบการตัดเหล็กเส้น จาก ความยาว 10 เมตร (L10_pattern) และความยาว 12 เมตร (L12_pattern) แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ของโครงสร้างคอนกรีต (Host) กับเหล็กเส้นถูกพัฒนาให้เชื่อมโยงข้อมูลอัตโนมัติด้วยความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial Relationship) ระหว่างชิ้นส่วนด้วยโปรแกรม Dynamo [15],[16] เป็นซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส (Open Source) ซึ่งเป็นแนวทางการเขียนโปรแกรมด้วยภาพ (Visual Programming Language) ที่สามารถเชื่อมต่อข้อมูล



รูปที่ 1 แบบจำลอง BIM เหล็กเส้นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

โดยตรงกับพารามิเตอร์ของทุก ๆ ชิ้นส่วนในอาคาร ทำให้สามารถเพิ่ม ลบ แก้ไข และปรับปรุงค่าของพารามิเตอร์ในฐานข้อมูลในโปรแกรม Autodesk Revit ได้ Dynamo แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1.Input 2.Node และ 3.Output โดยมี wire เชื่อมทั้งสามส่วนเข้าด้วยกัน งานวิจัยนี้ใช้ Node คำสั่งที่สำคัญ คือ Properties.RebarHostElement จาก Structural Design Dynamo Package ในการระบุรหัสประจำชิ้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตให้กับเหล็กเส้นเพื่อใช้สำหรับการอ้างอิงข้อมูล ขนาดและตำแหน่ง ซึ่งจากเดิมมีการระบุเพียงประเภทของโครงสร้างคอนกรีตที่เหล็กเส้นนั้น ๆ เสริมอยู่เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าเหล็กเส้น เสริมอยู่โครงสร้างใด และตำแหน่งไหนของอาคาร แสดงดังรูปที่ 2

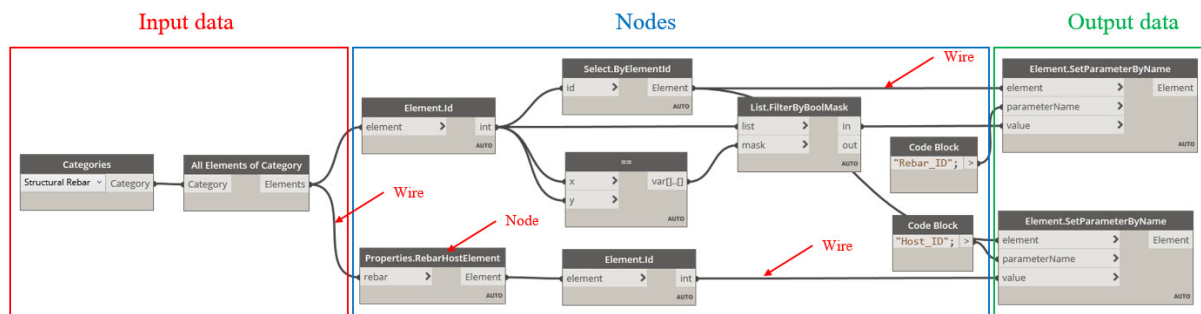
การเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นทั้งการส่งออกข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อใช้ในโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหลือน้อยที่สุด และการนำเข้าข้อมูลเหล็กเส้นกลับเข้าสู่แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) อยู่ในรูปแบบโปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel ใช้โปรแกรมเสริม (Plugin) บน Autodesk Revit เป็นเครื่องมือสำคัญในการแปลง เชื่อมโยง และปรับปรุงข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3

2.2. การส่งออกข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

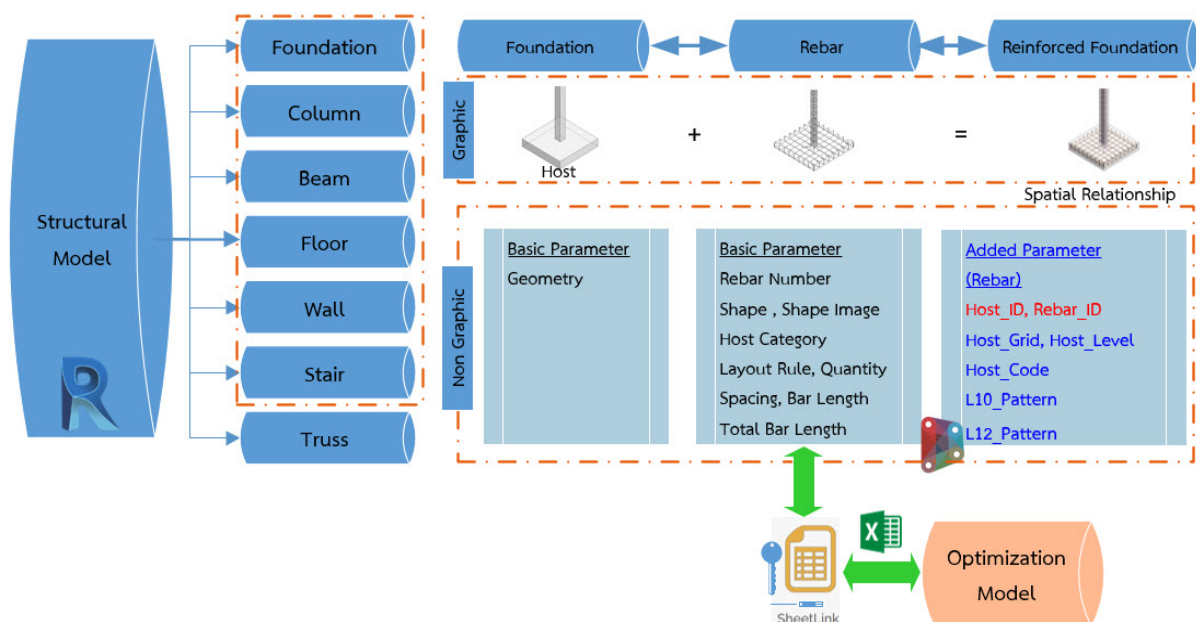
หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว จะมีการจัดการข้อมูลเหล็กเส้นในรูปแบบตาราง

(Schedules) ในโปรแกรม Autodesk Revit แสดงดัง ตารางที่ 2 เพื่อนำไปใช้ในการจำลองโปรแกรมเชิงเส้น โดยใช้โปรแกรมเสริมชื่อ SheetLink พัฒนาโดยทีม DiRoots [17] เป็นโปรแกรมสาธารณะสิทธิ์ (Freeware) สามารถส่งออกข้อมูล เช่นข้อมูลแบบจำลอง คำอธิบายประกอบ (Annotation) ประเภท (Categories) ชิ้นส่วน (Elements) และ ตาราง (Schedules) จากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ไปยังโปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel และนำเข้าข้อมูลกลับมาปรับปรุง (Update) ให้กับแบบจำลองได้อย่างง่ายดายแสดงดังรูปที่ 4 ข้อมูลที่ส่งออกแบ่งเป็น 2 กลุ่มประกอบด้วย 1.ข้อมูลของโครงสร้างคอนกรีต

ได้แก่ ประเภทของโครงสร้างคอนกรีต (Host_Category) รหัสประจำชิ้นส่วน (Host_ID) แนว (Host_Grid) ระดับอ้างอิง (Host_Level) ชื่ออ้างอิง (Host_Code) 2. ข้อมูลเหล็กเส้นได้แก่ รหัสประจำชิ้นส่วนเหล็กเส้น เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) รูปทรงของเหล็กเสริม (Shape) ความยาว (Bar_Length) จำนวน (Quantity) ความยาวทั้งหมด (Total Bar_Length) จำนวน กลุ่ม ความยาว (Rebar_Number) รูปแบบการตัดเหล็กเส้นจากเหล็กความยาว 10 เมตร (L10_Pattern) และ 12 เมตร (L12_Pattern) เพื่อบันทึกผลการคำนวณรูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหมาะสมที่สุด



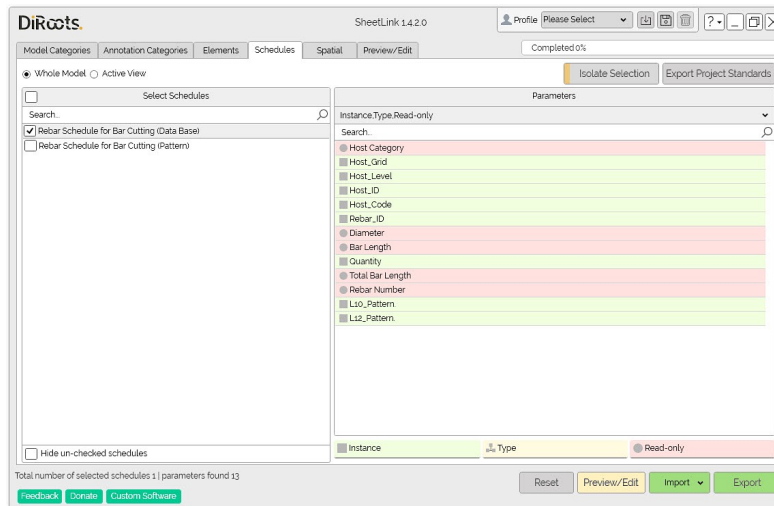
รูปที่ 2 Dynamo Script สำหรับระบุ Host_ID ของเหล็กเส้น



รูปที่ 3 กรอบแนวคิดการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้น

ตารางที่ 2 ตารางข้อมูลเหล็กเส้นในโปรแกรม Autodesk Revit

Rebar Schedule for Bar Cutting (Data Base)														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Host Category	Host Grid	Host Level	Host ID	Host Code	Rebar ID	Diameter	Shape	Shape Image	Bar Length (m.)	Quantity	Total Bar Length	Rebar Number	L10 Pattern	L12 Pattern
Structural Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684657	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684839	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684946	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684985	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685083	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685085	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685098	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685099	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685111	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685112	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	5/A	EL.+0.00	546845	F1	685124	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	5/A	EL.+0.00	546845	F1	685125	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685537	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	18	34.09	1		
Structural Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685777	DB12	S6	M_S6-2.jpg	2.89	9	26.00	16		



รูปที่ 4 โปรแกรมเสริม SheetLink เพื่อนำเข้าและส่งออกข้อมูล

2.3. การพัฒนาแบบจำลองการตัดเหล็กเส้น

ผู้วิจัยดำเนินการได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Model) สำหรับการหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยมีการคำนวณ 2 ขั้นตอนประกอบด้วย 1. การหารูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Cutting Patterns) และ 2. การหา รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Cutting Patterns) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Cutting Patterns)

เนื่องจากแนวทางการหารูปแบบการตัด (Pattern-Oriented Approach) จำเป็นต้องเริ่มจากการสร้างรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้จำนวนหนึ่งสำหรับนำไปใช้ในขั้นตอนการตัดซ้ำ เพื่อให้ได้จำนวนเหล็กเส้นครบตามประเภทและจำนวนท่อนที่ต้องการ ซึ่งรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้นั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก หากนำรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดไปใช้คำนวณในขั้นตอนการตัดซ้ำด้วยแนวทางการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Approach) จะทำให้มีจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องหาคำตอบเป็นจำนวนมากอันส่งผลให้ต้องใช้เวลานานในการหาคำตอบ (Large Computational Time) และบางครั้งอาจไม่เจอคำตอบเนื่องจากความซับซ้อนในการหาคำตอบที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ หรือติดอยู่ในการระเบิดแบบผสมผสาน (Trapped in Combinatorial Explosion)

ดังนั้นในขั้นตอนที่ 1 ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับคัดเลือกรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพจากรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมด ตามสมการที่ (2) ถึง (12) โดยการหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานมากกว่าหนึ่งขนาด อาทิเช่น 10 เมตร 12 เมตร และ/หรือ 15 เมตร เป็นต้น เนื่องจากการตัดเหล็กเส้นจำเป็นต้องตัดให้ได้จำนวนท่อนครบตามความยาวที่ต้องการ ดังนั้นความหลากหลายของรูปแบบการตัดที่เพิ่มขึ้นจากการใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานมากกว่าหนึ่งขนาดจะช่วยเพิ่มโอกาสในการหาคำตอบที่เหมาะสมได้มากขึ้น โดยในแต่ละรูปแบบการตัดจะมีตัวแปรตัดสินใจคือจำนวนท่อนที่ตัดตามความยาวขนาดต่าง ๆ ที่ต้องการด้วยเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานจำนวนหนึ่งเส้นตามสมการที่ (2) โดยรูปแบบการตัดที่ถูกคัดเลือกมาเป็นชุดของรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีผลรวมของความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดและความยาวเศษเหล็กที่ตัดเกินกว่าจำนวนที่ต้องการน้อยที่สุดตามฟังก์ชันเป้าหมายในสมการที่ (3) นอกจากนี้รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพแต่ละรูปแบบจะต้องเหลือความยาวของเศษจากการตัดไม่เกินความยาวที่สั้นที่สุดของเหล็กเส้นที่ต้องการตามสมการที่ (4) และเนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอาจเกิดขึ้นในกรณีที่ต้องใช้รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพทุกรูปแบบเพื่อตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานรูปแบบละหนึ่งเส้นในขั้นตอนที่ 2 ดังนั้นในขั้นตอนการคัดเลือกรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพนี้จึง

กำหนดให้แต่ละรูปแบบการตัดใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานเพียงหนึ่งเส้น ทั้งนี้เพื่อลดจำนวนตัวแปรตัดสินใจให้น้อยที่สุดและมั่นใจว่าจะได้จำนวนรูปแบบการตัดขั้นต่ำที่เพียงพอสำหรับการตัดเหล็กเส้นครบตามจำนวนที่ต้องการจึงกำหนดจำนวนของรูปแบบการตัดเท่ากับจำนวนเส้นของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่ต้องใช้ในการตัดให้ครบตามความยาวรวมที่ต้องการ โดยเพื่อความยาวในกรณีที่เหลือทุกเส้นเหลือเศษจากการตัดเท่ากับความยาวที่สั้นที่สุดของเหล็กเส้นที่ต้องการตาม สมการที่ (5) โดยการตัดผลรวมของจำนวนท่อนที่ตัดได้ต้องไม่น้อยกว่าจำนวนท่อนที่ต้องการตามสมการที่ (6) ซึ่งแต่ละรูปแบบต้องตัดไม่เกินความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานตามสมการที่ (7) ทำให้เหลือเศษเหล็กจากการตัดตามสมการที่ (8) ซึ่งจะต้องยาวน้อยกว่าความยาวเศษเหล็กที่ยอมให้มากที่สุดตามสมการที่ (9) ความยาวเศษเหล็กที่ตัดเกินกว่าจำนวนที่ต้องการสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (10) โดยกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็มและไม่น้อยกว่าศูนย์ตามสมการที่ (11) และ (12)

2. รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Cutting Patterns)

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการนำรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพสำหรับเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานทุกขนาดจากขั้นตอนที่ 1 มาคัดเลือกเป็นรูปแบบการตัด ที่เหมาะสมที่สุดอีกครั้ง โดยกำหนดให้จำนวนท่อนของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดซ้ำด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพแต่ละรูปแบบเป็นตัวแปรตัดสินใจตามสมการที่ (13) กล่าวคือรูปแบบที่ตัวแปรตัดสินใจเท่ากับศูนย์แสดงว่าไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการตัด ดังนั้นรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดคือรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพที่ถูกคัดเลือกมาใช้ในการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน (10 เมตร และ/หรือ 12 เมตร) เพื่อให้ได้เหล็กเส้นครบตามความยาวและจำนวนท่อนที่ต้องการ โดยเหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด (Optimal Solution) กล่าวคือมีผลรวมของความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดและความยาวเศษเหล็กที่ตัดเกินกว่าจำนวนที่ต้องการน้อยที่สุดตามฟังก์ชันเป้าหมายในสมการที่ (14) และมีสมการข้อจำกัดที่ (15) ถึง (20) เหมือนในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์เศษเหล็กที่น้อยที่สุดได้ตามสมการที่ (21)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ขั้นตอนที่ 1

$$\{a_{(i,j)} \mid i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\} \quad (2)$$

ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ขั้นตอนที่ 1

$$\text{Minimize } T_{(s)} = \sum_{j=1}^m T_{(s,j)} + \sum_{i=1}^n T_{(s,i)} \quad (3)$$

ข้อจำกัด (Constraints) ขั้นตอนที่ 1

$$T_{\max} \leq \min_{\omega \rightarrow 0} \{L_{(i)} - \omega \mid i=1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

$$m = \text{Round up} \left(\sum_{i=1}^n \frac{L_{(i)} D_{(i)}}{L_{(s)}} \left(1 + \frac{T_{\max}}{L_{(s)}} \right) \right) \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{(i,j)} \geq D_{(i)} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n (L_{(i)} a_{(i,j)}) \leq L_{(s)} \quad (7)$$

$$T_{(s,j)} = L_{(s)} - \sum_{i=1}^n (L_{(i)} a_{(i,j)}) \quad (8)$$

$$T_{(s,j)} < T_{\max} \quad (9)$$

$$T_{(s,i)} = L_{(i)} \left(\sum_{j=1}^m a_{(i,j)} - D_{(i)} \right) \quad (10)$$

$$a_{(i,j)} = \text{Integer} \quad (11)$$

$$a_{(i,j)} \geq 0 \quad (12)$$

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ขั้นตอนที่ 2

$$P_{(s,j)} \quad (13)$$

ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ขั้นตอนที่ 2

$$\text{Minimize } T' = \sum_{s=1}^k \sum_{j=1}^m T'_{(s,j)} + \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^n T'_{(s,i)} \quad (14)$$

ข้อจำกัด (Constraints) ขั้นตอนที่ 2

$$\sum_{s=1}^k \sum_{j=1}^m a_{(i,j)} P_{(s,j)} \geq D_{(i)} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n (L_{(i)} a_{(i,j)}) \leq L_{(s,j)} \quad (16)$$

$$T'_{(s,j)} = P_{(s,j)} (L_{(s,j)} - \sum_{i=1}^n L_{(i)} a_{(i,j)}) \quad (17)$$

$$T'_{(s,i)} = L_{(i)} \left(\sum_{j=1}^m a_{(i,j)} P_{(s,j)} - D_{(i)} \right) \quad (18)$$

$$P_{(s,j)} \geq 0 \quad (19)$$

$$P_{(s,j)} = \text{Integer} \quad (20)$$

$$W_{(i)} = \left(\frac{T}{\sum_{i=1}^n L_{(i)} D_{(i)}} \right) \quad (21)$$

เมื่อ

$a_{(i,j)}$ = จำนวนท่อนของการตัดเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i ด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพลำดับที่ j

n = จำนวนความยาวของเหล็กเส้นที่ต้องการ

m = จำนวนรูปแบบการตัด

T_s = จำนวนเศษเหล็กทั้งหมดที่เหลือจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s

$T_{(s,j)}$ = ความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพลำดับที่ j

$T_{(s,i)}$ = ความยาวเศษเหล็กจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s เกินกว่าจำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i ด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ

$T_{\max}$ = ความยาวเศษเหล็กมากสุดในแต่ละรูปแบบการตัด

$L_{(i)}$ = ความยาวของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i

ω = ค่าคงที่เข้าใกล้ศูนย์

$D_{(i)}$ = จำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i

$L_{(s)}$ = ความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s

$P_{(s,j)}$ = จำนวนของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ซึ่งใช้รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดลำดับที่ j

T = ความยาวเศษเหล็กทั้งหมดที่เหลือน้อยที่สุดจากการตัดเหล็กเส้นด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด

$T'_{(s,j)}$ = ความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดลำดับที่ j

$T'_{(s,i)}$ = ความยาวเศษเหล็กจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s เกินกว่าจำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i ด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด

k = จำนวนความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน

$L_{(s,j)}$ = ความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ซึ่งใช้รูปแบบการตัดลำดับที่ j

$W_{(i)} =$ เปอร์เซนต์เศษเหล็กที่น้อยที่สุด

2.4.การนำข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้วิศวกรและช่างเหล็กสามารถทราบได้ว่าเหล็กเส้นที่ตัดด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดแต่ละท่อนต้องตัดด้วยรูปทรง (Shape) แบบใด และต้องเสริมที่ตำแหน่งใดของโครงสร้างอาคาร ทำให้สามารถลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการทำงานลงได้

หลังจากได้ผลลัพธ์จากการหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหลือเศษน้อยที่สุด จากหัวข้อที่ 2.3 แล้วข้อมูลจะถูกบันทึกในคอลัมน์ L10_Pattern และ L12_Pattern ในโปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel (ตารางจากหัวข้อ 2.2) หลังจากนั้นใช้ โปรแกรมเสริม SheetLink ในการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นกลับไปยังแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในตารางเพื่อปรับปรุงข้อมูล (Update) ในส่วนของคอลัมน์ L10_Pattern และ L12_Pattern โดยข้อมูลกำหนดให้มีชุดรหัสเลขสามกลุ่ม (รูปแบบหลัก-รูปแบบย่อยเรียงตามความยาว-จำนวนท่อน) สำหรับรหัสประจำชิ้นส่วนของเหล็กเส้น (Element_ID) เป็นรหัสตัวเลข 6 หลัก ซึ่งมีลักษณะไม่ซ้ำกันเป็นคีย์หลัก (Primary Key : PK) ถูกใช้ในการเชื่อมโยงข้อมูล โดยความสัมพันธ์ของโครงสร้างคอนกรีตสามารถมีเหล็กเส้นเสริมได้มากกว่า 1 เส้นหรือกลุ่ม (ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อกลุ่ม) แต่ในทางกลับกัน เหล็กเส้น 1 เส้นหรือกลุ่ม สามารถเสริมในโครงสร้างคอนกรีตได้ชิ้นเดียวเท่านั้น โดยการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโครงสร้าง เหล็กเส้น และรูปแบบการตัดเหล็กเส้นแสดงดังรูปที่ 5

3. ผลการศึกษา

จากวิธีการศึกษาข้างต้น ผู้วิจัยได้ผลการศึกษาโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน มีรายละเอียดดังนี้

3.1.ข้อมูลส่งออกจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

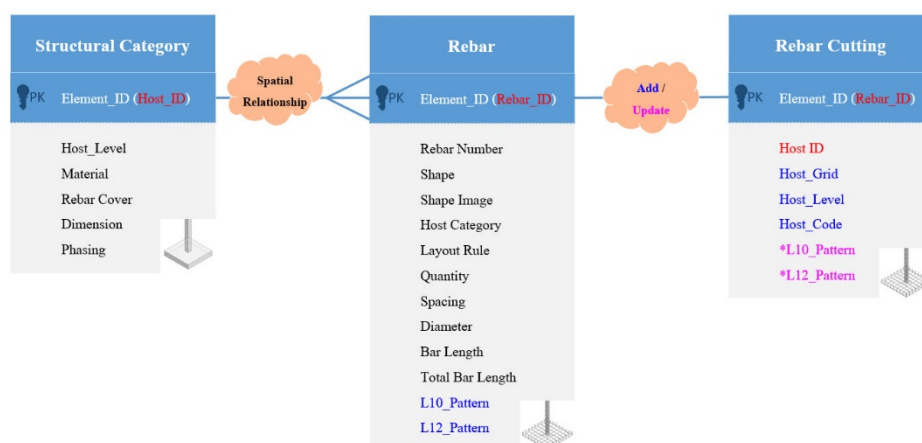
ผลการดำเนินการจากหัวข้อ 2.2 ได้ตารางฐานข้อมูลเหล็กเส้นใน โปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel สอดคล้องกับตารางที่ 2 ซึ่งแสดงชื่อ ประเภทข้อมูลและกลุ่มพารามิเตอร์ ทั้งนี้ รหัสประจำชิ้นส่วน (Element_ID) โปรแกรมเสริม SheetLink สร้างให้อัตโนมัติ เพื่อใช้ในการเชื่อมโยงข้อมูล แสดงดังตารางที่ 3

3.2.ประสิทธิภาพของแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

ผู้วิจัยใช้กรณีศึกษาของการตัดเหล็กเส้นจำนวน 3 กรณีของงานวิจัยที่ผ่านมา [9],[10] ที่มีรายละเอียดความยาวและจำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการตัดดังแสดงในตารางที่ 4 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้พัฒนาขึ้นกับผลการคำนวณด้วยวิธีของงานวิจัยที่ผ่านมา [10], [11] โดยใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน 10 เมตร และ 12 เมตร จะได้ผลการวิเคราะห์รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 ด้วยวิธีการที่นำเสนอในตารางที่ 5–7 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 1 (ตารางที่ 5) มีเศษเหล็กที่

เหลือจากการตัดทั้งหมด 4.86 เมตร และเศษเหล็กที่ตัดเกินทั้งหมด 8.41 เมตร ส่งผลให้มีเศษเหล็กทั้งหมด 13.27 เมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 1.44% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 918.73 เมตร) โจทย์ตัวอย่างที่ 2 (ตารางที่ 6) มีเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดทั้งหมด 5.53 เมตร และเศษเหล็กที่ตัดเกินทั้งหมด 1.44 เมตร ส่งผลให้มีเศษเหล็กทั้งหมด 6.97 เมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 0.68% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 1,027.03 เมตร) และ โจทย์ตัวอย่างที่ 3 (ตารางที่ 7) มีเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดทั้งหมด 3.37 เมตร และเศษเหล็กที่ตัดเกินทั้งหมด 0.87 เมตรส่งผลให้มีเศษเหล็กทั้งหมด 4.24 เมตรคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 0.44% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 963.76 เมตร)



รูปที่ 4 การเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโครงสร้าง เหล็กเส้น และรูปแบบการตัดเหล็กเส้น

ตารางที่ 3 ข้อมูลเหล็กเส้นจากโปรแกรม Autodesk Revit

Element ID	Host Category	Host Grid	Host Level	Host ID	Host Code	Rebar ID	Dia.	Bar Length (m.)	Quantity	Total Bar Length	Rebar No.	L10 Pattern	L12 Pattern
684657	Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684657	DB12	1.89	9	17.05	1		
684839	Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684839	DB12	1.80	9	16.17	8		
684946	Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684946	DB12	1.89	9	17.05	1		
684985	Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684985	DB12	1.80	9	16.17	8		
685083	Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685083	DB12	1.89	9	17.05	1		
685085	Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685085	DB12	1.80	9	16.17	8		
685098	Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685098	DB12	1.89	9	17.05	1		
685099	Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685099	DB12	1.80	9	16.17	8		
685111	Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685111	DB12	1.89	9	17.05	1		
685112	Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685112	DB12	1.80	9	16.17	8		
685537	Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685537	DB12	1.89	18	34.09	1		
685777	Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685777	DB12	2.89	9	26.00	16		

ตารางที่ 4 โจทย์ตัวอย่าง

ลำดับ ที่	โจทย์ตัวอย่างที่					
	1		2		3	
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน ท่อน	ความ ยาว (ม.)	จำนวน ท่อน	ความ ยาว (ม.)	จำนวน ท่อน
1	0.95	25	0.48	56	0.45	31
2	1.40	18	0.82	65	0.55	90
3	1.75	14	0.99	39	0.87	39
4	1.80	23	1.12	4	1.22	18
5	1.88	7	1.20	8	1.28	3
6	2.67	22	1.64	28	1.58	19
7	2.88	10	2.34	11	2.39	12
8	3.05	36	2.54	10	2.41	10
9	3.20	4	3.15	19	2.75	18
10	3.75	15	3.38	13	3.68	9
11	5.00	26	3.78	14	3.92	18
12	5.40	19	3.85	13	3.99	13
13	6.35	7	5.15	10	5.09	11
14	7.00	23	5.63	16	5.48	15
15	7.19	12	6.96	14	6.80	14
16			7.40	4	7.49	14
17			8.43	17	8.22	25
18			9.39	19	8.98	1

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 1

รูป แบบ ที่	เหล็กเส้นความ ยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษ เหล็ก (ม.)
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	1	3-3.20	0.40
2	10	1	2-5.00	0.00
3	10	1	1-0.95, 2-1.80, 1-5.40	0.05
4	10	1	1-1.40, 2-80, 1-5.00	0.00
5	10	4	1-0.95, 1-2.67, 1-6.35	0.12
6	12	3	3-1.88, 1-6.35	0.03
7	12	10	1-0.95, 1-2.67, 1-2.88, 1-5.40	1.00
8	12	5	1-0.95, 4-1.8, 1-3.75	0.50
9	12	1	6-0.95, 2-3.05	0.20
10	12	8	2-1.40, 3-3.05	0.40
11	12	9	1-1.75, 1-3.05, 1-7.19	0.09
12	12	1	5-1.75, 1-3.05	0.20
13	12	8	1-2.67, 1-3.75, 1-5.40	1.44
14	12	23	1-5.00, 1-7.00	0.00
15	12	1	1-1.40, 1-3.20, 1-7.19	0.21
16	12	2	1-0.95, 1-3.75, 1-7.19	0.22
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				4.86
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				8.41
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				13.27
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				918.7
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				1.44

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 2

รูป แบบ ที่	เหล็กเส้นความ ยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษ เหล็ก (ม.)
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	4	1-1.20, 1-3.15, 1-.63	0.08
2	10	1	1-0.99, 1-3.38, 1-5.63	0.00
3	10	1	1-2.54, 1-7.40	0.06
4	10	2	1-0.99, 1-3.85, 1-5.15	0.02
5	10	1	8-0.82, 1-3.38	0.06
6	10	2	1-0.48, 1-0.82, 1-1.20, 1-7.40	0.20
7	12	1	3-0.82, 1-9.39	0.15
8	12	1	1-1.12, 1-3.15, 1-7.40	0.33
9	12	1	1-0.48, 1-0.82, 1-1.12, 1-9.39	0.19
10	12	1	1-0.99, 3-1.64, 1-2.54, 1-3.38	0.17
11	12	5	1-0.48, 1-3.78, 2-3.85	0.20
12	12	2	6-0.82, 1-6.96	0.24
13	12	10	2-0.82, 1-3.38, 1-6.96	0.20
14	12	8	1-0.82, 1-0.99, 1-1.64, 1-8.43	0.96
15	12	1	1-1.12, 1-3.85, 1-6.96	0.07
16	12	9	1-0.48, 3-0.99, 1-8.43	1.08
17	12	1	1-1.12, 1-3.78, 1-6.96	0.14
18	12	1	2-1.20, 3-3.15	0.15
19	12	17	2-0.48, 1-1.64, 1-9.39	0.17
20	12	8	1-0.48, 1-2.54, 1-3.78, 1-5.15	0.40
21	12	11	1-0.82, 1-2.34, 1-3.15, 1-5.63	0.66
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				5.53
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				1.44
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				6.97
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				1,027
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				0.68

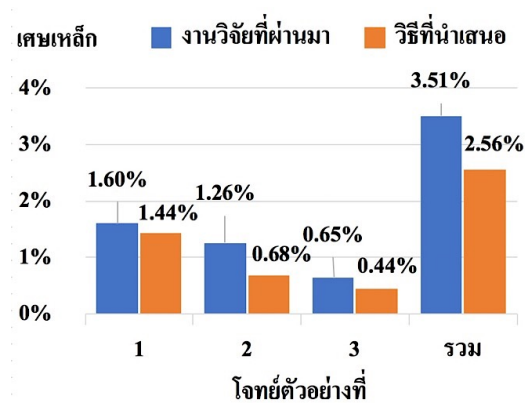
ตารางที่ 7 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 3

รูป แบบ ที่	เหล็กเส้นความ ยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษ เหล็ก (ม.)
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	1	1-0.87, 1-3.99, 1-5.09	0.05
2	10	5	1-2.39, 1-3.68, 1-3.92	0.05
3	10	12	1-0.45, 1-2.75, 1-6.80	0.00
4	10	4	1-1.22, 1-3.68, 1-5.09	0.04
5	10	5	3-0.55, 1-0.87, 1-2.39, 1-5.09	0.00

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 3 (ต่อ)

รูปแบบ	เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษเหล็ก (ม.)
	ความยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
6	10	5	1-0.45, 3-0.55, 2-3.92	0.30
7	12	4	1-0.87, 2-5.48	0.68
8	12	2	1-1.22, 1-3.92, 1-6.80	0.12
9	12	1	1-0.55, 1-2.39, 1-8.98	0.08
10	12	5	2-1.22, 1-3.99, 1-5.48	0.45
11	12	7	1-0.45, 1-3.99, 1-7.49	0.49
12	12	2	1-0.55, 2-1.58, 1-8.22	0.14
13	12	6	1-0.45, 1-0.87, 1-2.41, 1-8.22	0.30
14	12	2	6-0.87, 1-1.22, 1-5.48	0.16
15	12	6	2-0.87, 1-2.75, 1-7.49	0.12
16	12	1	1-0.45, 1-1.58, 1-2.41, 1-7.49	0.07
17	12	1	1-0.55, 1-2.39, 1-3.92, 1-5.09	0.05
18	12	3	1-1.28, 1-2.41, 1-8.22	0.27
19	12	14	4-0.55, 1-1.58, 1-8.22	0.00
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				3.37
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				0.87
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				4.24
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				963.8
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				0.44

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เศษเหล็กกับวิธีของงานวิจัยที่ผ่านมา [9], [10] ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าโจทย์ตัวอย่างที่ 1-3 วิธีที่นำเสนอสามารถลดปริมาณเศษได้เพิ่มขึ้นถึง 10%, 46.16% และ 32.31% ตามลำดับ (งานวิจัยที่ผ่านมา [10], [11] มีเศษเหล็กเหลือ 1.6%, 1.26% และ 0.62% ตามลำดับ) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลดจำนวนเศษเหล็กได้มากขึ้นดังโจทย์ตัวอย่างที่ 1 27.13% ซึ่งเป็นปริมาณเศษเหล็กที่ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ตัวอย่างข้อมูลเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรที่ได้จากการลดปริมาณจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) สรุปในตารางที่ 8 ถูกนำมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดตามสมการที่ (2)-(21) แสดงในตารางที่ 9 โดยมีปริมาณเศษเหล็กเพียง 37.4 เมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 2.46% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 1,520.60 เมตร)

3.3. ข้อมูลนำเข้าสู่แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

จากผลการดำเนินการหั่วข้อที่ 2.4 และ 3.2 จะได้ผลลัพธ์ของข้อมูลการตัดเหล็กเส้นในรูปแบบต่าง ๆ ความยาวของแต่ละท่อน และจำนวนท่อน จากเหล็กความยาว 10 เมตร และหรือ 12 เมตร อาทิเช่น รหัส L10_Pattern เท่ากับ 011-03-004 หมายถึงรูปแบบหลักการตัดที่ 11 (011) รูปแบบย่อยความยาวลำดับที่ 3 (2.89 ม.) จำนวน 4 ท่อน(004) โดยข้อมูลดังกล่าวจะถูกเชื่อมโยงกับตารางข้อมูลเหล็กเส้น (Schedules) แสดงดังตารางที่ 10 และเชื่อมโยงข้อมูลรูปแบบการตัดเหล็กเส้นเพิ่มเติม (L10_Pattern และ L12_Pattern) ในพารามิเตอร์ของชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีตในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) แสดงดังรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังสามารถจัดพิมพ์ตารางข้อมูลการตัดเหล็กเส้น รูปทรงการตัดเหล็กเส้น และตำแหน่งการเสริมเหล็กเส้นเพื่อใช้ในการทำงานแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 4 ข้อมูลเหล็กเส้น DB12 จาก BIM

ลำดับที่	ความยาว (ม.)	จำนวน ท่อน	ลำดับที่	ความยาว (ม.)	จำนวน ท่อน
1	0.64	1	29	2.80	13
2	0.73	9	30	2.89	9
3	0.93	2	31	3.56	2
4	1.00	2	32	3.58	5
5	1.01	12	33	3.63	2
6	1.02	2	34	3.80	17
7	1.03	12	35	4.12	5
8	1.06	3	36	4.13	3
9	1.12	6	37	4.22	3
10	1.13	16	38	4.24	4
11	1.19	21	39	4.25	6
12	1.20	6	40	4.29	11
13	1.41	6	41	4.30	10
14	1.68	2	42	4.33	3
15	1.80	126	43	4.65	4
16	1.85	4	44	7.07	3
17	1.89	146	45	7.17	3
18	1.90	2	46	7.21	6
19	1.97	2	47	7.49	3
20	2.10	20	48	7.60	3
21	2.21	21	49	7.72	9
22	2.37	22	50	7.74	3
23	2.38	23	51	8.06	3
24	2.40	24	52	8.09	6
25	2.50	25	53	8.11	2
26	2.59	26	54	8.26	3
27	2.72	27	55	8.28	9
28	2.73	28	56	8.29	6

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์ของรูปแบบการตัดเหล็กเส้น DB12

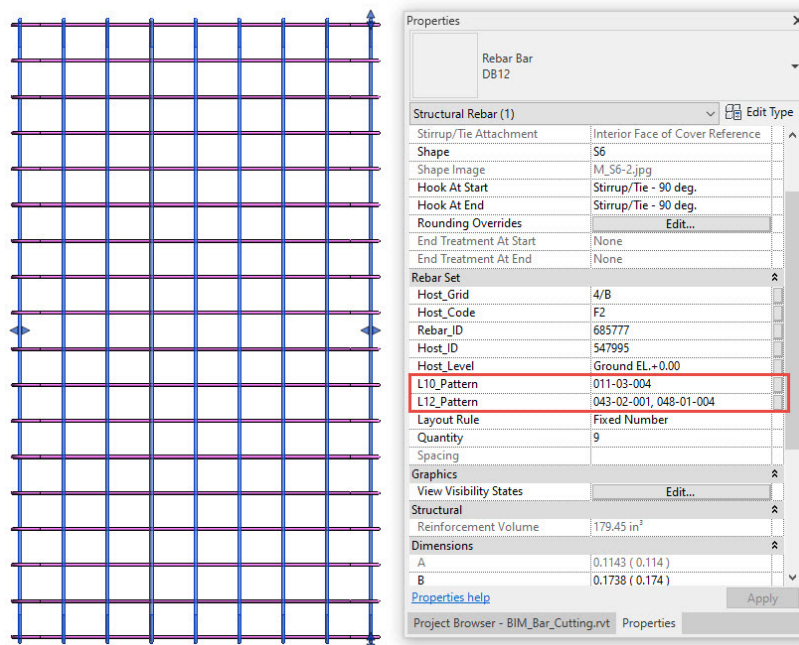
รูปแบบ	เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษเหล็ก (ม.)
	ความยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	5	2-1.19, 2-3.80	0.10
2	10	3	2-1.13, 1-7.74	0.00
3	10	1	1-1.68, 1-8.28	0.04
4	10	4	1-2.72, 1-7.21	0.28
5	10	2	1-1.00, 1-1.03, 2-1.89, 1-4.12	0.14
6	10	1	2-1.80, 1-2.10, 1-4.25	0.05
7	10	1	1-1.03, 1-4.25, 1-4.65	0.07
8	10	2	1-1.01, 1-1.41, 1-1.80, 1-2.21, 1-3.56	0.02
9	10	2	1-1.89, 1-8.11	0.00
10	10	1	1-1.68, 1-2.10, 1-2.40, 1-3.80	0.02

ตารางที่ 9 ผลลัพธ์รูปแบบการตัดเหล็กเส้น DB12 (ต่อ)

รูปแบบ	เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษเหล็ก (ม.)
	ความยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
11	10	4	1-1.01, 1-1.80, 1-2.89, 1-4.25	0.20
12	10	2	1-1.90, 1-8.09	0.02
13	10	1	1-0.73, 1-1.80, 4-1.85	0.07
14	10	2	2-2.80, 1-4.22	0.36
15	12	1	2-2.10, 1-2.40, 2-2.50	0.40
16	12	2	1-1.03, 1-1.19, 1-1.89, 1-3.58, 1-4.30	0.02
17	12	3	1-3.80, 1-8.06	0.42
18	12	1	2-1.03, 1-1.89, 2-3.80	0.45
19	12	2	3-1.41, 1-7.72	0.10
20	12	1	2-1.80, 1-8.26	0.14
21	12	2	1-1.80, 1-2.80, 1-7.21	0.38
22	12	4	1-1.03, 5-1.80, 1-1.89	0.32
23	12	1	1-1.20, 6-1.80	0.00
24	12	2	1-0.93, 1-2.80, 2-4.13	0.02
25	12	9	1-1.19, 6-1.80	0.09
26	12	6	1-1.13, 2-1.89, 1-2.80, 1-4.29	0.00
27	12	1	1-0.64, 1-1.03, 1-1.20, 2-2.38, 1-4.29	0.08
28	12	9	1-0.73, 1-1.80, 5-1.89	0.18
29	12	3	1-4.65, 1-7.17	0.54
30	12	4	4-1.89, 1-4.29	0.60
31	12	7	4-1.89, 1-4.30	0.98
32	12	2	1-1.02, 1-2.37, 1-8.26	0.70
33	12	3	1-1.06, 2-1.89, 1-7.07	0.27
34	12	1	4-1.20, 2-2.10, 1-2.73	0.27
35	12	1	3-1.13, 1-4.22, 1-4.30	0.09
36	12	3	2-1.01, 1-1.89, 1-7.60	1.47
37	12	1	4-1.89, 2-1.97	0.50
38	12	6	1-1.80, 1-1.89, 1-8.29	0.12
39	12	3	2-1.12, 1-1.89, 1-7.72	0.45
40	12	3	1-4.33, 1-7.49	0.54
41	12	1	1-1.13, 1-1.80, 2-1.89, 2-2.59	0.11
42	12	1	1-1.01, 1-1.89, 2-2.72, 1-3.63	0.03
43	12	1	1-1.80, 1-2.89, 2-3.63	0.05
44	12	1	2-2.10, 1-3.58, 1-3.80	0.42
45	12	2	1-3.58, 2-4.12	0.36
46	12	8	2-1.80, 1-8.28	0.96
47	12	2	2-1.89, 1-8.09	0.26
48	12	1	4-2.89	0.44
49	12	4	1-4.24, 1-7.72	0.16
50	12	2	2-1.89, 1-8.09	0.26
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				13.55
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				23.85
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				37.40
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				1,521
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				2.46%

ตารางที่ 6 การเชื่อมโยงข้อมูลการตัดเหล็กเส้นในพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

Element ID	Host Grid	Host ID	Host Code	Rebar ID	Dia.	Bar Length (m.)	Qty.	Total Bar Length (m.)	Rebar No.	L10 Pattern	L12 Pattern
684657	1/A	546407	F1	684657	DB12	1.89	9	17.05	1	005-03-004, 009-01-002	016-03-002, 018-02-001
684839	1/A	546407	F1	684839	DB12	1.80	9	16.17	8		022-03-004, 026-02-005
685537	4/B	547995	F2	685537	DB12	1.89	18	34.09	1		037-01-001, 038-02-006, 039-02-003, 041-03-002, 042-02-001, 047-01-004, 050-01-001
685777	4/B	547995	F2	685777	DB12	2.89	9	26.00	16	011-03-004	043-02-001, 048-01-004



รูปที่ 6 การเชื่อมโยงข้อมูลรูปแบบการตัดเหล็กเส้นชุดข้อมูลเหล็กเส้นในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการนำข้อมูลเหล็กเส้นจากชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยได้พัฒนาวิธีการคัดเลือกรูปแบบการตัดเหล็กให้เหลือเศษน้อยที่สุดด้วยแนวทางการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Approach) จึงทำให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นมากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [3-10] ซึ่งใช้แนวทาง แบบฮิวริสติก (Heuristic Approach) หรือเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic Approach)

ทำให้คำตอบที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งอาจไม่เท่ากัน สม่่าเสมอ (Inconsistent) และอาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Near Optimal Solution) นอกจากนี้ยังได้พัฒนาสมการที่สามารถคำนวณรูปแบบปัญหาการใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานหลายขนาดความยาวมาตัดตามความยาวและจำนวนที่ต้องการเพื่อเพิ่มความหลากหลายของรูปแบบการตัดอันจะช่วยเพิ่มโอกาสที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมมากขึ้น โดยแบ่งขั้นตอนการหาคำตอบออกเป็นสองขั้นตอนเพื่อให้สมการฟังก์ชันเป้าหมายและสมการข้อจำกัดเป็นสมการเชิงเส้นตรงที่สามารถหาคำตอบ

เหมาะสมที่สุดได้ ซึ่งได้กำหนดให้รูปแบบการตัดที่ได้รับ การการคัดเลือกต้องได้ผลรวมของความยาวเศษเหล็กที่ เหลือจากการตัดและความยาว เศษเหล็กที่ตัดเกินกว่า จำนวนที่ต้องการน้อยที่สุด นอกจากนี้ความยาวของเศษ เหล็กที่เหลือจากการตัดในแต่ละรูปแบบถูกกำหนดให้ไม่ เกินความยาวที่สั้นที่สุดของเหล็กเส้นที่ต้องการทำให้มั่นใจ ได้ว่าเศษเหล็กที่เหลือไม่สามารถนำไปตัดซ้ำได้อีก

นอกจากนี้งานวิจัยได้นำเสนอแนวทางเชื่อมโยงข้อมูล เหล็กเส้นที่ตัดด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดกลับเข้าสู่พารามิเตอร์ของชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และแปลง ข้อมูลเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) สำหรับ ใช้อ้างอิงรูปแบบการตัดและเสริมเหล็กที่ถูกต้อง

ตารางที่ 11 ตารางข้อมูลการตัด คัด และเสริมเหล็กเส้น

Rebar Schedule for Bar Cutting (Cut and Bend)																
Host Category	Partition	Host Level (EL.)	Host Grid	Host Code	Dia.	A (m.)	B (m.)	C (m.)	D (m.)	G (m.)	Shape Image	Bar Length (m.)	Qty	Total Bar Length (m.)	L10 Pattern	L12 Pattern
Foundation	F2-1	+0.00	4/B	F2	DB12	0.114	0.174	2.419	0.174	0.114		2.89	9	26.00	011-03-004	043-02-001, 048-01-004
Foundation	F2-2	+0.00	4/B	F2	DB12	0.114	0.174	1.424	0.174	0.114		1.89	18	34.09		037-01-001, 038-02-006, 039-02-003, 041-03-002, 042-02-001, 047-01-004, 050-01-001
Grand total												4.78	27	60.09		

ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมก่อสร้างในด้านการช่วยลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากกระบวนการตัดให้น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้การใช้ทรัพยากรมีประสิทธิภาพมากขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้าง ผลของจำนวนเศษเหล็กเส้นที่น้อยลงยังช่วยลดปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจากงานก่อสร้างและปัญหาการขโมยเศษเหล็กเส้นโดยคนงานก่อสร้าง

งานวิจัยนี้มีคุณค่าทางวิชาการในแง่การพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถค้นหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากการตัดได้มากขึ้น โดยสามารถใช้คำนวณปัญหาที่มีเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดหลายความยาวและการพัฒนาแนวทางการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นที่ได้จากการตัดด้วยรูปแบบที่คำนวณได้กับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ทำให้สามารถทราบเหล็กเส้นที่ตัดด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดแต่ละท่อนต้องตัดด้วยรูปทรง (Shape) แบบใด และต้องเสริมที่ตำแหน่งใดของ

โครงสร้างอาคาร ทำให้สามารถลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการทำงานลงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Iron and Steel Intelligence Unit, "Thailand Steel Outlook 2020," Iron and Steel Institute of Thailand, Bangkok, Thailand, Jul. 2021 [Online]. Available: <https://iiu.isit.or.th/th/reports/Yearly%20Report.aspx>
- [2] S. Chinanuwatwong, "Reducing Waste from Cutting Reinforcing Steel in Construction Projects," Kasetart Journal Natural Science, vol. 34, no. 4, pp. 526–535, 2000, doi: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/240397/163946>
- [3] H. Dyckhoff, "A Typology of Cutting and Packing Problems," *European Journal of Operation Research*, vol. 44, no. 12, pp. 145–159, 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90350-K

- [4] M. Gradisar, K. Miroljub, R. Gortan and J. Joze, “A Sequential Heuristic Procedure for One-Dimensional Cutting,” *European Journal of Operational Research*, vol. 114, no. 13, pp. 557–568, 1999, doi: 10.1016/S0377-2217(98)00140-4
- [5] J. Coffman, E. M. Garey and D. S. Johnson, “Approximation Algorithms for Bin-Packing: An Updated Survey,” *Algorithm Design for Computer System Design*, vol. 284, pp. 49–106, 1984, doi: 10.1007/978-3-7091-4338-4_3
- [6] Y. Cui and Y. Yang, “A heuristic for the one-dimensional cutting stock problem with usable leftover,” *European Journal of Operational Research*, vol. 204, no. 12, pp. 245–250, 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.10.028
- [7] C. R. Goncalo, A. S. Sergio and M. Marlos, “Modified Greedy Heuristic for the one-dimensional cutting stock problem,” *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 41, no. 12, pp. 657–674, 2021, doi: 10.1007/s10878-021-00695-4
- [8] R. Vahrenkamp, “Random Search in the One-Dimensional Cutting Stock Problem,” *European Journal of Operation Research*, vol. 95, no. 11, pp. 191–200, 1996, doi: 10.1016/0377-2217(95)00198-0
- [9] V. Benjaoran, “Trim Loss Minimization for Construction Reinforcement Steel with Oversupply Constraints,” *Journal of Advanced Management Science*, vol. 1, no. 13, pp. 313–316, 2013, doi: 10.12720/joams.1.3.313-316
- [10] V. Benjaoran and Bhokha, “Three-Step Solution for Cutting Stock Problem of Construction Steel Bar,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 115, pp. 1239–1247, 2014, doi: 10.1007/s12205-014-0238-3
- [11] A. Porwal and N. Hewage, “Building Information Modeling–Based Analysis to Minimize Waste Rate of Structural Reinforcement,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 18, pp. 943–954, 2012, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000508
- [12] M. Mangal and J. C. Cheng, “Automated Optimization of Steel Reinforcement in RC Building Frames Using Building Information Modeling and Hybrid Genetic Algorithm,” *Automation in Construction*, vol. 90, pp. 39–57, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.01.013
- [13] M. T. H. Khondoker, “Automated Reinforcement Trim Waste Optimization in RC Frame Structures Using Building Information Modeling and Mixed-Integer Linear Programming,” *Automation in Construction*, vol. 124, pp. 103599, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103599
- [14] The Association of Siamese Architects under Royal Patronage, *Thailand BIM Guideline*, Plus press Company Limited, 2015, ch. 1–2, pp. 2–14
- [15] I. Autodesk, “Dynamo Developer Resources.” dynamobim.org. <https://dynamobim.org/>. (accessed Aug. 1, 2021)
- [16] T. E. Seghier, Y. W. Lim, M. H. Ahmad and W. O. Samuel, “Building Envelope Thermal Performance Assessment Using Visual Programming and BIM, based on ETVV Requirement of Green Mark and GreenRE,” *International Journal of Built Environment and Sustainability*, vol. 4, no. 3, pp. 227–235, 2017, doi: 10.11113/ijbes.v4.n3.216
- [17] D. Team, “DiRoots Connecting the Dots,” diroots.com. <https://diroots.com/revit-plugins/revit-to-excel-sheetlink/>. (accessed Aug. 1, 2021)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสำหรับถังตกตะกอนชนิด หมุนเวียนตะกอน

A Study of Factor on Turbidity Removal Efficiency for Sludge Recirculation Clarifier

วิวัฒน์ อ่อนนาคกล้า*

โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์, การประปานครหลวง ปลาบาง บางกรวย นนทบุรี 11130

Wiwat Onnakklum*

Mahasawat Water Treatment Plant, Metropolitan Waterworks Authority, Plaibang, Bangkrui, Nonthaburi, 11130,
Thailand

*Corresponding Author E-mail: wp_js38@hotmail.com

Received: Aug 12, 2021; Revised: Sep 29, 2021; Accepted: Oct 29, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน โดยการควบคุมอัตราการเติมสารส้ม 14 มิลลิกรัม/ลิตรและอัตราผิวน้ำสัน 3.2 เมตร/ชั่วโมง ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของความเร็วรอบใบกวนตะกอน 100, 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ และความเร็วรอบใบกวาดตะกอน 0.65, 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนและผลรวมของทั้ง 2 ตัวแปร ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอย่างมีนัยสำคัญ การควบคุมความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน จะต้องควบคุมให้ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนให้ลดหลั่นกันลงอย่างเหมาะสม (Tapered Velocity Gradient) โดยความเร็วรอบของใบกวนตะกอนที่มีค่าสูง จะต้องควบคุมให้ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนให้มีค่าต่ำ และความเร็วรอบของใบกวนตะกอนที่มีค่าต่ำ จะต้องเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนให้มีค่าสูง เพื่อให้อนุภาคตะกอนสามารถรวมตัวกันและไม่เกิดการแตกตัว จะส่งผลให้สามารถกำจัดความขุ่นได้ดี จุดที่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุด คือ ความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน 120 และ 0.65 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน 33.2 และ 14.7 วินาที⁻¹ มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ $93.19 \pm 1.51\%$

คำสำคัญ: ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน, ใบกวนตะกอน, ใบกวาดตะกอน, ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น, ระบบผลิตน้ำประปา

Abstract

This paper aims to study of factor on turbidity removal efficiency for sludge recirculation clarifier. Aluminum sulphate adding rate and surface loading rate were controlled by 14 mg/l and 3.2 m/h, respectively. The results were compared turbidity removal efficiency by impeller rotating speeds (100, 110, 120 and 130 rev/h) and scraper rotating speeds were varied (0.65, 0.75, 0.85 and 0.95 rev/h). and scraper rotating speeds, Experimental found that impeller rotating speeds, scraper rotating speeds and interaction of impeller rotating speeds and scraper rotating speeds were

significantly affected on turbidity removal efficiency. Velocity gradient of impeller rotating speeds and scraper rotating speeds should be controlled in tapered velocity gradient. A fast impeller rotating speed and a slow scraper rotating speed or a slow impeller rotating speed and a fast scraper rotating speed should be set up for maintaining formed floc which affected high turbidity removal efficiency. The best turbidity removal condition was 120 rev/h of impeller rotating speeds and 0.65 rev/hr of scraper rotating speeds, which was 33.2 second^{-1} of velocity gradient of impeller, 14.7 second^{-1} of velocity gradient of scraper. And, the best turbidity removal efficiency was $93.19 \pm 1.51\%$.

Keywords: Sludge recirculation clarifier, impeller, scraper, turbidity removal efficiency, water treatment

1. บทนำ

ถังตกตะกอน เป็นเครื่องจักรในกระบวนการตกตะกอน สำหรับระบบผลิตน้ำประปา ทำหน้าที่ในการแยกสารแขวนลอย คอลลอยด์ สารอินทรีย์ รวมเรียกว่า “ตะกอน” ออกจากน้ำดิบ โดยอาศัยการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของตะกอน เรียกว่า “สารตกตะกอน” ที่มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำดิบร่วมกับการควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนต์ของการผสมให้มีความเหมาะสม จะทำให้อนุภาคตะกอนในน้ำดิบสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่เรียกว่า “ฟล็อก (Floc)” และสามารถแยกตัวออกมาได้

ถังตกตะกอน ชนิด หมุนเวียน ตะกอน (Sludge recirculation clarifier) เป็นถังตกตะกอนรูปแบบหนึ่ง ซึ่งรวมเอาการรวมตะกอน (Flocculation) และการตกตะกอน (Sedimentation) ไว้ด้วยกัน และอาศัยการใช้ฟล็อกที่เกิดจากการรวมตะกอน มาใช้ในการดักจับตะกอนที่เข้ามาใหม่ เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียกับถังตกตะกอนแบบทั่วไป (Plain sedimentation tank) พบว่า ถังตกตะกอน ชนิด หมุนเวียนตะกอนจะมีขนาดเล็กกว่าถังตกตะกอนแบบทั่วไป ทำให้ประหยัดพื้นที่ แต่การควบคุมการทำงานของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน จะต้องใช้ทักษะของเจ้าหน้าที่ควบคุมที่สูงกว่า เนื่องจากต้องปรับตั้งและควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนต์ ของการรวมตะกอนให้เหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบ

การรวมตะกอนหรือการกวนช้าเป็นการกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้ตะกอนในน้ำดิบที่ผสมกับสารตกตะกอนแล้ว เกิดการไหลเวียนและชนกัน จนตะกอนในน้ำดิบเกิดการรวมตัวกันจนเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ ในการกวนเพื่อรวม

ตะกอน ควรมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ในการกวนประมาณ 20–70 วินาที⁻¹ [1]

การตกตะกอน เป็นการควบคุมความเร็วของน้ำที่ผ่านการรวมตะกอนให้ไหลผ่านอย่างช้าๆ และอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการดึงดูดฟล็อกในน้ำให้เกิดการแยกชั้นกับน้ำส่วนที่ใส ควรมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำในถังตกตะกอนประมาณ 2–4 ชั่วโมง [1]

หลักการทำงานของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนดังแสดงในรูปที่ 1 จะเริ่มจากน้ำดิบที่ผ่านการผสมกับสารตกตะกอนแล้ว จะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนทางท่อทางเข้า หมายเลข 1 เข้าสู่บริเวณกวนช้าหมายเลข 2 จากนั้นน้ำดิบจะถูกใบกวนตะกอนหมายเลข 3 บังคับให้เกิดการไหลเวียนอยู่ภายในบริเวณกวนช้า ทำให้อนุภาคของตะกอนเกิดการชนกันและรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และตกลงสู่ก้นถังตกตะกอน จากนั้นตะกอนบริเวณก้นถังตกตะกอนจะถูกใบกวาดตะกอนหมายเลข 4 กวาดอย่างช้าๆ ช่วยทำให้ตะกอนสามารถรวมตัวกันและมีขนาดที่เพิ่มขึ้น โดยจะต้องทำการระบายตะกอนออกเป็นระยะโดยท่อหมายเลข 5 ไม่ให้มากหรือน้อยจนเกินไป เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของชั้นตะกอนให้มีความเหมาะสม และน้ำส่วนที่ใสจะไหลผ่านขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนและไหลลงสู่รางรับน้ำหมายเลข 6 ไหลไปยังขั้นตอนต่อไป

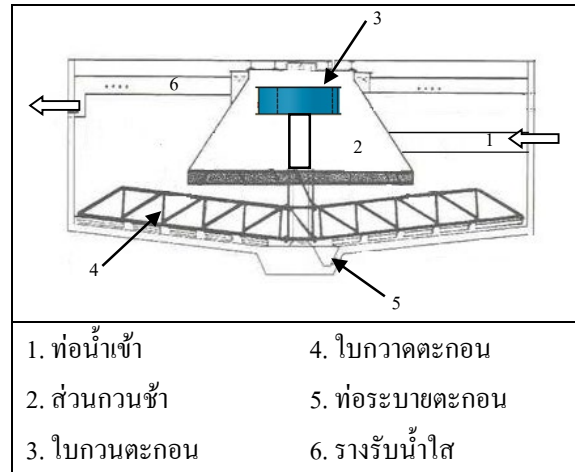
การควบคุมการทำงานของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน ประกอบไปด้วย 1.การพิจารณาเลือกใช้สารตกตะกอนหรือสารช่วยตกตะกอน ให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำดิบในแต่ละแหล่งน้ำดิบ บางแหล่งอาจจะเติมสารตกตะกอนเพียงชนิดเดียว แต่บางแหล่งอาจจะต้องเติมสารตกตะกอนหรือสารช่วย

ตกตะกอนมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป ขึ้นอยู่กับค่า pH, ความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำดิบ [2-4] 2.อัตราการเติมสารตกตะกอนที่มีความเหมาะสมกับน้ำดิบในแต่ละแหล่ง ถ้าอัตราการเติมสารตกตะกอนน้อยเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่ำ ถ้าอัตราการเติมสารตกตะกอนมาก ทำให้ความขุ่นกลับมามีค่าสูงขึ้น [5-7] 3.การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนต์หรืออัตราการกวนให้มีความเหมาะสม อัตราการกวนที่น้อยเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการรวมตะกอน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าต่ำ อัตราการกวนที่มากเกินไปจะส่งผลให้ตะกอนที่จับตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกลับมีค่าน้อยลง [8-9]

วิจารณ์ เสนอแนะว่า ผลของความเร็วรอบใบกวนตะกอนและอัตราน้ำล้นผิว ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยความเร็วรอบใบกวนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ในช่วงความเร็วรอบใบกวน 5-20 รอบ/นาที และอัตราน้ำล้นผิวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 30-60 เซนติเมตร/นาที [10]

ลัดดา เสนอแนะว่า ผลของความเร็วรอบใบกวนตะกอนและเวลาในการตกตะกอน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยความเร็วรอบใบกวนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ในช่วงความเร็วรอบใบกวน 5-20 รอบ/นาที และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นไม่เพิ่มขึ้นอีก และรูปร่างของใบกวนตะกอนส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น [11]

ศุภวิช เสนอแนะว่า ความขุ่นน้ำออกจากการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมความเร็วเกรเดียนต์และระยะเวลาการกวนของใบกวนตะกอนของการตกตะกอน และการรวมตะกอนแบบลดหลั่น (Tapered flocculation) จะสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าการรวมตะกอนแบบขั้นตอนเดียว โดยการรวมตะกอนแบบ 3 ขั้นตอนจะมีแนวโน้มสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าแบบ 2 ขั้นตอน [12]



รูปที่ 1 แสดงถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน จะขึ้นอยู่กับอัตราการกวน เวลาการกวนและอัตราน้ำล้นผิว ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน จะเป็นการรวมตะกอนแบบ 2 ขั้นตอน โดยมีใบกวนตะกอนเป็นการรวมตะกอนขั้นแรก และใบกวาดตะกอนเป็นการรวมตะกอนในขั้นที่ 2 และจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะให้ความสนใจเฉพาะการรวมตะกอนในขั้นแรกมากกว่า บทความนี้จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนทั้งในส่วนของการรวมตะกอนขั้นแรกและขั้นที่ 2 ในการทดลองนี้จะพิจารณาความเร็วรอบของใบกวนตะกอน ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน รวมไปถึงผลรวมของทั้ง 2 ปัจจัย

2. วัตถุประสงค์

2.1.ถังตกตะกอน

ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน เป็นถังตกตะกอนทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังตกตะกอน 58 เมตร ความสูง 5 เมตร มีบริเวณกวนช้า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 เมตร ประกอบไปด้วยใบกวนตะกอนชนิด Backward Blade ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เมตร สูง 1.27 เมตร ขนาด 37 kW และบริเวณก้นถังตกตะกอนมีใบกวาดตะกอน ชนิด Rack ขนาด 3.7 kW และมีท่อน้ำเข้าขนาด 1.5 เมตร มีอัตราการผลิตสูงสุด 210,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน หรือ อัตราน้ำล้น 3.2 เมตร/ชั่วโมง

2.2. น้ำดิบ

น้ำดิบที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดิน โดยดัชนีที่ใช้บ่งชี้คุณสมบัติของน้ำดิบใช้ในการวิจัยคือค่าความขุ่น ในหน่วย Nephelometric Turbidity Unit (NTU)

ความขุ่น เกิดจากการที่มีสารแขวนลอยขนาดเล็ก ซึ่งมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ในน้ำ สารแขวนลอยดังกล่าวเมื่ออยู่ในปริมาณมากจะหักเหแสงที่มาจากกระทบบทำให้มองเห็นลักษณะของน้ำมีลักษณะขุ่น โดยน้ำดิบจากแหล่งน้ำที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าความขุ่นน้ำดิบอยู่ใน ช่วง 25–35 NTU มีความเป็น ด่างอ่อนๆ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ในการวิจัย

ดัชนีคุณภาพน้ำดิบ	ช่วงใช้งาน
ความขุ่น (NTU)	25–35
pH	8.0–8.2
อุณหภูมิ (°C)	26–28
Total Organic Carbon (มก./ลิตร)	1.8–2.0
Alkalinity (มก./ลิตร)	90–100

2.3. สารตกตะกอน

สารตกตะกอน ที่ใช้ คือ สารส้ม เนื่องจากสารส้มเป็นสารตกตะกอนได้รับความนิยมมากที่สุด หาได้ง่ายในทุกพื้นที่ มีความง่ายต่อการใช้งานและการขนส่ง [13] การเติมสารส้มเป็นสารตกตะกอน จะต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ ค่าความกระด้างของน้ำ (Alkalinity) ให้มีความเหมาะสมกับน้ำดิบ เนื่องจากสารส้มเป็นสารที่มีความเป็นกรดเมื่อเติมลงในน้ำ จะส่งผลให้ค่า pH และ Alkalinity ของน้ำลดน้อยลง โดยที่ค่า pH เหมาะสมสำหรับการใช้สารส้ม คือ 6.0–7.5 และค่า Alkalinity มีค่าไม่น้อยกว่า 60 มิลลิกรัม/ลิตร [1],[14]

3. วิธีการวิจัย

3.1. การเก็บข้อมูล

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วัดค่าความขุ่นน้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบ โดยใช้เครื่องวัดความขุ่นชนิด Nephelometric

2. ปรับอัตราการผลิตที่ 210,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน คิดเป็นอัตราการน้ำสิ้นผิว 3.2 เมตร/ชั่วโมง ซึ่งเป็นการเดินถังตกตะกอนที่จุลุดออกแบบ

3. เลือกสัดส่วนการเติมสารส้มต่อปริมาณน้ำดิบ พิจารณาเลือกจากผลการทดสอบด้วยวิธี Jar Test ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยการทดสอบที่ความขุ่นน้ำดิบ 30.9 NTU คัดเลือกพิจารณาควบคุมความขุ่นน้ำไม่เกิน 4 NTU[15] จะได้สัดส่วนการเติมสารส้มต่อปริมาณน้ำดิบ 14 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นอัตราการเติมสารส้มที่อัตราการเติม 360 ลิตร/ชั่วโมง

4. ปรับความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 100, 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ และความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65, 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ ทำการทดลอง จำนวน 5 ครั้ง/การทดลอง

5. วัดค่าความขุ่นน้ำออกจากถังตกตะกอน โดยใช้เครื่องวัดความขุ่นชนิด Nephelometric

6. คำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนและค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน และใบกวาดตะกอน

3.2. การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ความสามารถในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสามารถชี้วัดได้จากปริมาณความขุ่นที่ถังตกตะกอนสามารถกำจัดออกจากรูน้ำดิบได้ เรียกว่า “ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น” คำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่าความขุ่นที่ถังตกตะกอนสามารถกำจัดออกไปต่อค่าความขุ่นน้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบ ดังสมการ (1)

$$\%Eff = \frac{T_{rw} - T_{cw}}{T_{rw}} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่ %Eff คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)

T_{rw} คือ ความขุ่นน้ำดิบ (NTU)

T_{cw} คือ ความขุ่นน้ำหลังตกตะกอน (NTU)

ค่าความเร็ว เกรเดียนต์ คือ ระดับของความปั่นป่วนของน้ำภายในถังกวน เป็นดัชนีใช้สำหรับบ่งชี้อัตราการกวนผสมกันระหว่างสารเคมีและน้ำ ดังสมการที่ (2) ของ Camp and Stein [1]

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (2)$$

โดยที่ G คือ ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (วินาที⁻¹)

P คือ กำลังของใบกวน (W)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Pa.s)

V คือ ปริมาตรของถังกวน (ลบ.ม.)

4. ผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน ในการทดลองนี้จะควบคุมอัตราการเติมสารส้ม 14 มิลลิกรัม/ลิตรและอัตราน้ำล้นผิว 3.2 เมตร/ชั่วโมง ในการทดลองจะศึกษาความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100, 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง และความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65, 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง และผลรวมของทั้ง 2 ตัวแปรผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA แบบ 2 ตัวแปร ดังแสดงใน **ตารางที่ 3** จะพบว่า ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน, ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนและผลรวมของความเร็วยรอบของใบกวนตะกอนและความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ($p\text{-value} \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาอัตราการเติมสารส้มด้วยวิธีJar Test

ดัชนีคุณภาพ	น้ำดิบ	อัตราการเติมสารส้ม			
		10	12	14	16
ความขุ่น (NTU)	30.9	7.1	4	2.7	1.7
pH	8.0	7.8	7.7	7.6	7.6
Alkalinity (มก./ลิตร)	102	100	98	96	95

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ผลของความเร็วยรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วย ANOVA

ตัวแปร	p-value
ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน	0.000
ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน	0.003
Interaction	0.000

จากการทดลองผลของความเร็วยรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ผลการทดลอง ดังแสดงใน **รูปที่ 2,3** และ **ตารางที่ 4** พบว่า กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง เมื่อความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น ดังแสดง **รูปที่ 2(ก)** โดยกรณีความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ $83.09 \pm 1.67\%$ เนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์ในการกวนทั้งของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนมีค่าไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้น เป็น 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะทำให้ความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้นดังแสดงใน **ตารางที่ 5** ทำให้อนุภาคตะกอนสามารถรวมตัวกันได้และส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น

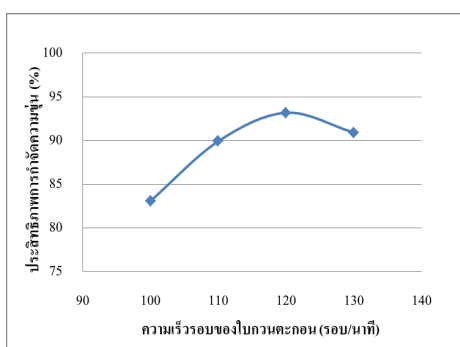
กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.75 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่ากรณีความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ $92.38 \pm 1.09\%$ เนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์ในการกวนทั้งใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนเพียงพอต่อการกำจัดตะกอน และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้น เป็น 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะทำให้ความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้นดังแสดงใน **ตารางที่ 5** ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง ดังแสดงใน **รูป 2(ข)** เนื่องจากอนุภาคตะกอนที่ได้รับการรวมตัวกันจากใบกวนตะกอน เกิดการแตกตัวออกเนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาด

ตะกอนมีค่าสูงเกินไป แต่เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกับกรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่า เมื่อความเร็วแรงแคียนต์ของใบกวาดตะกอนและใบกวาดตะกอน มีค่าไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้โดยการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนหรือใบกวาดตะกอนอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้สามารถรวมตะกอนได้มากขึ้น แต่ถ้าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าที่ดี มีการรวมตะกอนที่ดีอยู่แล้ว เกิดการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนหรือใบกวาดตะกอนอย่างใดอย่างหนึ่ง จะทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันดีแล้ว เกิดการแตกตัวออกจากกันทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง

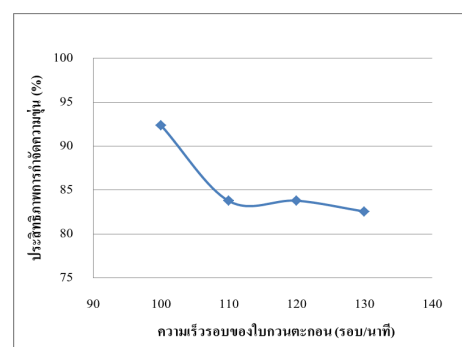
กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.85 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่ากรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 100 และ 110 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 92.35 ± 1.30 และ $91.02 \pm 1.03\%$ ตามลำดับ แต่เมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนเพิ่มขึ้นอีก กลับมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ลดต่ำลง ดังแสดงรูปที่ 2(ก) เนื่องจากความเร็วแรงแคียนต์ของใบกวาดตะกอนที่สูง ทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้ว เกิดการแตกตัวทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง แต่กรณีความเร็วรอบของใบกวาด

ตะกอน 0.95 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่ากรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 100, 110 และ 120 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 88.02 ± 1.59 , 90.52 ± 0.68 และ $88.28 \pm 1.10\%$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2(ง) ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าสูงขึ้น โดยเกิดจากการที่อนุภาคตะกอนที่เกิดการแตกตัวไปแล้ว จากความเร็วแรงแคียนต์ที่สูงเกินไป สามารถรวมตัวกันได้อีกครั้ง จากการเพิ่มความเร็วแรงแคียนต์ของใบกวาดตะกอนให้สูงขึ้นไปอีก จนสามารถทำให้อนุภาคตะกอนที่แตกตัวไปแล้วสามารถรวมตัวกันได้อีกใหม่

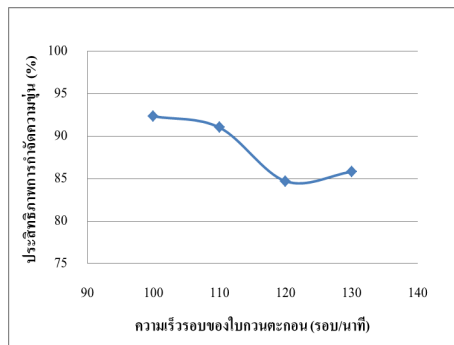
กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่าเมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนเพิ่มสูงขึ้นไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกลับมีค่าลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนมีค่าต่ำเกินไป จะไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น ต่อมาเมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนเพิ่มสูงขึ้นทำให้สามารถรวมตะกอนและกำจัดตะกอนได้ดีขึ้น แต่เมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนเพิ่มสูงขึ้นไปอีก จะส่งผลให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้ว เกิดการแตกตัวทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกลับมามีค่าน้อยลง



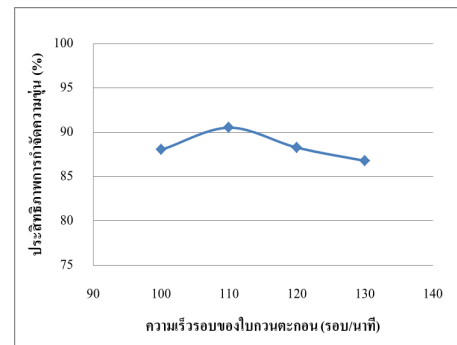
(ก)



(ข)



(ค)

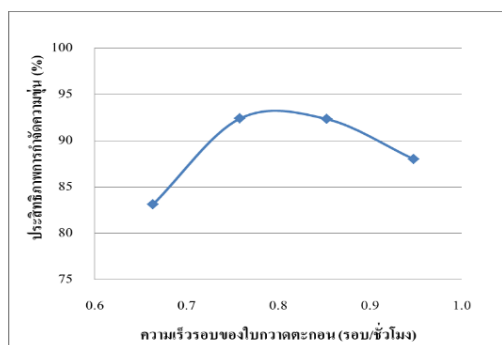


(ง)

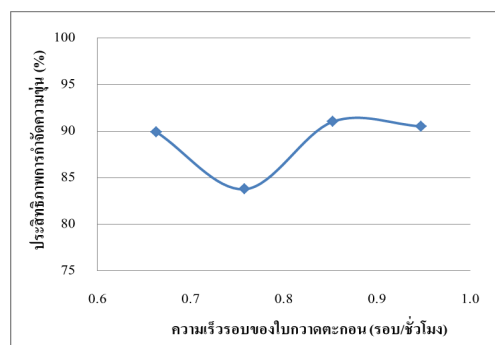
รูปที่ 2 ผลของความเร็วรอบของใบกวนตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น กรณี (ก) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง (ข) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 0.75 รอบ/ชั่วโมง (ค) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 0.85 รอบ/ชั่วโมง (ง) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 0.95 รอบ/ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนในตารางที่ 4 จะพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง คือ 1.ค่าความเร็วเกรเดียนต์ไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนเท่ากับ 100 และ 0.65 รอบ/ชั่วโมง มีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน 27.1 และ 14.7 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 ซึ่งไม่เพียงพอต่อการรวมตะกอนส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าต่ำ 2.Floc Growth ค่าความเร็วเกรเดียนต์เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนมีค่าเพียงพอต่อการรวมตะกอนส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าสูงขึ้น สามารถทำได้ โดยการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเป็น 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอน 29.5, 33.2 และ 35.2 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 และใช้ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง มีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน 14.7 วินาที⁻¹ หรือใช้ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง และเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง จะมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอน 27.1

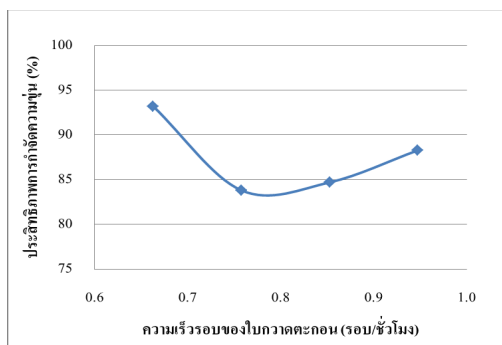
วินาที⁻¹ และใบกวาดตะกอน 15.6, 16.5 และ 17.3 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งค่าความเร็วเกรเดียนต์ที่เพิ่มขึ้นจากทางใดทางหนึ่งสามารถไปชดเชยความเร็วเกรเดียนต์ที่ไม่เพียงพอของการรวมตะกอนได้ 3.Floc Breakage เป็นช่วงค่าความเร็วเกรเดียนต์สูงเกินไป ทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง โดยความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอน 29.5, 33.2 และ 35.2 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งสามารถรวมตะกอนได้แล้วและเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนจาก 0.65 เป็น 0.75 รอบ/ชั่วโมง และมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 14.7 เป็น 15.2 วินาที⁻¹ ทำให้ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอนมีค่าสูงเกินไป ทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง 4.Floc Regrowth เป็นช่วงค่าความเร็วเกรเดียนต์ที่สูงกว่าช่วง Floc Breakage แต่สามารถที่จะรวมเอาอนุภาคตะกอนเกิดการแตกตัวสามารถกลับมารวมตัวกันได้อีกครั้ง โดยการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนจาก 0.75 เป็น 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง ทำให้ค่าความเร็วเกรเดียนต์เพิ่มขึ้นจาก 15.2 เป็น 16.5 และ 17.3 วินาที⁻¹ ตามลำดับ



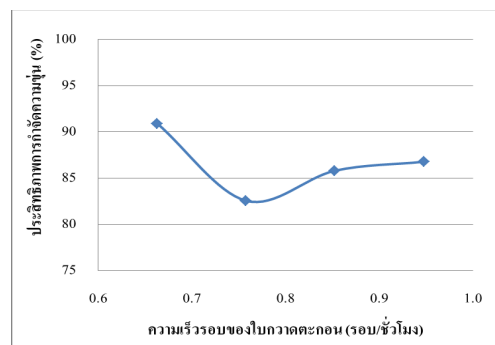
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3 ผลของความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น กรณี (ก) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง (ข) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 110 รอบ/ชั่วโมง (ค) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 120 รอบ/ชั่วโมง (ง) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 130 รอบ/ชั่วโมง

การทำงานของใบกวาดตะกอนและใบกวาดตะกอนทำหน้าที่กวาดเพื่อรวมอนุภาคตะกอนให้มีขนาดใหญ่ในการกวาดเข้า ใบกวาดตะกอน ทำหน้าที่ในการสร้างการไหลเวียนของอนุภาคตะกอนในน้ำดิบภายในบริเวณกวาดเข้า ทำให้เกิดการชนกันของอนุภาคตะกอน ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนที่สูงขึ้นจะทำให้โอกาสในการรวมตะกอนเพิ่มสูงขึ้น แต่ความเร็วรอบใบกวาดตะกอนที่มากเกินไป จะส่งผลให้อนุภาคตะกอนที่จับตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวทำให้อนุภาคตะกอนเกิดการฟุ้งกระจายและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ใบกวาดตะกอน ทำหน้าที่กวาดเพื่อให้อนุภาคตะกอนที่จับตัวกันแล้ว สามารถรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนที่เหมาะสม จะช่วยในการรวมอนุภาคให้อนุภาคของตะกอน ให้สามารถจับกันและรวมตัวกัน

เป็นอนุภาคตะกอนขนาดใหญ่ และไม่ลอยออกไปกับน้ำใส การควบคุมความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนและใบกวาดตะกอนจะต้องควบคุมให้สอดคล้องกัน โดยใช้หลักการรวมตะกอนแบบลดหลั่น ซึ่งความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดจะต้องมากกว่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน [1] และความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนและความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนจะต้องมีความเหมาะสมและสอดคล้องกันเพื่อให้อนุภาคของตะกอนเกิดการไหลเวียนและชนกันจนสามารถจับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้และไม่เกิดการแตกตัวของอนุภาคตะกอน อนุภาคของตะกอนที่เกิดการแตกตัวเนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์มาก สามารถกลับมารวมตัวใหม่ได้อีกครั้งโดยเพิ่มความเร็วเกรเดียนต์ในส่วนใบกวาดตะกอน เพื่อให้เกิดการรวมตะกอนใหม่อีกครั้งหนึ่ง [10],[11],[16]

ตารางที่ 4 ผลของความเร็วยรอบของใบกวนตะกอน 100–130 รอบ/ชั่วโมง และ ความเร็วยรอบของใบกวาดตะกอน 0.65–0.95 รอบ/ชั่วโมง ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน (%)

ความเร็วยรอบของใบกวาด ตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)	ความเร็วยรอบของใบกวนตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)			
	100	110	120	130
0.65	83.09±1.67	89.93±0.81	93.19±1.51	90.92±0.56
0.75	92.38±1.09	83.77±0.93	83.81±0.78	82.57±1.60
0.85	92.35±1.30	91.02±1.03	84.70±1.49	85.81±1.21
0.95	88.02±1.59	90.52±0.68	88.28±1.10	86.78±1.28

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบ
กวนตะกอน

ความเร็วยรอบของใบกวน ตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)	ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (วินาที ⁻¹)
100	27.1
110	29.5
120	33.2
130	35.2

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบ
กวาดตะกอน

ความเร็วยรอบของใบกวาด ตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)	ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (วินาที ⁻¹)
0.65	14.7
0.75	15.6
0.85	16.5
0.95	17.3

นอกจากการควบคุมความเร็วยรอบของใบกวน
ตะกอนและใบกวาดตะกอนแล้ว การเลือกชนิดสาร
ตกตะกอนหรือสารช่วยตกตะกอน ให้มีความเหมาะสม
กับคุณสมบัติของน้ำดิบ พร้อมทั้งควบคุมอัตราการเติม
สารตกตะกอน [2] และการควบคุมอัตราน้ำสิ้นผิวให้มีความ
เหมาะสมด้วยเช่นกัน [17] จึงจะส่งผลให้สามารถ
ควบคุมการทำงานของถังตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
และประสิทธิผลที่ดีในการกำจัดความขุ่นในถัง
ตกตะกอน

5. สรุป

จากการศึกษาปัจจัยที่ผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด
ความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน โดย
การควบคุมความเร็วยรอบของใบกวนตะกอนและ
ความเร็วยรอบของใบกวาดตะกอน สรุปผลการทดลองได้
ดังนี้

1. ความเร็วยรอบของใบกวนตะกอน, ความเร็วยรอบ
ของใบกวาดตะกอนและผลรวมของทั้ง 2 ตัวแปรส่งผล
ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอย่างมีนัยสำคัญ

2. การควบคุมความเร็วยรอบของใบกวนตะกอนและ
ความเร็วยรอบของใบกวาดตะกอน จะควบคุมในลักษณะ
ที่ ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนมีค่าสูงกว่า
ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน และมีค่า
ความเร็วเกรเดียนต์ที่ลดหลั่นกันและสอดคล้องกัน
เพื่อให้อนุภาคของตะกอนเกิดการรวมตัวกันและไม่เกิด
การแตกตัว โดยความเร็วยรอบของใบกวาดตะกอนเป็นตัว
แปรที่สำคัญในการรวมตะกอนแบบลดหลั่นในขั้นตอน
ที่ 2 ทำให้อนุภาคตะกอนเกิดการรวมตัวกัน แตกตัว หรือ
สามารถรวมตัวกันใหม่

3. จุดที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดีที่สุด คือ
ความเร็วยรอบของใบกวนตะกอน 120 รอบ/ชั่วโมง ค่า
ความเร็วเกรเดียนต์ 33.2 วินาที⁻¹ และความเร็วยรอบของ
ใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง ค่าความเร็วเกรเดียนต์
14.7 วินาที⁻¹ โดยมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
93.19 ± 1.51%

4. การควบคุมถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน
จะต้องควบคุมความเร็วยรอบของใบกวนตะกอนและ

ความเร็วรอบของใบกวดตะกอน ให้มีความเหมาะสม และสอดคล้องกับคุณสมบัติของน้ำดิบ, ชนิดของสารตกตะกอน/สารช่วยตะกอน, อัตราการเติมสารตกตะกอน/สารช่วยตะกอน และอัตราน้ำสิ้นพิว โดยการใช้การพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและประสิทธิผลในการกำจัดความขุ่น ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน ถึงตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ดี จะสามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถลดปริมาณการใช้สารตกตะกอนลงได้ ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีลงได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Water Work Association and American Society of Civil Engineers, "Mixing, Coagulation and Flocculation," in *Water treatment plant design*, 4th ed., London, UK: McGraw-Hill, 1990, ch. 6, sec. 6.4-6.5, pp. 112–129.
- [2] Y. Tantipalakul, K. Palawatwichai, T. Detchakan and J. Khaisan, "The study of optimal coagulants for water treatment process of Metropolitan Waterworks Authority," *Burabha Journal of Science*, vol. 23, no.1, pp. 207–220, Jan., 2018.
- [3] S. Eardprapan, "Investigation of Operating Criteria and Efficiency of Sludge Blanket Clarifier at Pangpuay Water Treatment Plant, Rachaburi Province," M.E. thesis, Dept. Environ. Eng., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2002.
- [4] S. Tasutin, "Turbidity Removal from Surface Water by Aluminum Chlorohydrate," M.S. thesis, Dept. Environ. Sci., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2009.
- [5] V. Poonsawatt and T. Ratpukdi, "Optimum Alum Dosage for High Turbidity Removal in Water Treatment Plant," presented at The 20th National Graduate Research Conference, Khon Kaen, Thailand, Mar. 15, 2019 pp. 98–104.
- [6] C. Ruenmai, "Factors Affect Quality of Water Supply of Four Communities in Nonthai District, Nakorn Ratchasima," M.E. thesis, Dept. Civ. Eng., Suranari Univ. Technol., Nakornratchasima, Thailand, 2012.
- [7] A. Baghvand, A. D. Zand, N. Mehrdadi and A. Karbassi, "Optimizing Coagulation Process for Low to High Turbidity Waters Using Aluminum and Iron Salts," *American Journal of Environmental Science*, vol. 6, no. 5, pp. 442–448, 2010.
- [8] Z. Zhang, D. Liu, D. Hu, D. Li, X. Ren, Y. Cheng and Z. Luan, "Effect of Slow-Mixing on the Coagulation Performance of Polyaluminum Chloride(PACl)," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 318–323, 2013, doi: 10.1016/S1004-9541(13)60463-2.
- [9] M.A. Yukselen and J. Gregory, "The Reversibility of Floc Breakage," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 73, no. 2–3, pp. 251–259, 2004, doi: 10.1016/S0301-7516(03)00077-2.
- [10] V. Thunthithum, "Turbidity Removal by Solids Recirculation Clarifier," M.E. thesis, Dept. Environ. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 1994.
- [11] L. Thumkarun, "Effect of Paddle on Turbidity Removal by Solids Recirculation Clarifier," M.E. thesis, Dept. Environ. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 1993.
- [12] S. Cheyakul, "Control Parameter of Tapered Flocculation," M.E. thesis, Dept. Sanit. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 1988.
- [13] C. C. Dorea, "Coagulant-based emergency water treatment," *Desalination*, vol. 248, no. 1–3, pp. 83–90, May, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.05.041.

- [14] A. C. Twort, D. D. Ratnayaka and M. J. Brandt, "Storage, Clarification and Filtration of Water," in *Water supply*, 5th ed., Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2006, ch. 7, sec. 7.13, pp. 267–369.
- [15] Who Health Organization, "Acceptability Aspects: Taste, Odour and Apparence," in *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4th ed., Geneva, Switzerland: WHO press, 2011, ch. 10, sec. 10.1, pp. 219–230.
- [16] P. T. Spicer, W. Keller and S. E. Pratsinis, "The Effect of Impeller Type on Floc Size and Structure during Shear-Induced Flocculation," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 184, no. 1, pp. 112–122, 1996, doi: 10.1006/jcis.1996.0601.
- [17] S. Intrto, "Effect of pulsation rate, surface overflow rate and suction height on turbidity removal efficiency of pulsator clarifier," M.S. thesis, Dept. Sanit. Eng., Mahidol Univ., Nakorn Pathom, Thailand, 2005.

กำลังดัดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอยหลังเพลิงไหม้และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

Post-Fire Flexural Strength of The Fly Ash Concrete Beams and Rapid Cooling Down

วรัญ วงศ์ประชุม¹ และ เฉลิมพล ไชยแก้ว^{2,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
บางกระสอ เมือง นนทบุรี 11000

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
หนองแก หัวหิน ประจวบคีรีขันธ์ 77110

Warun Wongprachum¹ and Chalermphol Chaikaew^{2,*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Bang Krasor, Nonthaburi, 11000, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Wang Klai Kangwon Campus, Nong Kae, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, 77110, Thailand

*Corresponding Author E-mail: chalermphol.c@rmutr.ac.th

Received: Aug 27, 2021; Revised: Oct 25, YEAR; Accepted: Oct 29, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอยหลังสภาวะเพลิงไหม้และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และผลกระทบของระยะเวลาที่สัมผัสความร้อน ตัวอย่างทดสอบ คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยขนาด 10×10×35 เซนติเมตร แบ่งออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ 1) คานคอนกรีตผสมเถ้าลอย 2) คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไหม้และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (ด้วยการแช่น้ำ) 3) คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไหม้และเย็นตัว (ในอากาศ) กระบวนการทดสอบ คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะถูกนำไปเผาไฟอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที จากนั้นจึงนำไปทดสอบการรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M ผลการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังดัดสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่สัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น และตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำจะสูญเสียค่ากำลังดัดน้อยกว่าตัวอย่างที่เย็นตัวในอากาศ เนื่องจากการปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนั้น คานคอนกรีตจะมีความร้อนสะสมในอุณหภูมิที่สูงอยู่ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในคานคอนกรีตผสมเถ้าลอยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ค่ากำลังดัดลดลงตามไป และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อายุต้นกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย จะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน แต่การพัฒนากำลังที่อายุปลายของตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน แต่หากเมื่อถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากความพูนในเนื้อคอนกรีตลดลง

คำสำคัญ: สมรรถนะการรับแรงดัด, กำลังดัดคอนกรีตผสมเถ้าลอย, คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาวะเพลิงไหม้

Abstract

The purpose of this research is to test the post-fire flexural strength of the fly ash concrete beams and its rapid cooling down, as well as the effect of its exposure to heat. The test samples are three sets of 10×10×35 cm fly ash concrete beams which are 1) fly ash concrete beams, 2) fire-burnt of the fly ash concrete beams which cooled down rapidly (by soaking in the water), and 3) fire-burnt of the fly ash concrete beams which cooled down (in the air). For the experimental process, the fly ash concrete beams will be fire-burnt at the temperature of 400 degrees Celsius for 15, 30, and 45 minutes respectively. After that, the items will be brought to the standard flexural strength test of C78/C78M. The test results reveal that the flexural strength rate will decrease if the sample is being exposed to heat for a longer period of time, and the sample which is cooling down rapidly by soaking in the water will lose its flexural strength rate less than the sample which is left to be cooled down in the air. The reason was, leaving the items to cool down in the air, the item will have a rather high accumulated heat, resulting in a water evaporation in the fly ash concrete beams to occur continuously, leading to the subsiding of its flexural strength rate. The early age fly ash concrete is strength less valuable than concrete without fly ash, but at the long term it is strength higher than concrete without fly ash. However, if at high temperatures residual strength of due primarily to the reduced porosity.

Keywords: Flexural strength performance, Flexural strength of the fly ash concrete, Post-Fire flexural strength of the fly ash concrete beams

1. บทนำ

คุณสมบัติการทนความร้อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนับเป็นคุณสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับความปลอดภัยของการใช้งาน เนื่องจากในปัจจุบันมีอาคารที่เกิดเหตุเพลิงไหม้ และได้รับความเสียหายอยู่มาหลาย การวิเคราะห์เบื้องต้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะนำมาซึ่งการตรวจสอบเชิงวิศวกรรม เมื่อคอนกรีตถูกเพลิงไหม้หรืออยู่ภายใต้สถานะที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นกำลังของคอนกรีตจะมีค่าลดลงส่งผลต่อคุณสมบัติของเหล็กเสริม ซึ่งคอนกรีตมีคุณสมบัติการทนไฟได้ดีในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น [1] แต่ในอุณหภูมิที่สูงถึง 300 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง ส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์จะหดตัว ขณะที่มวลรวมมีการหดตัวน้อยกว่า เพราะเป็นวัสดุเนื้อ ซึ่งการหดตัวภายในของคอนกรีตที่ไม่สัมพันธ์กันนี้ ทำให้โครงสร้างภายในคอนกรีตเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้น [2] และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 400–600 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) ในคอนกรีตจะแตกตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ประกอบกับมีการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้น

และมวลรวมเปลี่ยนสถานะเกิดเป็นการขยายตัว ดังนั้นคอนกรีตจึงเกิดการแตกร้าวมากขึ้น [3]

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุปอซโซลานกันอย่างแพร่หลายในการเพิ่มคุณสมบัติด้านการทนความร้อนของคอนกรีต ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดก็คือ เถ้าลอย (Fly Ash) เนื่องจากมีราคาถูก เถ้าลอยจะเข้าไปปรับปรุงความทึบแน่นของโครงสร้างภายในคอนกรีต (Filling Effect) และผลิตสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก [4] และการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตก็เป็นที่ยอมรับอย่างมาก ยิ่งหากเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงด้วยนั้น จะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อคอนกรีตได้รับการปรับปรุงและมีที่หนาแน่นกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติที่ไม่ได้รับการผสมเถ้าลอย [5] แต่จากคุณสมบัติที่กล่าวมาเมื่อคอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า เนื่องจากความพรุนในเนื้อคอนกรีตมีผลต่อสถานะขยายตัวของน้ำในช่วงว่าง [6] และการรับกำลังของคอนกรีตหลังถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนไปตามระยะเวลา และอุณหภูมิที่ถูกเผาไหม้กำลังที่ลดลงจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [7]

จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเพลิงไหม้ โดยที่โครงสร้างขององค์อาคารได้รับผลกระทบหลายส่วน ได้แก่ พื้น คาน เสา ในองค์ประกอบของโครงสร้างที่ถูกเผาไหม้ภายในอาคารส่วนใหญ่บริเวณพื้นและคานจะเป็นจุดเริ่มที่ได้รับความเสียหายส่วนแรก ถึงแม้คอนกรีตจะมีคุณสมบัติที่ดีต่อการทนไฟ มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย มีกำลังอัดและกำลังดัดที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก หรืออาจกลับสูงขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย แต่ข้อด้อยของคอนกรีตตรงที่เป็นวัสดุประณีตมีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำ เมื่อคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (Concrete Covering) ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างและเป็นส่วนแรกที่ได้รับความร้อนและความเสียหายจากการเผาไหม้ ได้หลุดร่อนกะเทาะออกจากกลไกการเกิด Spalling ของคอนกรีตที่ถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงส่งผลให้เหล็กเสริมล่งหลุดห้อย โครงสร้างจะสูญเสียคุณสมบัติของเหล็กเสริมรับกำลังดึงไม่คงสภาพเป็นโครงสร้างคอมโพสิต เมื่อกำลังของคอนกรีตส่วนที่เหลืออยู่สูญเสียกำลังดัดในเวลาต่อมา โครงสร้างพื้นและคานจะเกิดการวิบัติ ซึ่งโครงสร้างพื้นและคานจะเกิดการวิบัติในรูปแบบเดียวกัน คือ จากค่ากำลังดัดที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามคานก็เป็นโครงสร้างหลักที่มีความสำคัญในการรับกำลังมากกว่าเมื่อเทียบกับพื้น เมื่อคานเกิดการวิบัติพื้นก็จะวิบัติตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลกระทบของเพลิงไหม้ที่มีผลต่อการสูญเสียกำลังดัดของคอนกรีต โดยเป็นการทดลองคานคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็ก เพื่อแสดงพฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตเพียงอย่างเดียว จากข้อมูลดังกล่าวจึงสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตส่วนที่เหลืออยู่ หลังจากคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนเป็นส่วนแรกจาก Spalling Zone ไปแล้ว และนอกจากนี้ยังสนใจศึกษาในผลกระทบหลังสภาวะเพลิงไหม้ที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วของคอนกรีต (เป็นการจำลองลักษณะการใช้น้ำในการดับเพลิงทำให้อุณหภูมิของโครงสร้างลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเหตุเพลิงไหม้อาคารส่วนใหญ่การระงับเหตุ หรือการดับเพลิงจะอาศัยการใช้น้ำเข้าดับ)

2. วัสดุ และวิธีการวิจัย

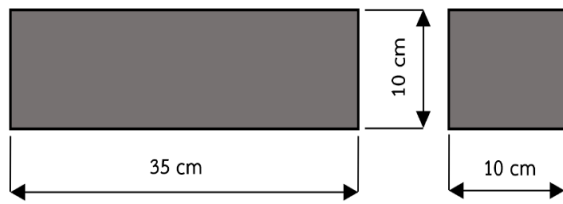
2.1. สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบสัดส่วนผสมคานคอนกรีต โดยกำหนดค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน เท่ากับ 28 MPa ทรงกระบอกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55 ค่าการยุบตัวอยู่ที่ 7.5–12.5 เซนติเมตร โดยวัสดุประสานที่ใช้จะประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ประเภท C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซังบิโหมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 [8] ตลอดจนการวิจัยและส่วนผสมคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดชื่อเรียกตัวอย่างและสัญลักษณ์ ดังนี้ OPC หมายถึง คานคอนกรีตควบคุม CFA หมายถึง คานคอนกรีตผสมเถ้าลอย และในส่วนสัญลักษณ์ที่ต่อท้าย 15 30 45 หมายถึง เเผาไหม้ที่เวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที ความคุมอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส A ปลอ่ยให้เย็นตัวในอากาศ และ W เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ โดยแต่ละชุดการทดสอบจะใช้คานคอนกรีตจำนวน 5 ตัวอย่างในการหาค่าเฉลี่ยผลทดสอบ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีต

Name	Mix Proportion (kg/m ³)			
	Cement	Fly Ash	Water	Aggregate
		30%		Fine Coarse
OPC	342	-	188	770 1,080
CFA	239	103	188	770 1,080

การทดสอบกำลังดัดจะใช้คานคอนกรีตขนาด 10×10×35 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ในขั้นตอนการหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตนั้น จะเริ่มต้นโดยผสม วัสดุประสาน ทราซ น้ำ หิน ลงในโม่ผสมให้เข้ากันก่อน คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดโดยใช้เวลาประมาณ 3–5 นาที จากนั้นทำการเทคอนกรีตลดลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ภายหลังจากหล่อคอนกรีตจะทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออก นำตัวอย่างคานคอนกรีตบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 1 ตัวอย่างคานคอนกรีต

2.2. ขั้นตอนการเผาไฟและทดสอบกำลังคัด

การเผาไฟจะใช้คานคอนกรีต โดยผ่านการเผาที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้เปลวไฟลุกไหม้อยู่ที่ผิวด้านล่างของตัวอย่างคานเท่านั้น และควบคุมความรุนแรงของไฟให้อยู่ในระดับเดียวกันตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 การควบคุมความรุนแรงของไฟนั้นทำได้โดยการปรับความแรงของวาล์วแต่ละเตาให้มีอุณหภูมิที่เท่า ๆ กัน และทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตในแต่ละจุด ทุกๆ 1 นาที ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอัตโนมัติ (IR Thermometer) เพื่อเปรียบเทียบกันในการเผาแต่ละครั้ง เนื่องจากการจำลองสภาวะการเกิดเพลิงไหม้เสมือนจริง การทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยความร้อน เมื่อเกิดความร้อนสูงถึง 400 องศาเซลเซียส ที่เวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม กรณีไม่ได้ออกแบบให้เพียงพอต่อการทนไฟ จะเริ่มกะเทาะออกมอร์ตาร์เริ่มเปลี่ยนสภาพเป็น Quicklime จึงเป็นกรณีในการเลือกเวลาและอุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ และเป็นการจำลองให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของไฟที่เกิดเพลิงไหม้อาคารในแต่ละช่วงเวลา เช่น ช่วงการก่อตัวของไฟ (Growth Period) จะใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที ความร้อนยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไปก็จะเข้าสู่ ช่วงการเผาไหม้ (Burning Period) จะใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที และช่วงนี้เองถือว่าการพัฒนาตัวของไฟได้เกิดขึ้นเต็มที่อุณหภูมิในห้องจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุได้ติดไฟและเผาไหม้จนหมด หรือมีขั้นตอนการดับเพลิงเกิดขึ้นอัตราการเผาไหม้จะลดลงซึ่งจะทำให้เข้าสู่ ช่วงการสลายตัว (Decay Period) [9] และการลดอุณหภูมิหลังการเผาไฟที่ใช้ในการทดสอบนี้ก็เป็นจำลองลักษณะเข้าสู่ช่วงสลายตัว การลดอุณหภูมิหลังการเผาไฟ โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ชุด 1) การเย็นตัวด้วยการแช่น้ำ ดัง

แสดงในรูปที่ 3 (ก) และ 2) การเย็นตัวในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3(ข)



รูปที่ 2 การเผาไฟคานคอนกรีต



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 การลดอุณหภูมิหลังการเผาไฟ

(ก) เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ (ข) ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

การทดสอบกำลังคัดสูงสุด (Maximum Flexural Strength) ได้ทำตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M [10] โดยใช้เครื่อง UTM ขนาด 1,500 kN ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่าแรงคัดสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง

UTM จะถูกนำมาคำนวณหาค่าการรับกำลังอัดสูงสุด (f_{max}) ของคานคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ตามสมการที่ (1)

$$f_{max} = \frac{P_{max}L}{bd^2} \quad (1)$$

โดย f_{max} หมายถึง กำลังอัดสูงสุด (MPa)

P_{max} หมายถึง แรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (kN)

L หมายถึง ความยาวช่วงพาดคาน (30 cm)

b หมายถึง ความกว้างคานทดสอบ (10 cm)

d หมายถึง ความสูงคานทดสอบ (10 cm)



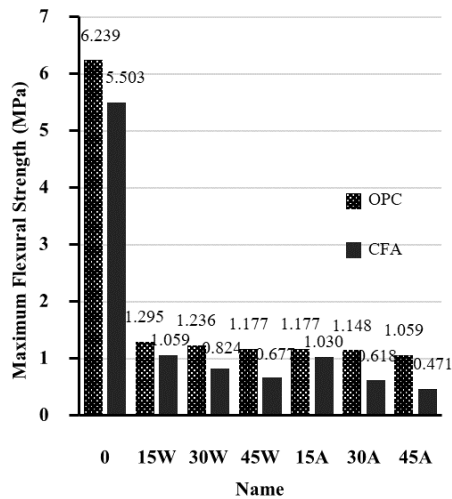
รูปที่ 4 การทดสอบกำลังอัด

3. ผลการทดลอง

3.1. ค่ากำลังอัดสูงสุดของคานคอนกรีต

ค่าเฉลี่ยกำลังอัดสูงสุดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอย (CFA) ที่ไม่ได้เผาไฟ มีค่าเท่ากับ 5.503 MPa คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไฟและเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำ (W) ที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที มีค่าเท่ากับ 1.059 MPa, 0.824 MPa และ 0.677 MPa ตามลำดับ คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไฟและเย็นตัวในอากาศ (A) ที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที มีค่าเท่ากับ 1.030 MPa, 0.618 MPa และ 0.471 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า ในระยะเวลาช่วงต้นที่ 15 นาทีแรก คานคอนกรีตที่ถูกเผาไฟค่ากำลังอัดสูงสุดจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากคอนกรีตยังมีปริมาณน้ำหรือความชื้นในช่องว่างเนื้อคอนกรีตค่อนข้างสูง เมื่อถูกเผาไฟพฤติกรรมที่น้ำในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนสภาพเป็นไอแล้วดันตัวออกมาเกิดการระเหย รวดเร็วในช่วงต้น

ส่งผลต่อการเกิดการแตกร้าวและแตกร่อน (Spalling) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนสภาพน้ำในช่องว่างและความแตกต่างกันของอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีต [11] และคานคอนกรีตที่ถูกเผาไฟเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดสูงสุดลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากคอนกรีตสัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้นปริมาณน้ำในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตจะระเหยออกไปเรื่อย ๆ ส่งผลต่อการหดตัวของผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลึกแคลเซียมซลิเกตไฮเดรต อีกทั้งจะเกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพอยู่ในรูปแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) พร้อมทั้งเกิดการขยายตัวของมวลรวม ก่อให้เกิดแรงดึงในคอนกรีตส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมลดน้อยลงจึงเกิดช่องว่างเล็ก ๆ ขึ้นมากมาย มีผลทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-Crack) ขึ้นภายในโครงสร้างคอนกรีต และขยายไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ (Macro-Crack) ต่อไป [12] และค่า Modulus of Elasticity ซึ่งเป็นคุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่คอนกรีตสูญเสียออกเนื่องจากด้านกำลังเมื่อถูกเผาไฟ และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ จะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ด้วยเหตุนี้ที่อยู่ต้นกำลังของคานคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) จึงมีค่าต่ำกว่าคานคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) ทุกระยะเวลา 15 นาที 30 นาที 45 นาที ทั้งสภาวะเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำ (W) เย็นตัวในอากาศ (A) และกำลังของคอนกรีตที่อยู่ต้นมีค่าน้อยลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอย แต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนากำลังที่อยู่ปลายของตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอย จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอายุปลาย ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในสถานะบ่มน้ำ จะมีการพัฒนากำลังจากอายุ 28 วัน จนถึงอายุ 91 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน [13] แต่ในทางกลับกันปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อคอนกรีตได้รับการปรับปรุงและมีที่หนาแน่นมาก หากเมื่อถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า เนื่องจากความร้อนในเนื้อคอนกรีตมีผลต่อสภาวะการขยายตัวของน้ำในช่วงว่าง พฤติกรรมที่น้ำในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนสภาพเป็นไอแล้วดันตัวออกมาเกิดการระเหยส่งผลต่อการแตกร้าวเสียหายได้



รูปที่ 5 กำลังดัดของคานคอนกรีต

จากการทดสอบกำลังดัดสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) และคานคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) สามารถนำค่าที่ได้มาทำการเปรียบเทียบในรูปแบบอัตราส่วนกำลังดัด ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ค่าอัตราส่วนกำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และค่าอัตราส่วนกำลังดัดจะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่สัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น โดยค่ากำลังที่ลดลงเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ดึงดูดระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ไฮดรอกไซด์ระเหยออกไป ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีที่เป็นกำลังหลักของซีเมนต์เจล เมื่อคอนกรีตสัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น ปริมาณน้ำระเหยออกไปอย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่อการหดตัวของผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ จึงเกิดการแตกร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการสูญเสีย [14] และจะเกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ซึ่งไม่อยู่ในสถานะเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำ ความชื้นและน้ำจะเข้าไปเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมออกไซด์บางส่วนให้กลับไปอยู่ในรูปสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์อีกครั้ง [15] และตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนั้น คานคอนกรีตจะมีความร้อนสะสมในอุณหภูมิที่สูงอยู่ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนกำลังดัดลดลงมากกว่าตัวอย่างที่เย็นตัวในน้ำ และแนวโน้ม

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) และคานคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) และระยะเวลาที่เผาไหม้ 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อใช้เวลาในการเผาไหม้สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังดัดลดลง โดยสามารถแสดงสมการแนวโน้มความสัมพันธ์นี้ โดย x คือ เวลาที่อยู่ในช่วง 15 นาที ถึง 45 นาที และ y คือ กำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอย (MPa) ดังแสดงในสมการที่ (2) ถึง (5) คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการแช่น้ำ

$$y = -0.0039x + 1.3538 \quad (2)$$

กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

$$y = -0.0039x + 1.2459 \quad (3)$$

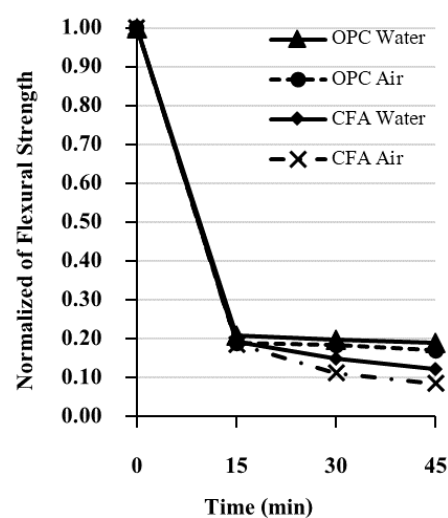
คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA)

กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการแช่น้ำ

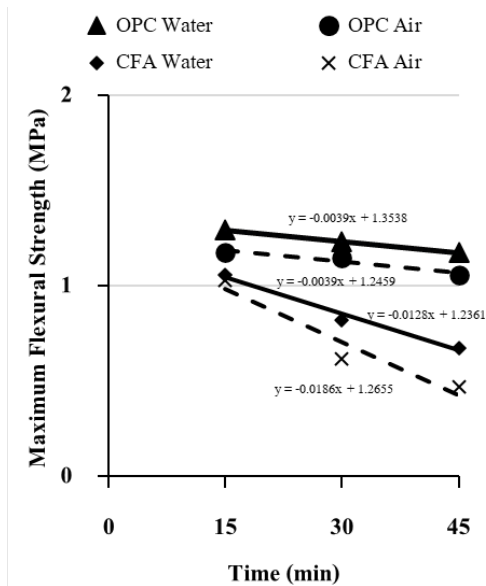
$$y = -0.0128x + 1.2361 \quad (4)$$

กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

$$y = -0.0186x + 1.2655 \quad (5)$$



รูปที่ 6 อัตราส่วนกำลังดัด



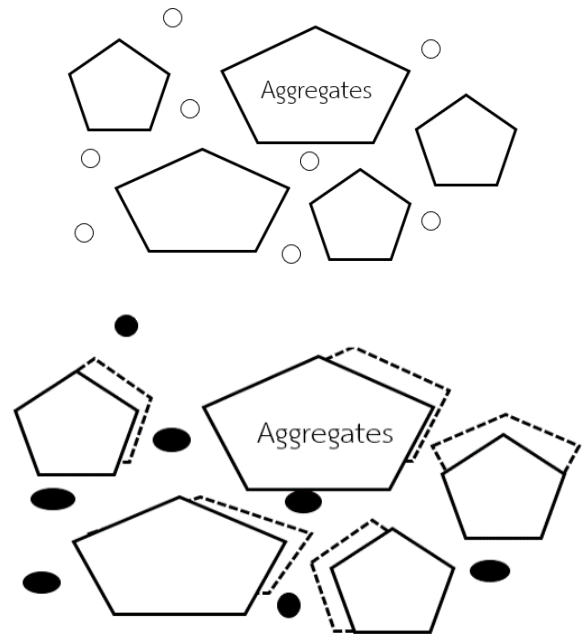
รูปที่ 7 แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดสูงสุด และระยะเวลาที่เผาไหม้

3.2.แบบจำลองการแสดงผลพฤติกรรมของคอนกรีตขณะเกิด

การเผาไหม้ และสภาพภายหลังการเผาไหม้

เมื่อคอนกรีตต้องสัมผัสกับความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเกิดการขยายตัวของมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 8 ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Void Coalescence) มีการเชื่อมรวมตัวกันกลายเป็นรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-Crack) และขยายไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ (Macro-Crack) จนเกิดการแตกหักในที่สุด [3] และจากรูปที่ 9 การละลายตัวของมวลของคราบหินปูนสีขาวตามรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต เกิดจากการที่แคลเซียมออกไซด์ ละลายตัวในน้ำ ขณะที่มีการเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสอย่างต่อเนื่อง และยังพบการเปลี่ยนสีที่เนื้อคอนกรีตบริเวณนั้นจากสีเทา กลายเป็นสีน้ำตาลไหม้ โดยการเปลี่ยนสีของเนื้อคอนกรีตดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนสีอย่างถาวร

สภาพหลังจากทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตที่ถูกเผาไหม้ พบว่าใน บริเวณใต้ท้องคานที่สัมผัสกับเปลวเพลิงโดยตรง เนื้อคอนกรีตจะหลุดร่อน กะเทาะออกมาในตำแหน่งที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบกำลังดัด ดังแสดงในรูปที่ 10 เนื่องมาจากบริเวณที่สัมผัสกับเปลวเพลิงโดยตรงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมมีกำลังลดลงอย่างมาก



รูปที่ 8 กลไกของคอนกรีตเมื่อถูกไฟไหม้



รูปที่ 9 รอยร้าวที่พบบนผิวคานคอนกรีตหลังเผาไหม้



รูปที่ 10 สภาพหลังจากทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตที่ถูกเผาไหม้

4. อภิปรายผลและสรุป

ค่ากำลังคัดสูงสุดจะมีค่าลดลง เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่สัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลต่อการหดตัวของผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลึกแคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรต เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ระเหยออกไป และตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการแช่น้ำจะมีค่ากำลังคัดที่ลดลงน้อยกว่าตัวอย่างที่เย็นตัวในอากาศ เนื่องจากการปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนั้น คานคอนกรีตจะมีความร้อนสะสมในอุณหภูมิที่สูงอยู่ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่ากำลังคัดลดลงตามไป และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ จะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ด้วยเหตุนี้ที่อายุคานกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) จึงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) และการพัฒนากำลังที่อายุปลายของตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอายุปลาย แต่หากเมื่อถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า เนื่องจากความพรุนในเนื้อคอนกรีตลดลงซึ่งมีผลต่อสภาวะการขยายตัวของน้ำในช่วงว่าง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่งานทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Botte and R. Caspee, "Post-Cooling Properties of Concrete Exposed to Fire," *Fire Safety Journal*, vol. 92, no. 3, pp. 142–150, Sep., 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.06.010.
- [2] C. S. Poon, S. Azhar, M. Anson and Y. L. Wong. "Strength and Durability Recovery of Fire-Damaged Concrete After Post-Fire-Curing," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 9, pp.1307–1318, Sep., 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00582-8.
- [3] O. Arioz, "Effects of Elevated Temperatures on Properties of Concrete," *Fire Safety Journal*, vol. 42, no. 8, pp. 516–522, Nov., 2007, doi: 10.1016/j.firesaf.2007.01.003.
- [4] Q. Li, X. Huang, Z.Huang and G. Yuan, "Bond Characteristics Between Early Aged Fly Ash Concrete and Reinforcing Steel Bar After Fire," *Construction and Building Materials*, vol. 147, no. 8, pp. 701–712, Aug., 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.184.
- [5] P. Nuaklong, P. Jongvivatsakul, T. Pothisiri, V. Sata and P. Chindaprasit, "Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Fire Resistance of Recycled Aggregate High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, Apr., 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119797.
- [6] B.Zegardło, M.Szeląg and P. Ogrodnik, "Concrete Resistant to Spalling Made with Recycled Aggregate From Sanitary Ceramic Wastes – The Effect of Moisture and Porosity on Destructive Processes Occurring in Fire Conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 58–68, Jun., 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.030.
- [7] F. Tariqa and P. Bhargava, "Flexural Behaviour of Corroded RC Beams Exposed to Fire," *Structures*, vol. 33, pp. 1366–1375, Oct., 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.05.025.
- [8] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM C618-19
- [9] G.J. Langdon-Thomas, "Fire and Buildings," in *Fire Safety In Buildings*, 1st ed. London, United Kingdom : A & C Black, 1972, ch. 5, pp. 58–86.
- [10] Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM C78 / C78M – 21

- [11] M. Ozawa S. Uchida T. Kamada and H. Morimoto, "Study of Mechanisms of Explosive Spalling in High-Strength Concrete at High Temperatures Using Acoustic Emission," *Construction and Building Materials*, vol. 37, no. 8, pp.621–628, Dec, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070.
- [12] V.Sairam, Pallapu B. J. N.Satish, K. Hemanth and K. Reddy, "Mechanical and Micro Structural Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperature," *Materials Today: Proceedings*, vol.33, no.1, pp.626–631, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.606.
- [13] T. Srichan, B.Chatveera, P. Choktaweekarn and S. Tangtermsirikul, "A Study on Curing Sensitivity of Concrete with Different Cement Types and Mineral Admixtures," *KMUTT Research and Development Journal*, vol.34, no.4, pp. 383–394, 2011.
- [14] A. Lau and M. Anson, "Effect of High Temperatures on High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research*, vol.36, no.9, pp. 1698–1707, Sep., 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.03.024.
- [15] M. Malik, S. K. Bhattacharyya and S. V. Barai, "Microstructural Changes in Concrete: Postfire Scenario," *Journal of American Society of Civil Engineers*, vol.33, no.2, pp. 1–13, Feb., 2021, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003449.

การประเมินความคุ้มค่าทางการเงินของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์บนหลังคาสำหรับภาคครัวเรือน

Financial Feasibility Study of Installing Solar Photovoltaic Rooftop for Residential Sector

ธนาพล ตันติสัตยกุล*

สาขาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

คลองหนึ่ง คลองหลวง ปทุมธานี 12120

Thanapol Tantisattayakul*

Department of Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

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

Received: Sep 2, 2021; Revised: Oct 10, 2021; Accepted: Nov 2, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประเมินความคุ้มค่าทางการเงินของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) สำหรับภาคครัวเรือนภายใต้การส่งเสริมของภาครัฐในโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับภาคประชาชน โดยใช้ระบบ ขนาด 3 kWp 5 kWp และ 10 kWp เป็นกรณีศึกษา ตัวชี้วัดในงานวิจัยใช้อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลตอบแทนจากการลงทุนทางเลือกอื่นได้ งานวิจัยได้กำหนดเกณฑ์ความคุ้มค่าทางการเงินไว้ 2 ระดับ คือ 1) MLR (6.3%) สำหรับเจ้าของบ้านที่มีภาระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัย และ 2) อัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาล (2.5%) สำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัย ผลการศึกษาพบว่า ระบบขนาด 10 kWp มีความคุ้มค่าทางการเงินโดยผ่านเกณฑ์สำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัย ในขณะที่ ระบบขนาด 3 kWp และ 5 kWp ไม่ผ่านเกณฑ์ความคุ้มค่าทางการเงินทั้ง 2 เกณฑ์ นอกจากนี้ ได้ประเมินความเสี่ยงของโครงการด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) และการวิเคราะห์สถานการณ์ (Scenario Analysis) โดยพิจารณาตัวแปร 1) สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เอง และ 2) อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า ผลการศึกษา สรุปได้ว่า โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับภาคประชาชน เหมาะสำหรับการติดตั้งเพื่อใช้ไฟฟ้าที่ผลิตได้เองภายในบ้านมากกว่าการมุ่งหวังขายไฟฟ้าคืนให้กับระบบโครงข่าย

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา, ความคุ้มค่าทางการเงิน, ภาคครัวเรือน

Abstract

This research assessed the financial feasibility of installing a solar rooftop system for households under the government's stimulus program using system sizes of 3 kWp, 5 kWp, and 10 kWp as cases study. Internal rate of return (IRR) was used as an indicator so that the results can be compared with other investment alternatives. Financial feasibility criteria was set two levels: 1) a minimum loan rate (6.3%) for homeowners having mortgage loan and 2) government bond

rate (2.5%) for homeowners without mortgage loan. The results showed that the 10 kWp system was financially feasible through the second criteria, while the 3 kWp and 5 kWp systems did not meet both of the financial feasibility criteria. In addition, a sensitivity analysis and scenario analysis were performed to assess the project risks considering the variables: 1) an electricity self-consumption ratio and 2) an annual escalation rate of electricity tariff. The results suggested that the solar rooftop is more suitable for installation for self-consumption than installation for selling the electricity back to the electrical grid.

Keywords: Solar Rooftop, Financial Feasibility, Residential Sector

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์กระจายตัวในช่วง 17–20 MJ/m²-day ระหว่างปี และมีค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปีเท่ากับ 17.6 MJ/m²-day [1] ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งปี พลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ในรูปของความร้อน แสงสว่าง หรือนำไปแปลงเป็นไฟฟ้า โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อาจอยู่ในรูปแบบการผลิตแบบรวมศูนย์ (Centralized Generation) อย่าง โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Farm) หรือ รูปแบบการผลิตแบบกระจาย (Distributed Generation) อย่างระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ประเทศไทยมีนโยบายการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาอย่างต่อเนื่อง โดยภาครัฐได้ออกมาตรการส่งเสริมทางการเงินสำหรับไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ในช่วงแรก (ประมาณ พ.ศ. 2550–2551) การสนับสนุนด้านการเงินอยู่ในรูปแบบของ แอดเดอร์ (Adder) กล่าวคือ ผู้ผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะ “เงินส่วนเพิ่ม” จากราคารับซื้อไฟฟ้าปกติในทุกหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ ต่อมา ในช่วง พ.ศ. 2556–2558 รูปแบบการสนับสนุนได้เปลี่ยนเป็นระบบฟีดอินทาร์ฟ (Feed in Tariff, FiT) โดยผู้ผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถขายไฟฟ้าให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ในอัตราค่าไฟฟ้าคงที่ในช่วงเวลาที่กำหนด [2–3] ทั้งสองมาตรการนี้เป็นมาตรการรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตจาก

พลังงานแสงอาทิตย์ ต่อมา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 นโยบายส่งเสริมเปลี่ยนจากการรับซื้อเป็นการอนุญาตให้ติดตั้งเพื่อใช้ไฟฟ้าที่ผลิตเองเป็นหลักตามแนวโน้มนโยบายลดของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ ในปัจจุบัน (พ.ศ. 2564) การส่งเสริมที่ดำเนินการอยู่คือ โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับภาคประชาชน

โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับภาคประชาชน หรือ โครงการ “โซลาร์ภาคประชาชน” เป็นโครงการที่เริ่มขึ้นใน พ.ศ. 2562 รูปแบบโครงการคือภาคครัวเรือนติดตั้ง Solar Rooftop ที่มีกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 10 kWp เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกใช้ภายในบ้านก่อน หากในช่วงเวลาที่ไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก Solar Rooftop เกินกว่าความต้องการไฟฟ้าภายในบ้าน ไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อขายคืนให้การไฟฟ้าฯ (การไฟฟ้านครหลวง หรือ การไฟฟ้าภูมิภาค ขึ้นกับจังหวัดที่อยู่) ในราคา 1.68 บาทต่อหน่วย (บาท/kWh) เป็นระยะเวลา 10 ปี (ปีที่ 11 เป็นต้นไปจะไม่สามารถขายคืนได้) ต่อมา อัตรารับซื้อไฟฟ้าถูกปรับขึ้นเป็น 2.20 บาทต่อหน่วย ในปี พ.ศ. 2564 [4] จากการส่งเสริมดังกล่าวมา ส่งผลให้กำลังการผลิตติดตั้งของไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 3 GW ในปี พ.ศ. 2561 [1] อย่างไรก็ตาม ในส่วนการติดตั้ง Solar Rooftop ของภาคครัวเรือนยังมีจำนวนน้อยกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ [5]

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยหลายชิ้นประเมินความคุ้มค่าของการติดตั้ง Solar Rooftop ของประเทศไทย [2],[3],[6–15] ในจำนวนนี้ งานวิจัย [6–11] เป็นการศึกษาความคุ้มค่าในการติดตั้ง Solar Rooftop ภายในสถาบันการศึกษาและหน่วยงานต่างๆ และ งานวิจัย [12–14] เป็นการศึกษาความ

คุ้มค่าในการติดตั้ง Solar Rooftop ภายในภาคธุรกิจ เพื่อใช้ไฟฟ้าภายในหน่วยงานหรือบริษัทตนเอง โดยปกติ ทั้ง 2 กลุ่มนี้มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลากลางวัน และ ระบบ Solar Rooftop ที่ติดตั้งส่วนใหญ่เป็นระบบขนาดใหญ่ ผลการประเมินส่วนใหญ่พบว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุน (ยกเว้น [9] ที่พบว่าไม่คุ้มค่า) อย่างไรก็ตาม ตัวชี้วัดและเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินมีความแตกต่างกันไปในแต่ละงานวิจัย งานวิจัย [2],[3] และ [15] เป็นการประเมินความคุ้มค่าของการติดตั้ง solar rooftop ในภาคครัวเรือน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้เป็นการประเมินความคุ้มค่าภายใต้นโยบายรับซื้อไฟฟ้าคืนด้วย FiT ซึ่งสิ้นสุดไปเมื่อ พ.ศ. 2558 ด้วยนโยบายการส่งเสริมที่เปลี่ยนแปลงไป ในปัจจุบัน รูปแบบผลประโยชน์ที่ผู้ติดตั้งจะได้รับมีความแตกต่างจากในอดีตเป็นอย่างมาก ณ เวลาที่เขียนงานวิจัยนี้ ยังไม่มีการศึกษาประเมินความคุ้มค่าการติดตั้ง Solar Rooftop ของภาคครัวเรือนภายใต้โครงการ โซลาร์ภาคประชาชน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของการติดตั้ง Solar Rooftop สำหรับภาคครัวเรือนภายใต้ดังกล่าวในมุมมองของเจ้าของบ้าน และวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อความคุ้มค่าเพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของเจ้าของบ้านและการวางแผนนโยบายของภาครัฐ

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การเก็บรวบรวมข้อมูลต้นทุนระบบ 2) การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงิน และ 3) การวิเคราะห์ความเสี่ยงซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.การเก็บรวบรวมข้อมูลต้นทุนระบบ

สำรวจต้นทุนระบบ Solar Rooftop ในปัจจุบัน โดยการสอบถามราคาพร้อมคำติดตั้งจากบริษัทเอกชนจำนวน 8 แห่ง ขนาดกำลังการผลิตติดตั้งที่พิจารณาในงานวิจัยนี้คือ 3 kWp 5 kWp และ 10 kWp ซึ่งเป็นขนาดสูงสุดที่ติดตั้งได้ภายใต้โครงการ โซลาร์ภาคประชาชน โดยทั่วไป พื้นที่หลังคาสำหรับติดตั้ง Solar Rooftop จะอยู่ที่ประมาณ 6–8 m²/kW ดังนั้น ระบบขนาด 3 kWp ต้องการพื้นที่หลังคาประมาณ 18–24 m² เหมาะสำหรับทาวน์เฮาส์ ระบบขนาด 5 kWp และ 10 kWp ต้องการพื้นที่หลังคาประมาณ 30–40 m² และ 60–80 m²

ซึ่งเหมาะสำหรับบ้านเดี่ยวขนาดกลาง และใหญ่ตามลำดับ ข้อมูลต้นทุนที่ได้มาได้นำมาคำนวณเป็นต้นทุนเฉลี่ยต่อขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง (บาทต่อวัตต์) ของระบบแต่ละขนาดเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยแบ่งต้นทุนระบบออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panels) 2) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และ 3) Balance of System (BOS) ซึ่งประกอบไปด้วย สายไฟ สวิตช์ อุปกรณ์จับยึดต่างๆ ค่าติดตั้ง และอุปกรณ์ที่จำเป็นอื่นๆ ในการติดตั้ง

2.2.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

ในงานวิจัยนี้ ผลตอบแทนการลงทุนที่เจ้าของบ้านจะได้รับจากการติดตั้ง Solar Rooftop แสดงอยู่ในรูปอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) ซึ่งเป็นดัชนีแสดงอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยต่อปีแบบทบต้นของโครงการในรูปร้อยละ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับผลตอบแทนจากการลงทุนทางเลือกอื่นที่ทราบอัตราผลตอบแทนในรูปร้อยละอยู่แล้วได้ง่าย ค่า IRR สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$0 = \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} \quad (1)$$

เมื่อ

CF_t คือ กระแสเงินสดสุทธิที่เจ้าของบ้านได้รับในปีที่ t (บาท/ปี) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

IRR คือ อัตราผลตอบแทนภายใน (%)

n คือ อายุของโครงการ (ปี)

t คือ ดัชนีชี้เลขปีในช่วงเวลาของโครงการ (ปี) $t = 1, 2, 3, \dots, n$

$$CF_t = B_t - Inv_t - O\&M_t \quad (2)$$

เมื่อ

B_t คือ ผลประโยชน์ที่ได้จากการติดตั้ง Solar Rooftop ในปี t (บาท/ปี)

Inv_t คือ เงินลงทุนระบบ Solar Rooftop ที่จ่ายในปีที่ t (บาท/ปี)

$O\&M_t$ คือ ค่าบำรุงรักษาระบบ Solar Rooftop ที่จ่ายในปีที่ t (บาท/ปี)

B_t ประกอบไปด้วยผลประโยชน์จากการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop ภายในบ้าน และรายได้จากการขายไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop ให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าในกรณีที่ผลิตเกินความต้องการภายในบ้าน ณ ขณะนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$B_t = (E_t \times Ratio_{self}) \times ERate_t + E_t \times (1 - Ratio_{self}) \times BuyRate_t \quad (3)$$

เมื่อ

E_t คือ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop ในปี ที่ t (kWh/ปี) คำนวณด้วยสมการที่ (4)

$Ratio_{self}$ คือ สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก solar rooftop เองภายในบ้าน (%) ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้เท่ากับ 50% ในกรณีฐาน

$ERate_t$ คือ อัตราค่าไฟฟ้าที่เจ้าของบ้านต้องจ่ายในปีที่ t (บาท/kWh)

$BuyRate_t$ คือ อัตราค่าไฟฟ้าที่ภาครัฐรับซื้อในโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ภาคประชาชนในปีที่ t เท่ากับ 2.20 บาท/kWh [5]

โดย E_t คำนวณจาก

$$E_i = InstCap \times 8760 \times CapFactor_i \times (1 - Deg_t) \quad (4)$$

เมื่อ

$InstCap$ คือ กำลังการผลิตติดตั้งของระบบ Solar Rooftop (kW)

8760 คือ จำนวนชั่วโมงใน 1 ปี (ชั่วโมง)

Deg_t คือ อัตราการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (degradation) สะสมจนถึงปีที่ t (%)

$CapFactor_i$ คือ ค่าตัวประกอบการผลิตไฟฟ้า (Capacity Factor) ในเดือน i (%) (อัตราส่วนของกำลังการผลิตเฉลี่ยต่อกำลังการผลิตติดตั้ง คำนวณจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปี / (8,760 × กำลังการผลิตติดตั้ง))

สมมติฐานทางเทคนิคในการดำเนินโครงการ และทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สรุปอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมมติฐานทางด้านเทคนิค การเงินและเศรษฐศาสตร์

พารามิเตอร์	ค่า	หมายเหตุ
สมมติฐานทางเทคนิค		
อายุของ Solar Rooftop	25 ปี	ระยะประกันโดยทั่วไปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
อายุการใช้งานของอินเวอร์เตอร์	15 ปี	[16] เปลี่ยนในปีที่ 16
อัตราการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	0.5% ต่อปี	[17–19]
อัตราการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เอง	50%	สำหรับกรณีฐาน
Capacity Factor	15%	[3]
สมมติฐานทางการเงินและเศรษฐศาสตร์		
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบ	1.0% of system cost	[8] สมมติให้เพิ่มขึ้นตามอัตราเงินเฟ้อ
อัตราค่าไฟฟ้า	4.22	สมมติให้เพิ่มขึ้นตามอัตราเงินเฟ้อ
อัตราเงินเฟ้อ	2%/year	อัตราเงินเฟ้อเฉลี่ยย้อนหลัง [20]

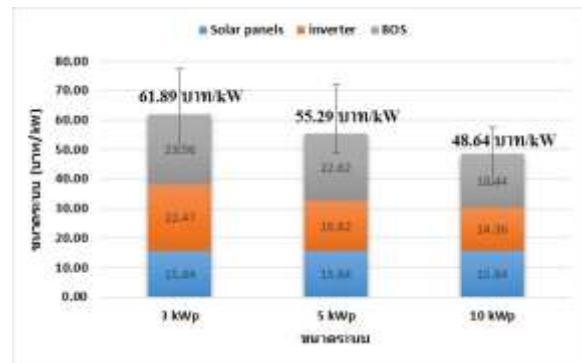
2.3.การวิเคราะห์ความเสี่ยงของโครงการ

งานวิจัยนี้ ใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) และการวิเคราะห์สถานการณ์ (Scenario Analysis) เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงของโครงการ การวิเคราะห์ของอ่อนไหว คือ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของผลตอบแทนโครงการเมื่อตัวแปรที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงทีละตัวโดยที่ตัวแปรอื่นคงที่ ในขณะที่การวิเคราะห์สถานการณ์ คือ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของผลตอบแทนโครงการเมื่อตัวแปรเปลี่ยนแปลงพร้อมกันตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ตัวแปรที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ 1) สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้าน และ 2) อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

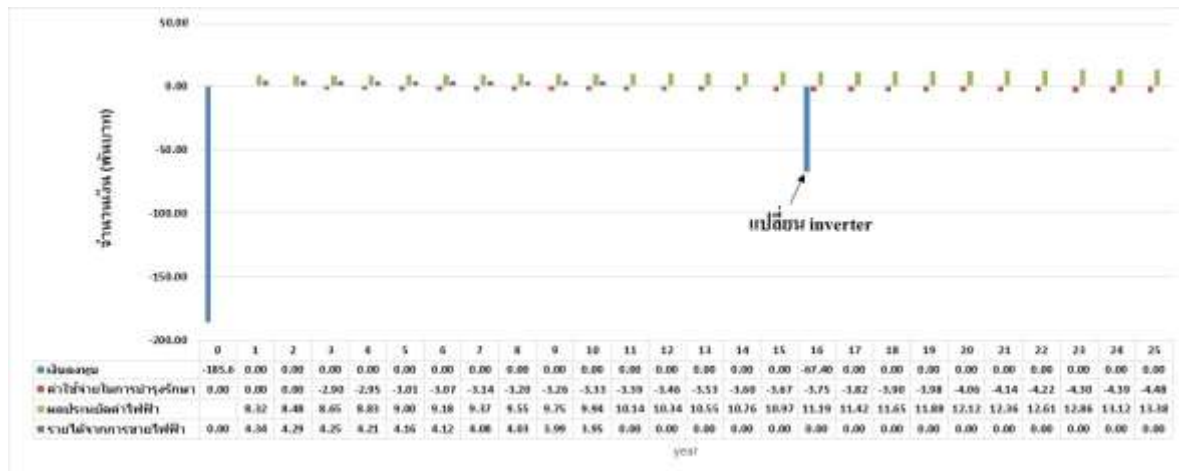
3.1.ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงิน

ต้นทุนระบบ Solar Rooftop ในงานวิจัยนี้ได้จากการสำรวจสอบถามจากบริษัทที่รับผิดชอบติดตั้งจำนวน 8 ราย **รูปที่ 1** แสดงต้นทุนเฉลี่ยต่อกำลังผลิตติดตั้ง ตามขนาดระบบ 3 kWp 5 kWp และ 10 kWp โดยแยกต้นทุนออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) Solar Panels 2) Inverter และ 3) BOS พร้อมแสดงค่าสูงสุด ต่ำสุดของต้นทุน จากรูป จะพบว่า ต้นทุนระบบเฉลี่ยมีค่าประมาณ 48–62 บาท/kW โดยราคาเฉลี่ยจะถูกลงเมื่อกำลังการผลิตติดตั้งเพิ่มขึ้นตามหลักการประหยัดต่อขนาด (Economies of Scale) ในทุกขนาดกำลังผลิตติดตั้ง ค่าอุปกรณ์ประกอบระบบและการติดตั้ง (Balance of System, BOS) เป็นสัดส่วนต้นทุนสูงที่สุดตามด้วย อินเวอร์เตอร์ และ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสัดส่วนใกล้เคียงกัน ต่างจากในอดีตที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นต้นทุนระบบที่สูงที่สุด [2] ทั้งนี้ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาลดลงมาก ในขณะที่ BOS ไม่ได้ลดลงตาม (ประกอบด้วยอุปกรณ์ประกอบระบบซึ่งเป็นตลาดที่อิ่มตัวแล้ว ราคาไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง และค่าแรงซึ่งเพิ่มขึ้นตามเวลา)

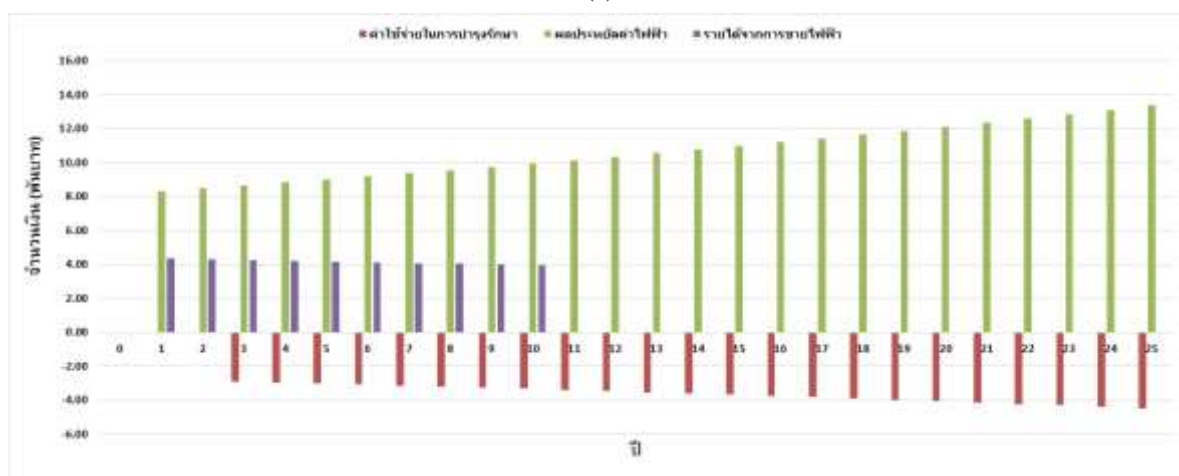


รูปที่ 1 ต้นทุนระบบ Solar rooftop ต่อกิโลวัตต์

กระแสเงินสดที่เกิดขึ้นตลอดโครงการของระบบ Solar rooftop มีลักษณะเหมือนกันในทุกขนาดระบบ **รูปที่ 2** แสดงตัวอย่างกระแสเงินสดสุทธิในกรณีระบบขนาด 3 kWp **รูปที่ 2(a)** แสดง เงินลงทุน ค่าใช้จ่าย และผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นตลอดโครงการ ในขณะที่ **รูปที่ 2(b)** แสดงเฉพาะ ผลประโยชน์ และ ค่าใช้จ่าย (ไม่รวมเงินลงทุน) เพื่อเปรียบเทียบรายได้จากการขายไฟฟ้า ผลประหยัดค่าไฟฟ้า และ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้อย่างชัดเจน เงินลงทุนในปีที่ 16 ใน **รูปที่ 2(a)** เกิดจากการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ จาก**รูปที่ 2(b)** จะพบว่า ผลประหยัดค่าไฟฟ้ามีค่าสูงกว่ารายได้จากการขายไฟฟ้า ถึงแม้จะกำหนดให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้ถูกใช้เองภายในบ้าน และขายให้การไฟฟ้าอย่างละครึ่งในกรณีฐานก็ตาม ทั้งนี้ เนื่องจากอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกสูงกว่าราคารับซื้อไฟฟ้า ก็นของโครงการ โซลาร์ภาคประชาชน นอกจากนี้ ผลประหยัดค่าไฟฟ้ายังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสมมติฐานที่ให้อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกเพิ่มขึ้นตามอัตราเงินเพื่อค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบก็เพิ่มตามเงินเพื่อเช่นเดียวกัน เมื่อคำนวณผลตอบแทนตลอดโครงการในรูปของ IRR ของระบบขนาดต่างๆ แล้ว ได้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 2 จากตารางจะพบว่า ผลตอบแทนจะเพิ่มขึ้นตามขนาดระบบ โดยระบบขนาด 3 kWp มีผลตอบแทนคิดลบ (ขาดทุน) ในขณะที่ระบบขนาด 5 kWp และ 10 kWp มีผลตอบแทนเป็นบวก (กำไร)



(a)



(b)

รูปที่ 2 กระแสเงินสดต่อ 1 kW ของระบบขนาด 3 kWp (a) กระแสเงินสดตลาดอายุโครงการ
(b) ผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายตั้งแต่ปีที่ 1-25

เกณฑ์ตัดสินความคุ้มค่าทางการเงินของ IRR คือ ผลตอบแทนคาดหวังของผู้ลงทุน [3] ในกรณีนี้ ผู้ลงทุนคือ ภาคครัวเรือนหรือเจ้าของบ้านที่ติดตั้งระบบ Solar Rooftop สมมติให้เงินลงทุนเป็นเงินของเจ้าของบ้านทั้งหมด เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีสินเชื่อระบบ Solar Rooftop สำหรับภาคครัวเรือน ดังนั้นเกณฑ์ตัดสินความคุ้มค่าทางการเงินจะใช้ผลตอบแทนการลงทุนจากทางเลือกอื่นที่ภาคครัวเรือนสามารถเข้าถึงได้ โดยปกติ เจ้าของบ้านส่วนใหญ่จะซื้อบ้านด้วยสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัยจึงมีภาระดอกเบี้ยที่ต้องผ่อนชำระ ดังนั้น อัตราดอกเบี้ยเงินกู้สำหรับสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัยจึงสามารถใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินได้ เนื่องจากหากผลตอบแทนการลงทุนติดตั้งระบบ Solar Rooftop ต่ำกว่าอัตราดอกเบี้ยสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัย เจ้าของบ้านควรนำ

เงินที่จะลงทุนระบบ Solar rooftop ไปชำระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัยแทน อัตราดอกเบี้ยสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัยในงานวิจัยนี้ใช้ อัตราเงินกู้ลูกค้ารายใหญ่ขั้นดี (Minimum Loan Rate, MLR) เฉลี่ยของธนาคารพาณิชย์ [21] ในอีกด้านหนึ่ง สำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระเงินกู้ธนาคาร จะใช้ผลตอบแทนของพันธบัตรรัฐบาลเป็นเกณฑ์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้เกณฑ์ 2 ระดับ คือ 1) MLR (6.3%) สำหรับเจ้าของบ้านที่มีภาระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัย (เกณฑ์ 1) และ 2) อัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาล (2.5%) สำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัย (เกณฑ์ 2) ด้วยเกณฑ์ดังกล่าว จะพบว่า ระบบที่มีผลตอบแทนความคุ้มค่าทางการเงิน คือ ระบบขนาด 10 kWp ($IRR = 2.97\%$) โดยเป็นความคุ้มค่าสำหรับกลุ่มเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัยเท่านั้น ($2.5\% < IRR < 6.3\%$)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ IRR

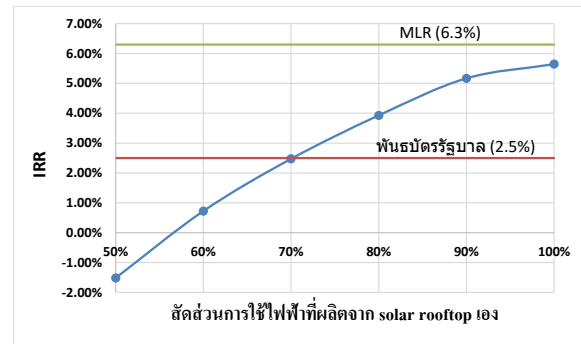
ขนาดระบบ	IRR
3 kW	-1.52%
5 kW	0.89%
10 kW	2.97%

3.2.ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

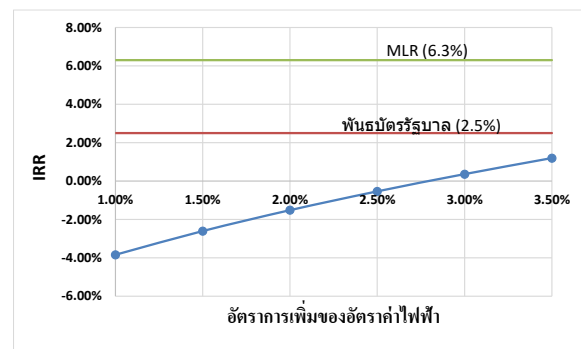
ผลการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงของตัวแปร 1) สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก solar rooftop เองภายในบ้าน และ 2) อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า สำหรับระบบขนาด 3 kWp 5 kWp และ 10 kWp แสดงอยู่ใน รูปที่ 3-5 ตามลำดับ ในแต่ละรูป รูป(a) แสดง IRR เมื่อสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองเปลี่ยนไปจากกรณีฐาน ในขณะที่ รูป(b) แสดง IRR เมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเปลี่ยนไปจากกรณีฐาน เมื่อพิจารณาแนวโน้มในภาพรวม จะพบว่า IRR จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านเพิ่มขึ้น และ อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีฐาน ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองจะได้ผลประหยัดค่าไฟฟ้ามากกว่าการขายไฟฟ้าคืนให้การไฟฟ้าฯ ดังเห็นได้จาก รูปที่ 2(b) และ การที่อัตราการเพิ่มของค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผลประหยัดค่าไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จึงส่งผลให้ IRR ของโครงการเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม IRR จะลดลงเมื่อตัวแปรทั้ง 2 เปลี่ยนแปลงในทิศตรงข้าม เมื่อพิจารณาระบบแต่ละขนาด ได้ผลดังต่อไปนี้

1)ระบบขนาด 3 kWp – จาก รูปที่ 3(a) จะพบว่า IRR จะเริ่มเป็นบวกเมื่อสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านประมาณ 57% และระบบจะเริ่มมีความคุ้มค่าทางการเงินเมื่อสัดส่วนมากกว่า 70% ขึ้นไป โดยผ่านเกณฑ์ 2 อย่างไม่ดี ผลตอบแทนไม่ถึงเกณฑ์ 1 ถึงแม้ว่าจะใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านทั้งหมด จาก รูปที่ 3(b) จะพบว่า IRR จะเปลี่ยนเป็นบวกที่อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าประมาณ 2.75% ขึ้นไป อย่างไรก็ดี ระบบไม่มีความคุ้มค่าทางการเงิน โดยมีผลตอบแทนต่ำกว่าเกณฑ์ 2 ตลอดช่วงอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าที่พิจารณา ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ระบบ

ขนาด 3 kWp จะมีความคุ้มค่าทางการเงินสำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัยและสามารถใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้าน 70% ขึ้นไป



(a)



(b)

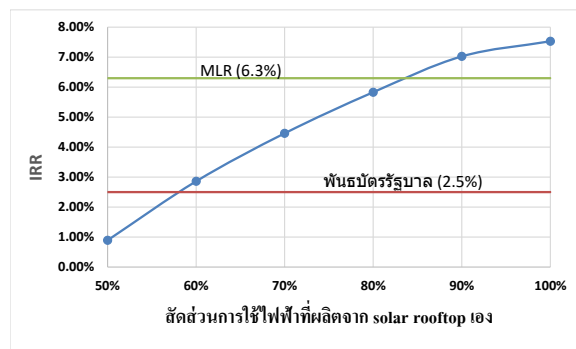
รูปที่ 3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบ 3 kWp

(a) สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เอง

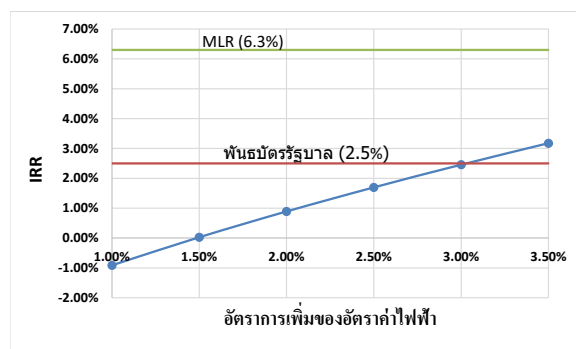
(b) อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า

2)ระบบขนาด 5 kWp – จาก รูปที่ 4(a) จะพบว่า ระบบจะเริ่มมีความคุ้มค่าทางการเงินโดยผ่านเกณฑ์ 2 เมื่อเจ้าของบ้านมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้าน 58% ขึ้นไป และผ่านเกณฑ์ 1 เมื่อสัดส่วนมากกว่า 84% ขึ้นไป จาก รูปที่ 3(b) จะพบว่า ระบบจะเริ่มมีความคุ้มค่าทางการเงินโดยผ่านเกณฑ์ 2 เมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าตั้งแต่ 3% ต่อปี ขึ้นไป แต่ผลตอบแทนไม่ถึงเกณฑ์ 1 ตลอดช่วงที่พิจารณา ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ระบบขนาด 5 kWp จะมีความคุ้มค่าทางการเงินเมื่อมีการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้าน 58% และ 84% ขึ้นไป สำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีและมีการะสินเชื่อเพื่อที่อยู่อาศัย ตามลำดับ อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าที่สูงกว่าการคาดการณ์ในกรณีฐาน (2% ต่อปี) จะ

ช่วยเพิ่มผลตอบแทนได้ แต่ผลตอบแทนยังไม่คุ้มค่าสำหรับเจ้าของบ้านที่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย



(a)



(b)

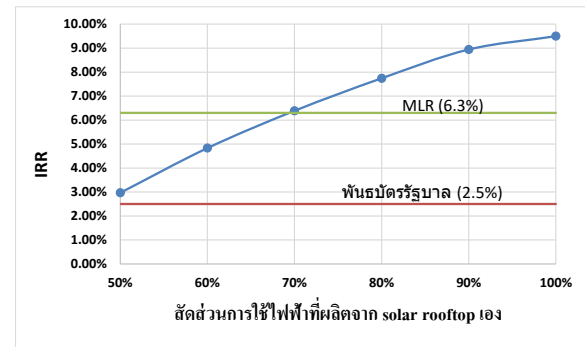
รูปที่ 4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบ 5 kWp

(a) สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เอง

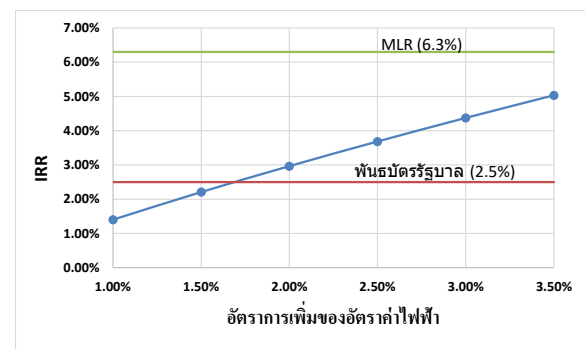
(b) อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า

3)ระบบขนาด 10 kWp – ระบบมีความคุ้มค่าทางการเงิน โดยผ่านเกณฑ์ 2 ในกรณีฐาน รูปที่ 5(a)แสดงให้เห็นว่าถ้าเจ้าของบ้านมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านเพิ่มขึ้นตั้งแต่ประมาณ 70% ขึ้นไป จะผ่านเกณฑ์ 1 จาก รูปที่ 5 (b) จะพบว่า ระบบจะยังมีความคุ้มค่าทางการเงินโดยผ่านเกณฑ์ 2 แม้้อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าจะลดลงกว่ากรณีฐานไปอยู่ที่ประมาณ 1.7% ต่อปี ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ผลตอบแทนไม่ถึงเกณฑ์ 1 ถึงแม้้อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากกรณีฐานเช่นเดียวกับระบบขนาด 5 kWp ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ระบบขนาด 10 kWp มีความคุ้มค่าทางการเงินสำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัยในกรณีฐาน และถ้ามีการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้าน 70% ขึ้นไป ระบบจะคุ้มค่าทางการเงินสำหรับเจ้าของบ้านที่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย

ด้วย อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าที่สูงกว่าการคาดการณ์ในกรณีฐาน (2%) จะช่วยเพิ่มผลตอบแทนได้ แต่ผลตอบแทนยังไม่คุ้มค่าสำหรับเจ้าของบ้านที่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย



(a)



(b)

รูปที่ 5 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบ 10 kWp

(a) สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เอง

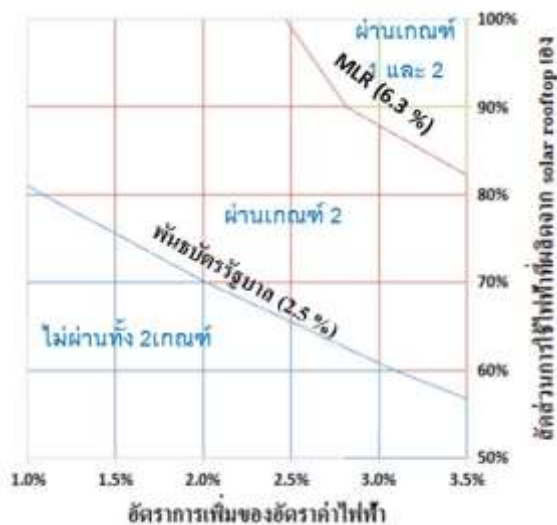
(b) อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า

จากผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว สามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านส่งผลต่อความคุ้มค่าทางการเงินของระบบ Solar Rooftop มากกว่าตัวแปรอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า ระบบทุกขนาดจะมีความคุ้มค่าทางการเงินเพิ่มขึ้นเมื่อเมื่อสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองเพิ่มขึ้น มีเพียงระบบขนาด 3 kWp ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ 1 แม้จะมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองทั้งหมดก็ตาม แนวโน้มนี้เป็นผลดีต่อการตัดสินใจในทางปฏิบัติ เนื่องจากสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่เจ้าของบ้านสามารถประเมินจากการใช้ไฟฟ้าของตนเองตลอดจนการเลือกขนาดของ Solar Rooftop ให้เหมาะสมก่อนการตัดสินใจลงทุนได้ ในขณะที่อัตราการเพิ่มของอัตราค่า

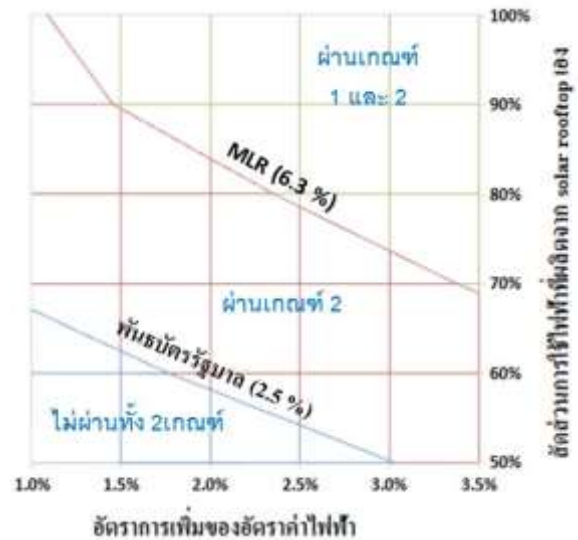
ไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่อยู่นอกเหนือการควบคุมของเจ้าของบ้าน

3.3.ผลการวิเคราะห์สถานการณ์ (Scenario analysis)

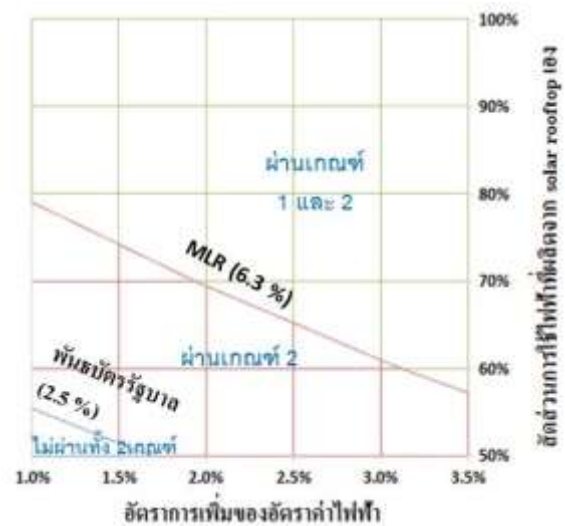
รูปที่ 6 แสดงแผนภาพระดับ (Contour Plot) ของ IRR ของระบบขนาดต่างๆ เมื่อตัวแปรสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้าน และ ตัวแปรอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงพร้อมกัน Contour Plot คือภาพมองมุมบนของพื้นผิว 3 มิติ แสดงการกระจายของ IRR ในมิติที่ 3 ตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสอง โดยเส้นในรูปแสดงบริเวณที่มีระดับในมิติที่ 3 เท่ากัน หรือมีค่า IRR เท่ากันนั่นเอง ในรูปมีเส้นระดับ IRR 2 ระดับ ซึ่งตรงกับเกณฑ์ทั้ง 2 (พันธบัตรรัฐบาล และ MLR) แบ่งบริเวณใน Contour Plot ออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) การลงทุนไม่ผ่านเกณฑ์ความคุ้มค่าทั้ง 2 เกณฑ์ 2) การลงทุนมีความคุ้มค่าผ่านเกณฑ์ 1 และ 3) การลงทุนมีความคุ้มค่าผ่านทั้ง 2 เกณฑ์ จากรูปจะพบว่า IRR จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านและอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (IRR มีค่าเพิ่มขึ้นตามทิศทางจากบริเวณซ้ายล่างไปบริเวณขวาบนของรูป) เนื่องจากผลประหยัดค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านเพิ่มขึ้น และผลประหยัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคตเมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6 IRR เมื่อสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเอง และ อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงพร้อมกัน (a) 3 kWp (b) 5 kWp (c) 10 kWp

รูปที่ 6(a) แสดง IRR ของ ระบบขนาด 3 kWp จากรูปจะพบว่า สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองต่ำที่สุดที่มีความคุ้มค่าผ่านเกณฑ์ 1 คือ 82% โดยเกิดขึ้นเมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.5% ต่อปี ในกรณีที่เจ้าของบ้านใช้ไฟฟ้าที่ผลิตได้เองทั้งหมด อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าจะต้องไม่ต่ำกว่า 2.5% ต่อปี จึงจะผ่านเกณฑ์ 1 ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่ต่างจากกรณีฐานมาก นอกจากนี้ ถ้าเจ้าของบ้านมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองต่ำกว่า 57% จะไม่ผ่านเกณฑ์ 2 เลย ทุกอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าที่พิจารณา ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ใน

กรณีที่มีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองไม่ถึง 57% ระบบขนาด 3 kWp จะไม่มีความคุ้มค่าทางการเงินสำหรับทั้งเจ้าของบ้านที่มีและไม่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย

รูปที่ 6(b) แสดง IRR ของระบบขนาด 5 kWp จากรูปจะพบว่า สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองต่ำที่สุดที่มีโอกาสมีความคุ้มค่าผ่านเกณฑ์ 1 คือ 69% โดยเกิดขึ้นเมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.5% ต่อปี และสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองที่มีความคุ้มค่าผ่านเกณฑ์ 1 จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าลดลง โดยถ้าสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองเท่ากับ 100% จะมีความคุ้มค่าผ่านเกณฑ์ 1 ทุกอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าที่พิจารณา สถานการณ์ที่มีโอกาสทำให้ระบบไม่ผ่านความคุ้มค่าเกณฑ์ 2 คือ ที่สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองต่ำกว่า 67% โดยเกิดเมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเท่ากับ 1% ต่อปี และโอกาสขึ้นสถานการณ์นี้จะลดลงถ้าอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 6(c) แสดง IRR ของระบบขนาด 10 kWp จากรูปจะพบว่า สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองต่ำที่สุดที่มีความคุ้มค่าผ่านเกณฑ์ 1 คือ 58% โดยเกิดขึ้นเมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.5% ต่อปี และที่สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองประมาณ 80% ขึ้นไป ระบบจะมีความคุ้มค่าผ่านเกณฑ์ 1 ทุกอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าที่พิจารณา สถานการณ์ที่มีโอกาสทำให้ระบบไม่ผ่านความคุ้มค่าเกณฑ์ 2 จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้าต่ำกว่า 1.7%

จากผลการวิเคราะห์สถานการณ์ระบบทั้ง 3 ขนาด สามารถสรุปได้ว่า สำหรับเจ้าของบ้านที่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองที่มีโอกาสที่การลงทุนจะมีความคุ้มค่าทางการเงิน คือ ตั้งแต่ประมาณ 58% ขึ้นไป ขึ้นกับขนาดของระบบ สำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองที่มีความคุ้มค่าจะต่ำลงโดยขึ้นอยู่กับขนาดของระบบเช่นกัน

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประเมินความคุ้มค่าทางการเงินของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) สำหรับภาคครัวเรือนภายใต้การส่งเสริมของภาครัฐในโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบน

หลังคาสำหรับภาคประชาชน โดยแบ่งระบบออกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาด 3 kWp 5 kWp และ 10 kWp ผลตอบแทนทางการเงินแสดงในรูปของผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) เพื่อเปรียบเทียบกับทางเลือกการลงทุนอื่น โดยใช้เกณฑ์ตัดสินใจ 2 ระดับ คือ อัตราดอกเบี้ยสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย (เกณฑ์ 1) และ อัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาล (เกณฑ์ 2) สำหรับเจ้าของบ้านที่มีและไม่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย ตามลำดับ นอกจากนี้ ได้ประเมินความเสี่ยงของโครงการด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) และการวิเคราะห์สถานการณ์ (Scenario Analysis) โดยพิจารณาตัวแปร 1) สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เอง และ 2) อัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงิน สรุปได้ว่า ในกรณีฐาน ระบบขนาด 10 kWp มีความคุ้มค่าทางการเงินสำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย (เกณฑ์ 2) ในขณะที่ ระบบขนาด 3 kWp และ 5 kWp ไม่ผ่านเกณฑ์ความคุ้มค่าทางการเงินทั้ง 2 เกณฑ์

2) ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว พบว่า ตัวแปร สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจาก Solar Rooftop เองภายในบ้านส่งผลต่อความคุ้มค่าทางการเงินมากกว่าตัวแปรอัตราการเพิ่มของอัตราค่าไฟฟ้า โดยสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองที่ต่ำที่สุด แนวโน้มนี้เป็นผลดีต่อการตัดสินใจในทางปฏิบัติ เนื่องจากสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่เจ้าของบ้านสามารถประเมินจากการใช้ไฟฟ้าของตนเองตลอดจนการเลือกขนาดของ Solar Rooftop ให้เหมาะสมก่อนการตัดสินใจลงทุนได้

3) ผลการวิเคราะห์สถานการณ์ สรุปได้ว่า สำหรับเจ้าของบ้านที่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองที่มีโอกาสที่การลงทุนจะมีความคุ้มค่าทางการเงิน คือ ตั้งแต่ประมาณ 58% ขึ้นไป ขึ้นกับขนาดของระบบ สำหรับเจ้าของบ้านที่ไม่มีภาระสินเชื่เพื่อที่อยู่อาศัย สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเองที่มีความคุ้มค่าจะต่ำลงโดยขึ้นอยู่กับขนาดของระบบเช่นกัน

4) โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับภาคประชาชน เหมาะสำหรับการติดตั้งเพื่อ

ใช้ไฟฟ้าที่ผลิตได้เองภายในบ้านมากกว่าการมุ่งหวังขายไฟฟ้าคืนให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

5) การติดตั้ง Solar Rooftop สามารถเพิ่มขึ้นได้ ถ้าภาครัฐเพิ่มนโยบายสนับสนุนที่เหมาะสม ทั้งในแง่การเพิ่มผลตอบแทนและลดค่าใช้จ่าย นโยบายของภาครัฐที่อาจจะช่วยส่งเสริม ได้แก่ การเพิ่มอัตรารับซื้อไฟฟ้าคืน การส่งเสริมการขายคาร์บอนเครดิตจากการติดตั้ง Solar Rooftop ภาคครัวเรือน การนำค่าใช้จ่ายในการในการติดตั้ง Solar Rooftop ไปหักลดหย่อนภาษีเงินได้นิติบุคคลธรรมดา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของนโยบายเหล่านี้ต่อทุกภาคส่วนเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจสำหรับภาคครัวเรือนในการติดตั้งระบบ Solar Rooftop นอกจากนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดนโยบายของภาครัฐในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of alternative energy development and efficiency (DEDE), “Alternative Energy Development Plan 2018-2037 (AEDP 2018),” Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2020. [Online]. Available: https://www.dede.go.th/download/Plan_62/20201021_TIEB_AEDP2018.pdf
- [2] T. Tantisattayakul, “An assessment of financial promotion measures for residential solar photovoltaic rooftop system in Thailand,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 606–621, 2015.
- [3] T. Tantisattayakul and P. Kanchanapiya, “Financial measures for promoting residential rooftop photovoltaics under a feed-in tariff framework in Thailand,” *Energy Policy*, vol. 109, pp. 260–269, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.06.061.
- [4] Energy Regulatory Commission (ERC). “Solar rooftop for public sector.” [solar.erc.or.th](http://solar.erc.or.th/solar62/index.html). <http://solar.erc.or.th/solar62/index.html>. (Accessed: Mar 1, 2021).
- [5] Energy Policy and Planning Office (EPPO), “Power Development Plan 2018 revision 1 (PDP2018 revision1),” Ministry of Energy, Bangkok, Thailand 2020. [Online]. Available: http://www.eppo.go.th/images/Infomation_service/public_relations/PDP2018/PDP2018Rev1.pdf
- [6] G. Panprayun, “8 kWp Rooftop PV System and Feasibility of System Expansion,” *Journal of Professional Routine to Research*, vol. 4, pp. 76–86, 2017.
- [7] N. Suwanasang and S. Tongsopit, “An Assessment of the Technical and Economic Potential of Rooftop Solar Systems on Chulalongkorn University’s Buildings,” *Journal of Energy Research*, vol. 12, no. 2, pp. 59–74, 2015.
- [8] T. Tantisattayakul, P. Rassameethammachote, M. Auisakul, “Energy, Environmental and Economic Assessment of Solar Rooftop Systems on Buildings of Thammasat University, Rangsit Centre,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 1083–1099, 2017.
- [9] P. Piriyaatta, “Using Photovoltaic System on The Faculty of Architecture’s Building Rooftop in Khon Kaen University for Energy Conservation,” *Built Environment Inquiry Journal Faculty of Architecture Khon Kaen University*, vol. 15, no. 1, pp. 183–200, 2016.
- [10] W. Pichitkunchorn and K. Chayakulkheeree, “Design and Economic Analysis of Solar Rooftop Electric System on the Building of Post Engineering Department,” *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 29, no. 1, pp. 25–36, 2018.
- [11] K. Chaivanich, P. Ubolsook, M. Sangthong, “The Assessment in Reducing Greenhouse Gas Emission and Economical Worthiness of Solar Farm in Chulachomklao Royal Military Academy,” *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, vol. 10, no. 12, pp. 35–46, 2018.

- [12] R. Chuchart and D. Amonhaemanon, "An Assessment of Financial Worthiness for Solar Cell Rooftop The Case Study of Sawn Timber Hevea Wood Factory in Trang Province," *NIDA Business Journal*, vol. 26, pp. 6–35, 2020.
- [13] K. Sripodok, "The Value of Investment on Renewable Energy: A Case Study of Power Generation by Solar Energy Roof System Projected by HOMEPRO, Mega Home and Market Village," *Social Science Journal of Prachuen Research Network*, vol. 2, no. 1, pp. 52–69, 2020.
- [14] T. Potisat, S. Tongsopit, A. Aksornkij and S. Mounghareon, "To buy the system or to buy the service: the emergence of a solar service model in Thailand," *Renewable Energy Focus*, vol. 21, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1016/j.ref.2017.06.002.
- [15] S. Yoonmak, T. Patcharoen and A. Ngaopitakkul, "Performance and Economic Evaluation of Solar Rooftop System in Different Regions of Thailand," *Sustainability*, vol. 11, no. 23, pp. 6647, 2019, doi: 10.3390/su11236647.
- [16] M. Woodhouse, R. J. Albertus, D. Feldman, R. Fu, K. Horowitz, D. Chung, D. Jordan and S. Kurtz, "On the path to SunShot: The role of advancements in solar photovoltaic efficiency, reliability, and costs," *National Renewable Energy Laboratory*, Washington, DC, USA, pp. 36, 2016, doi: 10.2172/1253983.
- [17] A. Limmanee, N. Udomdachanut, S. Songtra, A. Kaewniyompanit, Y. Sato, M. Nakaishi, S. Kittisontirak, K. Sriprapha and Y. Sakamoto, "Field performance and degradation rates of different types of photovoltaic modules: A case study in Thailand," *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 12–17, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.088.
- [18] D.C. Jordan, R.M. Smith, C.R. Osterwald, E. Gelak and S.R. Kurtz, "Outdoor PV Degradation Comparison", presented at the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, HI, USA, June 20–25, 2010, 2694–2697, doi: 10.1109/PVSC.2010.5616925
- [19] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, "Photovoltaic Degradation Rates: An Analytical Review," *Photovoltaics*, vol 21, no. 1, 12–29, 2013, doi: 10.1002/pip.1182
- [20] *Macroeconomic indicators of Thailand*, Bank of Thailand, Mar 1, 2021. [Online]. Available: https://www.bot.or.th/App/BTWS_STAT/statistics/ReportPage.aspx?reportID=409&language=th
- [21] *Loan interest rate*, Bank of Thailand, Mar 1, 2021. [Online]. Available: https://www.bot.or.th/thai/statistics/financialmarkets/interestrate/_layouts/application/interest_rate/in_rate.aspx.

การปรับเทียบตัวแปรกำลังและสติฟเนสในแบบจำลองดินของดินทรายผสมเศษยาง รถยนต์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Calibration of Strength and Stiffness Parameters on Soil Model of Sand-Tyre Crumb Mixtures by FEM

พูลพงษ์ พงษ์วิทยพานู^{1,*} อุกฤษฎ์ พรปรีดาวรรณ¹ และ ดาราดพร ผุสิงห์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ทุ่งสุขลา ศรีราชา ชลบุรี 20230

Pulpong Pongvithayapanu^{1,*} Ukrit Pornpreedawan¹ and Daraporn Phusing¹

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

Thung Sukhla, Sri Racha, Chonburi, 20230, Thailand

*Corresponding Author E-mail: pulpong@eng.src.ku.ac.th

Received: Sep 04, 2021; Revised: Nov 12, 2021; Accepted: Nov 15, 2021

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสติฟเนสในแบบจำลองดินมอร์ – คูลอมบ์ (MC) และแบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง (HS) ของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบอ้างอิงแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าความแข็งแรง กำลังรับแรงเฉือน ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินของตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น และผลการปรับเทียบตัวแปรสรุปได้ว่า แบบจำลอง MC สามารถจำลองพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนเบื้องต้นของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ได้ แต่แบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงและแม่นยำมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ตัวอย่างมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการปรับเทียบนี้เป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ในการจำลองปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและฐานรากในการประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ในงานทางวิศวกรรมโยธาในประเทศไทย เนื่องจากเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบและปรับเทียบเป็นเศษยางรถยนต์ที่หาซื้อได้ง่ายจากโรงงานรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าในประเทศไทย

คำสำคัญ: ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์, ตัวแปรกำลังและสติฟเนส, แบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง, วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Abstract

This study uses the Finite Element Method (FEM) to calibrate strength and stiffness parameters on the Mohr-Coulomb (MC) and Hardening soil (HS) models of various percentages of sand-tyre crumb combinations, with reference to laboratory Consolidated Drained (CD) triaxial test results. The laboratory findings show that as the percentage of tyre crumb in sand increases, the stiffness, strength, and internal friction angle of the sand-tyre crumb mixture decreases. The calibration of strength and stiffness parameters reveals that the MC soil model is capable of simulating the basic shear strength behavior of a sand-tyre crumb mixture, while the HS soil model is capable of simulating non-linear stress-strain behavior. Because the sample of tyre crumb used in this study is a recycled by-product from a local recycling plant in Thailand, this calibration

of strength and stiffness parameters on soil model will benefit in applying the sand-tyre crumb mixture for numerous civil engineering applications in Thailand.

Keywords: Sand-tyre crumb mixture, Stiffness and strength parameters, Hardening soil model, FEM

1. บทนำ

เพื่อสนับสนุนนโยบายการก่อสร้างอย่างยั่งยืนจึงได้มีแนวคิดในการนำเศษยางรถยนต์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่มีมาอย่างต่อเนื่องในหลายทศวรรษที่ผ่านมา แทนการใช้สื่อย่างรถยนต์เป็นเพียงวัสดุถมที่ (Landfills) โดยหนึ่งในวิธีการกำจัดยางรถยนต์ที่นิยมที่สุดวิธีหนึ่งคือการนำยางรถยนต์เหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่โดยการรีไซเคิลยางรถยนต์ด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม เช่น การเปลี่ยนยางรถยนต์ให้กลายเป็นเศษยางรถยนต์ (Tyre Crumb) ขนาดเล็กพร้อมกำจัดสิ่งปนเปื้อน (เหล็กหรือไฟเบอร์) ทั้งนี้ส่วนหนึ่งของการย่อยและคัดแยกเศษยางรถยนต์ในแต่ละท้องถิ่นขึ้นอยู่กับเศษยางเหลือใช้และผลิตภัณฑ์ยางต้นกำเนิด เช่น เศษยาง (Scrap Rubber) ยางรถยนต์เก่า (Used Tyre) ครีบกาว ยางตกเกรด เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ขนาดของเศษยางเหลือใช้ที่ถูกระบวนการย่อยและคัดแยกมีขนาดแตกต่างกันออกไป ในประเทศไทยเศษยางรถยนต์เหล่านี้จะผ่านกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องจักรหรือเครื่องบดชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้เศษยางมีขนาดเล็กลงตั้งแต่ขนาดประมาณ ¼ นิ้ว (6.35 มิลลิเมตร) ถึง 100 เมช (Mesh) หรือ 0.15 มิลลิเมตร และถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ [1]

ในทางวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มีงานวิจัยมากมายที่ได้แสดงให้เห็นถึงการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมรวมถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ในห้องปฏิบัติการ [2] ใช้เศษยางรถยนต์ขนาด 0.09–4.5 มิลลิเมตร ผสมในดินทราย Ottawa และทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม เช่น ความคละกั้นของวัสดุผสม ความถ่วงจำเพาะ อัตราส่วนช่องว่าง ความหนาแน่น ค่าความซึมผ่านได้ของน้ำและการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำพบว่าวัสดุผสมดังกล่าวสามารถใช้เป็นวัสดุถมน้ำหนักเบา (Lightweight

Fill Material) ได้ดี และงานวิจัยหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการผสมเศษยางรถยนต์ในดินทรายจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ลดลง [3–7] อย่างไรก็ตามหลายงานวิจัยก็แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้น [8], [9] อย่างไรก็ตามแม้ว่าคุณสมบัติในการรับแรงเฉือนของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางวิศวกรรม แต่คุณสมบัติประการอื่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็ทำให้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์มีประโยชน์ในการนำไปใช้งานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธาเช่นกัน เช่น คุณสมบัติในการยุบอัดตัวสูง น้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวนเพื่อป้องกันความร้อน รวมถึงมีความคงทนที่ดีในระยะยาวหากเปรียบเทียบกับวัสดุธรณีประเภทอื่น [10]

การประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์มีรายงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ได้้นำเศษยางรถยนต์มาใช้เป็นวัสดุผสมในดินทรายเพื่อใช้ในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา เช่น ใช้เป็นวัสดุถมในคันดินหรืองานทาง ใช้เป็นวัสดุถมน้ำหนักเบา (Lightweight Fill Materials) หลังกำแพงกันดินหรือตอม่อสะพาน ใช้สำหรับการระบายน้ำเสียในพื้นที่ถมกองขยะหรือใช้ในการเสริมแรงในลาดดิน เป็นต้น [11] [12] ได้นำเสนอการใช้วัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์ถมเหนือที่จะสามารถลดความเค้น รวมถึงการตั้งของท่อและลดการทรุดตัวที่ผิวดินได้อย่างมีนัยสำคัญ [11], [13] และ [14] ศึกษาวัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุถมน้ำหนักเบาหลังกำแพงกันดิน พบว่าการนำดินทรายผสมกับเศษยางรถยนต์สามารถลดค่าหน่วยน้ำหนักได้ค่อนข้างมากทำให้แรงดันดินทางด้านข้าง รวมถึงการเคลื่อนตัวตามแนวราบของโครงสร้างกำแพงกันดินลดน้อยลง [15] สรุปถึงการใช้งานวัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์ในงานทางวิศวกรรมปฐพีจากงานวิจัยที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน (ปี ค.ศ. 2017)

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจุบันความพยายามที่จะนำวัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์มาใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมีหลากหลายมากขึ้นตามลำดับ ประกอบกับปัจจุบันการวิเคราะห์และการออกแบบด้านวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมีความซับซ้อนรวมถึงวัสดุที่ใช้ทดแทนดินตามธรรมชาติมีลักษณะและพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่แตกต่างกันไป การวิเคราะห์ด้วยวิธีดั้งเดิมหรือการใช้ทฤษฎีในการจำลองพฤติกรรมดินอย่างง่ายอาจไม่สามารถทำให้การออกแบบหรือการแก้ปัญหาดังกล่าวเป็นไปได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แม้ว่านักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการทดสอบแบบเต็มรูปแบบ (Full Scale Test) หรือแม้แต่การทดสอบแบบจำลอง (Model Test) ซึ่งอาจต้องใช้ทรัพยากรพื้นที่ รวมถึงค่าใช้จ่ายที่สูงมากและไม่มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนตัวแปรเพื่อแก้ไขปัญหาในหลากหลายรูปแบบหรือสถานการณ์ ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมวิเคราะห์การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) มาช่วยในการออกแบบและแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างแพร่หลายเพื่อช่วยศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุผสมที่มีความซับซ้อนทั้งในพฤติกรรมของวัสดุผสมหรือแม้แต่พฤติกรรมที่วัสดุผสมกระทำกับโครงสร้างข้างเคียงก็ตาม และในการวิเคราะห์ FEM แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ (Constitutive Model) ถือเป็นหัวใจสำคัญที่สุดประการหนึ่งที่จะจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักหรือแรงที่มากกระทำกับวัสดุได้อย่างถูกต้อง

จากอดีตแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่ออธิบายพฤติกรรมของดินหรือวัสดุผสมจากแรงกระทำทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ โดยแบบจำลองพฤติกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาตั้งแต่อดีตได้แก่ แบบจำลองของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model, MC) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นและอาศัยเพียงตัวแปรกำลังในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามเนื่องจากดินหรือวัสดุผสม เช่น ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ เป็นต้น มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นและมีการตอบสนองต่อแรงกระทำในแต่ละขั้นที่

แตกต่างกันออกไปทำให้แบบจำลอง MC มีข้อจำกัดและไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่ซับซ้อนและไม่เชิงเส้นของวัสดุผสม ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุขั้นสูงอื่น ๆ เช่น แบบจำลองไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Model) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิง (Hardening Soil Model, HS) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิงแบบความเครียดต่ำ (Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness, HSmall) และแบบจำลองโมดิฟายแคมเคลย์ (Modified Cam-Clay Model, MCC) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุขั้นสูงดังกล่าวต้องอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวทั้งตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสซึ่งมีความยากและซับซ้อน ในการวิเคราะห์ทั้งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการตรวจวัดในสนาม

วิธีที่เป็นที่นิยมและน่าเชื่อถือในการหาค่าตัวแปรดังกล่าว ได้แก่ การปรับเทียบตัวแปรกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น จากผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดิน (Oedometer Test) เป็นต้น การปรับเทียบ (Calibration) ค่าตัวแปรของแบบจำลองดินและวัสดุต่าง ๆ ได้ถูกนำเสนออย่างต่อเนื่อง [13], [3] และ [14] ปรับเทียบค่าตัวแปรของแบบจำลองไฮเพอร์โบลิกกับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของเศษยางรถยนต์และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ [16] ปรับเทียบค่าตัวแปรของแบบจำลอง MC และแบบจำลองอิลาสติกไม่เชิงเส้น-พลาสติกฮาร์ดเคนนิง (แบบจำลอง Nova และแบบจำลอง Vermeer) กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของดินทรายเพื่อการออกแบบกำแพงกันดินโดยใช้ FEM [17] ปรับเทียบค่าตัวแปรของแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำและกับผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ [18] ปรับเทียบค่าตัวแปรสตีเฟนสของแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการและการตรวจวัดแรงดันดินด้านข้างในสนามของดินกำเนิดใน (Residual Soil) บริเวณพื้นที่หมวดหิน Kenny Hill ประเทศมาเลเซีย [19] ปรับเทียบตัวแปรที่เกี่ยวข้องของแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

และการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน บริเวณพื้นที่อ่าวเชินเจิ้น ประเทศจีน [20] เปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติในสของแบบจำลอง MC และ HS กับ การทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของดินทรายประเทศ แอลจีเรีย และ [21] เปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติในสของแบบจำลอง MC และแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำและการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของดินเหนียว ประเทศมาเลเซีย

งานวิจัยนี้เสนอการเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติในแบบจำลองดินแบบแบบอีลาสโตพลาสติก (Elasto-Plastic Soil Model) ได้แก่ แบบจำลอง MC และแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ที่อัตราส่วนผสมและความเค้นโอบรัดต่าง ๆ ด้วยวิธี FEM โดยผลการเปรียบเทียบจะทำให้ทราบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองดินเพื่อใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและฐานรากในการประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์กับโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา เช่น การวิเคราะห์คันดินถม (Embankment) การวิเคราะห์กำแพงกันดิน เป็นต้น โดยเศษยางรถยนต์ที่ทดสอบเป็นเศษยางรถยนต์ที่หาได้จากโรงงานรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าที่สามารถหาซื้อได้ง่ายทั่วไปตามท้องตลาดในประเทศไทย

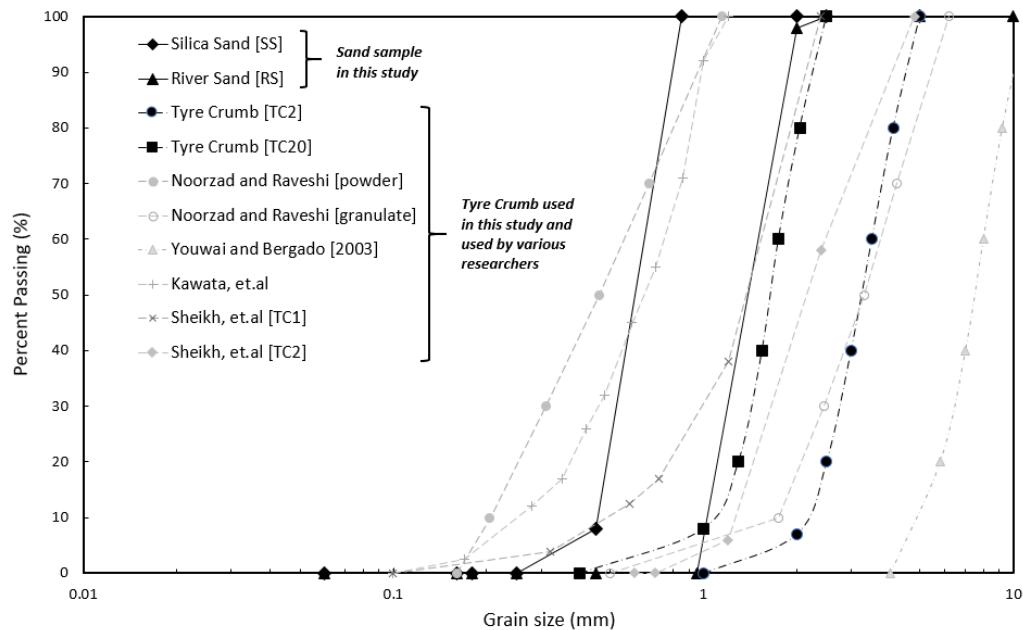
2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.1. วัสดุในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ 1) ดินทรายซิลิกา (Silica Sand, SS) เป็นดินทรายที่ใช้ทดสอบหาค่าความหนาแน่นในสนามตามมาตรฐาน ASTM D1556/1556M กระจายตัวสม่ำเสมอและมีลักษณะเม็ดดินมนกลมรอบด้านและกลมมาก (Well-Round and High Sphericity) 2) ดินทรายแม่น้ำ (River Sand, RS) เป็นดินทรายสำหรับใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปในจังหวัดชลบุรี

กระจายตัวสม่ำเสมอ ลักษณะเม็ดดินมีเหลี่ยมมน (Sub-Angular) และ 3) เศษยางรถยนต์มีลักษณะเป็นผงยาง (Tyre Crumb, TC) ที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอได้มาจากการบดย่อยและผลิตจากกระบวนการบดยางรถยนต์ใช้แล้วสามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เป็นส่วนผสมในการทำรีเคลมนำไปเป็นส่วนผสมทำพื้นรองเท้า แผ่นยางปูพื้นรถยนต์ ปูพื้นสนามฟุตบอล เป็นต้น หากมีการใช้เป็นวัสดุผสมเพื่อทดแทนวัสดุตามธรรมชาติก็สามารถนำมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องกังวลในเรื่องของการแปรรูปและคัดแยกที่อาจเป็นอุปสรรคในการเลือกใช้ทางปฏิบัติ เหตุผลสำคัญประการหนึ่งในการเลือกใช้เศษยางรถยนต์ชนิดนี้เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่ายทั่วไปในท้องตลาดซึ่งผลิตโดยโรงงานภายในประเทศและสามารถเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้เป็นวัสดุผสมรีไซเคิลในงานวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทย รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาในต่างประเทศจะใช้เศษยางรถยนต์ขนาดใหญ่เป็นส่วนผสมที่มีขนาดประมาณ 10–300 มิลลิเมตร [6]

รูปที่ 1 แสดงกราฟการกระจายตัวของดินทรายและเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เศษยางรถยนต์ขนาดต่ำกว่า 10 มิลลิเมตรในการทดสอบ โดยดินทราย SS และดินทราย RS มีขนาด D50 เท่ากับ 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรตามลำดับ เศษยางรถยนต์ขนาด 2 mesh (TC2) และ 20 mesh (TC20) มีขนาด D50 เท่ากับ 3.1 และ 1.7 มิลลิเมตรตามลำดับ **ตารางที่ 1** แสดงคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินทราย เศษยางรถยนต์และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ เช่น การจำแนกดินตามระบบเอกภาพ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและต่ำสุด ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุดและสูงสุด เป็นต้น ดินทรายจะถูกผสมกับเศษยางรถยนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (โดยน้ำหนักของดินทรายแห้ง) ได้แก่ ดินทราย SS ผสมกับ TC2 และ TC20 ในอัตราส่วน 10, 20 และ 25% และดินทราย RS ผสมกับ TC2 และ TC20 ในอัตราส่วน 10, 20 และ 25%



รูปที่ 1 แสดงกราฟการกระจายตัวของดินทรายและเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในงานวิจัย เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

2.2.การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

ตัวอย่างดินทรายแห้งและส่วนผสมเศษยางรถยนต์ถูกทดสอบด้วยเครื่องมือแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ทดสอบภายใต้เงื่อนไขการยุบอัดตัวคายน้ำแบบระบายน้ำระหว่างการทดสอบ (Consolidated Drained test, CD) โดยในขั้นตอนการยุบอัดตัวคายน้ำเป็นแบบความเค้นกวดอัดเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation Pressure) ที่ 50 และ 150 กิโลปาสกาล (kPa) โดยตัวอย่างดินทรายแห้งหรือตัวอย่างดินทรายแห้งผสมเศษยางรถยนต์ (TC2 และ TC20) จะถูกเตรียมให้มีความหนาแน่นทางกายภาพแบบแน่น (Dense) หรือมีค่าดัชนีความหนาแน่น (Density Index, I_D) เท่ากับประมาณ 0.65–0.85 โดยตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะถูกเตรียมในแบบ (Former) และบดอัดตัวอย่างด้วยไม้ตอกกดอัดขนาดเล็ก (Tamper) เพื่อลดอัตราส่วนช่องว่างในดินและ

ให้ตัวอย่างดินมีความหนาแน่นทางกายภาพแบบแน่น ร่วมกับการใช้เทคนิคการดูดอากาศจากตัวอย่างทดสอบให้มีความดันติดลบประมาณ 10–20 kPa โดยการเตรียมตัวอย่างดินทรายที่มีการผสมเศษยางรถยนต์ในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ตัวอย่างดินที่จะทดสอบมีความอ่อนตัวมากทำให้การเตรียมตัวอย่างต้องเป็นไปด้วยความระมัดระวัง ก่อนเริ่มการทดสอบการกดอัดและในขั้นตอนการเงื่อนไขตัวอย่างดินตลอดการทดสอบจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อัตราการเงื่อนไขตัวอย่างดินที่ 0.1 มิลลิเมตร/นาที่ จนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติหรือที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่าเท่ากับ 30% ในกรณีการทดสอบดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ ซึ่งผลการทดสอบจะถูกบันทึกลงเป็นไฟล์เอกสารและสามารถนำไปวิเคราะห์ รวมถึงการสร้างกราฟต่าง ๆ ได้ต่อไป

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินทราย เศษยางรถยนต์และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์

คุณสมบัติพื้นฐาน	Unified Classification	D_{50} (mm)	G_s	$\rho_{d(max)}$ (g/cm^3)	e_{min}	$\rho_{d(min)}$ (g/cm^3)	e_{max}
Silica Sand (SS)	SP	0.5	2.64	1.748	0.510	1.551	0.702
River Sand (RS)	SP	1.5	2.61	1.580	0.652	1.437	0.816
Tyre Crumb 2 mesh (TC2)	SP	3.1	1.06	-	-	-	-
Tyre Crumb 20 mesh (TC20)	SP	1.7	1.08	-	-	-	-

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินทราย เศษยางรถยนต์และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์(ต่อ)

คุณสมบัติพื้นฐาน	Unified Classification	D ₅₀ (mm)	G _s	ρ _{d(max)} (g/cm ³)	e _{min}	ρ _{d(min)} (g/cm ³)	e _{max}
SS + TC2 10%	-	-	2.31	1.582	0.462	1.314	0.760
SS + TC2 20%	-	-	2.05	1.413	0.448	1.141	0.792
SS + TC2 25%	-	-	1.91	1.335	0.429	1.058	0.804
SS + TC20 10%	-	-	2.40	1.553	0.547	1.258	0.910
SS + TC20 20%	-	-	2.11	1.346	0.564	1.042	1.019
SS + TC20 25%	-	-	1.97	1.277	0.539	0.990	0.986
RS + TC2 10%	-	-	2.31	1.338	0.679	1.294	0.970
RS + TC2 20%	-	-	2.06	1.136	0.809	1.093	0.880
RS + TC2 25%	-	-	1.94	1.035	0.878	0.989	0.965
RS + TC20 10%	-	-	2.32	1.422	0.633	1.173	0.980
RS + TC20 20%	-	-	2.10	1.242	0.694	1.006	1.092
RS + TC20 25%	-	-	1.92	1.180	0.629	0.920	1.089

3. การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

3.1.แบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จำลองผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Plaxis แบบ 2 มิติในเวอร์ชัน Connect edition ในส่วนของ SoilTest ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในโปรแกรม Plaxis ที่สามารถจำลองผลการทดสอบของการทดสอบพื้นฐานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ได้หลากหลายการทดสอบโดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองดิน (Soil Model) ขึ้นมาทั้งหมด ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการได้โดยการเปรียบเทียบพฤติกรรมหรือผลการทดสอบตัวอย่างดินที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการกับตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองดินที่สนใจได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ตัวอย่างของการทดสอบพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์ที่สามารถจำลองได้ในส่วนของ SoilTest เช่น การทดสอบแบบแรงอัดสามแกนทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดิน (Oedometer) การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Test, DSS) ทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ เป็นต้น [22]

3.2.แบบจำลองดิน

แบบจำลองดินที่สามารถประยุกต์ใช้ได้โปรแกรม Plaxis 2D มีอยู่หลากหลายแบบจำลอง [23] ตั้งแต่แบบจำลองดินแบบยืดหยุ่นอย่างง่าย เช่น แบบจำลองยืดหยุ่นเส้นตรง (Linear Elastic Model, LE) เป็นต้น แบบจำลองดินแบบอีลาสโตพลาสติก เช่น แบบจำลองของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model, MC) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิง (Hardening Soil Model, HS) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิงแบบความเครียดต่ำ (Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness, HSmall) เป็นต้น แบบจำลองดินในสภาวะวิกฤติ เช่น แบบจำลองโมดิฟายเคมเคลย์ (Modified Cam-Clay Model, MCC) เป็นต้น แบบจำลองขั้นสูงที่สามารถจำลองพฤติกรรมการเกิดภาวะดินเหลว (Liquefaction) ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบปฐพีพลศาสตร์ เช่น UBC3D-PLM model เป็นต้น

เป็นที่ทราบกันว่า วัสดุทางวิศวกรรมโดยทั่วไปมีพฤติกรรมในการรับแรงกระทำในลักษณะของแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ (Constitutive Model) แบบอีลาสโตพลาสติก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองดิน

แบบอิลาสโตพลาสติก 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของมอร์-คูลอมป์ (MC) และแบบจำลองฮาร์ดเคนนิง (HS) ในการศึกษาพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินทรายและผสมทรายกรวดจนกระทั่งผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนของแบบจำลองดินทั้ง 2 แบบจำลอง

ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองดิน MC เป็นแบบจำลองดินที่เป็นที่นิยมสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมพลาสติกของดินโดยใช้ค่าตัวแปรกำลัง 3 ตัวแปร (ตัวแปรพลาสติก) ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (ϕ) ค่ามุมขยายตัวระหว่างเม็ดดิน (ψ) รวมถึงค่าแรงเชื่อมแน่น (c) เป็นต้น ค่าตัวแปรสตีเฟนอีก 2 ตัวแปร (ตัวแปรอิลาสติก) ได้แก่ ค่าโมดูลัสของยัง (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) เป็นต้น โดยในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พื้นผิวแรง (Load Surface) ในแบบจำลองดิน MC จะไม่เกิดการพัฒนามาในระหว่างการให้แรง (Loading) ซึ่งแบบจำลองดิน MC ถือเป็นแบบจำลองพฤติกรรมดินลำดับที่หนึ่ง ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ที่สนใจเพียงการวิบัติของมวลดินและจะถูกใช้ในการจำลองพฤติกรรมของดินด้วยวิธี FEM ในลำดับแรก ๆ เนื่องจากใช้ตัวแปรในการวิเคราะห์น้อยและตัวแปรไม่มีความซับซ้อน

สำหรับแบบจำลองดิน HS ถือเป็นแบบจำลองดินขั้นสูงที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินชนิดต่าง ๆ ได้ดีทั้งดินอ่อนและดินแข็งมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองดิน MC โดยเมื่อมวลดินถูกความเค้นเบี่ยงเบน (q) กระทำ ความแข็งแรงหรือสตีเฟนของมวลดินจะลดลงในขณะที่ความเครียดแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ โดยไม่สามารถคืนตัวกลับไปเหมือนเดิมได้อีกต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และความเครียดตามแนวแกน (ϵ_1) จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งในช่วงต้นของการทดสอบ หรือที่ความเครียดตามแนวแกนยังมีค่าไม่สูงมาก แบบจำลองดินที่สามารถอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวได้ถูกนำเสนอในครั้งแรกโดย Kondner (1963) และถูกพัฒนาจน

เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายว่าแบบจำลองดินไฮเปอร์โบลิก (Hyperbolic Model) นำเสนอ โดย Duncan และ Chang (1970) อ้างใน [22] แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองดิน HS ได้เข้ามาแทนที่แบบจำลองดินไฮเปอร์โบลิกจากเหตุผลหลายประการ เช่น มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีพลาสติกแทนทฤษฎีอิลาสติก มีการพิจารณาถึงค่าการขยายตัวของมวลดิน และมีการพิจารณาพื้นผิวการปิดกรอบ (Cap Yield Surface) โดยลักษณะพื้นฐานที่สำคัญที่มีการพิจารณาในแบบจำลองดิน HS มีดังนี้

1. ความแข็งแรงของมวลดินผันแปรกับความเค้น (Stress Dependent Stiffness): ตัวแปร m
2. ความเครียดแบบพลาสติกจากความเค้นเบี่ยงเบนปฐมภูมิ: ตัวแปร E_{50}^{ref}
3. ความเครียดแบบพลาสติกจากแรงกดอัดปฐมภูมิ: ตัวแปร E_{oed}^{ref}
4. ความแข็งแรงช่วงการถอนแรงและการให้แรงกลับแบบยืดหยุ่น: ตัวแปร E_{ur}^{ref} และ ν'_{ur}
5. สภาวะพังทลายตามแบบจำลองดิน MC: ตัวแปร ϕ , ψ และ c หรือ ϕ' , ψ' และ c'

สรุปได้ว่าในแบบจำลอง HS จะมีตัวแปรที่จำเป็นในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งสิ้น 11 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรกำลัง 3 ตัวแปร (ϕ , ψ และ C) ตัวแปรสตีเฟน 4 ตัวแปร (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , K_{oed} และ R_f) ตัวแปรขั้นสูงอีก 4 ตัวแปร (p^{ref} , ν'_{ur} , E_{ur}^{ref} และ m) โดย K_{oed} หรือ K_0^{nc} คือสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง, R_f คือ อัตราส่วนการพังทลาย และ p^{ref} คือ ค่าความเค้นอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 100 kN/m^2

อย่างไรก็ตามแม้ว่าแบบจำลองดิน HS จะมีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมของดินได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของดินในสภาพความเป็นจริงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองดินนี้ก็ยังมีย่อจำกัดที่สำคัญหลายประการ [23] เช่น ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการอ่อนตัว (Softening) ของมวลดินเนื่องจากสภาวะการขยายตัว (Dilatancy) รวมถึงผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์หลูว์รอนหรือแยกตัว (Debonding) ภายในอนุภาคเม็ดดิน เป็นต้น

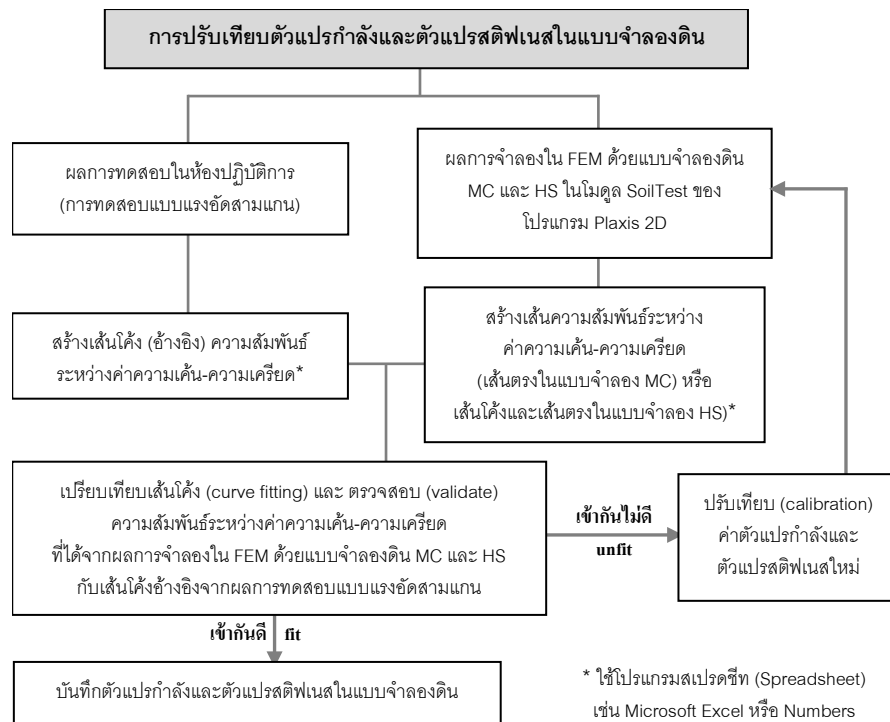
4. วิธีการเปรียบเทียบการจำลองผลการทดสอบในแบบจำลองดินกับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

ในช่วงแรกของทฤษฎีทางปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก ทฤษฎีต่าง ๆ ได้ถูกนำเสนอด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design) โดยสนใจเพียงกำลังรับแรงเฉือนของมวลดินในสภาวะวิบัติหรือที่ช่วงระดับความเครียดสูงเท่านั้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธามีความซับซ้อนรวมถึงมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนรูปหรือการทรุดตัวของมวลดินที่รองรับโครงสร้างต่าง ๆ มากขึ้น โดยแม้ว่าโครงสร้างอาจยังไม่เกิดการวิบัติ แต่การใช้งานในโครงสร้างเหล่านั้นอาจไม่ปลอดภัยหรือไม่อาจใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ วิธีสถานะขีดจำกัด (Limit State Design) จึงได้ถูกนำเสนอในเวลาต่อมา โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตั้งแต่ความเครียดในระดับต่ำ ปานกลางจนถึงระดับสูง [24] ซึ่งจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของดินช่วงก่อนการวิบัติจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาบางปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์

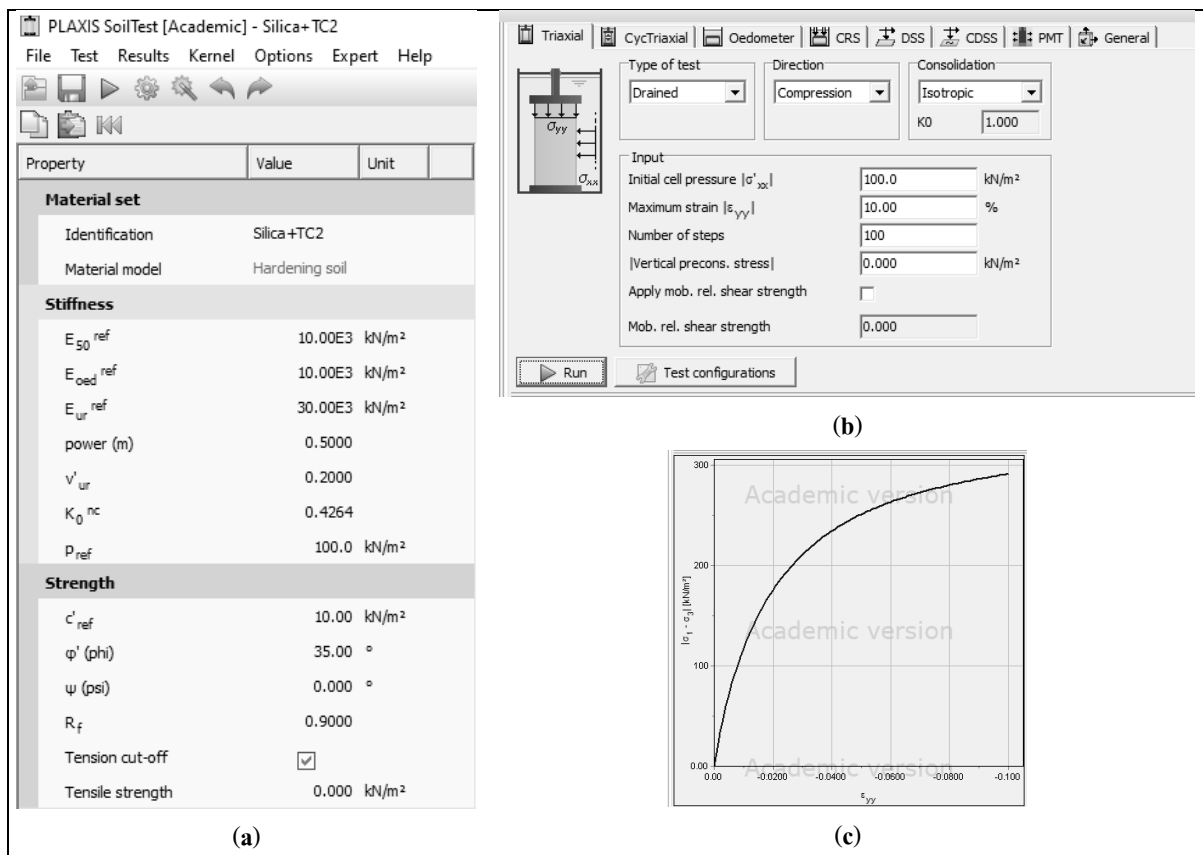
การทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงแรกสามารถทดสอบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของดินโดยการใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด หรือ Stress-Strain Curve ในการอธิบายพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear) ในการรับแรงเฉือนที่กระทำกับมวลดินตั้งแต่ที่ระดับความเครียดต่ำ ปานกลางไปจนกระทั่งที่ความเครียดสูง อย่างไรก็ตามในเวลาต่อมา การจำลองพฤติกรรมของดินดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี FEM โดยการใช้แบบจำลองดินแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 ซึ่งทำให้เกิดความสะดวก ประหยัดเวลาและสามารถนำแบบจำลองดินไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานรากทั้งปัญหาอย่างง่ายและปัญหาที่มีความซับซ้อนด้วยวิธี FEM ได้เป็นอย่างดี

การปรับเทียบ (Calibration) ตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเนสกระทำโดยการใช้วิธีแบบดั้งเดิมโดยการสร้าง

เส้นกราฟอ้างอิงซึ่งคือเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนหรือ $q - \varepsilon_1$ ของผลการทดสอบดินทรายแห้ง (SS และ RS) และดินทรายแห้งผสมเศษยางรถยนต์ (SS + TC และ RS + TC) ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จากผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในห้องปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรมสเปรดชีต (Spreadsheet) เช่น Microsoft Excel หรือ Numbers ใน Mac OS จากนั้นนำค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากการจำลองใน FEM ทั้งแบบจำลองดิน MC และ HS ในโมดูล (Module) SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบในรูปกราฟเดียวกันกับเส้นกราฟอ้างอิงข้างต้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบและตรวจสอบ (Validate) เส้นโค้ง (ในกรณีของแบบจำลอง HS) หรือเส้นตรง (ในกรณีของแบบจำลอง MC) กับเส้นโค้งอ้างอิง หากเส้นกราฟทั้งสองเข้ากันดี (Fit) ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเนสในโมดูล SoilTest ถือเป็นค่าที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธี FEM ได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม หากเส้นกราฟทั้งสองเข้ากันไม่ดี (Unfit) กล่าวคือ หากเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากแบบจำลองดินในโมดูล SoilTest ประมาณค่าความสัมพันธ์มากเกินไป (Overestimation) หรือต่ำเกินไป (Underestimation) กับค่าจากเส้นโค้งอ้างอิง เช่น มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงที่สุดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป มีค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ชันมากเกินไปหรือน้อยเกินไป ความโค้งของเส้นกราฟมากเกินไปหรือน้อยเกินไป (ในกรณีของแบบจำลอง HS) เป็นต้น ต้องมีการปรับเทียบหรือเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเนสในแบบจำลองดินในโมดูล SoilTest ใหม่ และทำการเปรียบเทียบและตรวจสอบผลการจำลองกับเส้นโค้งอ้างอิงจนกว่าเส้นกราฟจะเข้ากันดี **รูปที่ 2** แสดงขั้นตอนการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเนสในแบบจำลองดินด้วยวิธี FEM และ **รูปที่ 3** แสดงตัวอย่างการจำลองด้วยวิธี FEM ในโมดูล SoilTest จากโปรแกรม Plaxis 2D (a) การใส่ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเนสในแบบจำลองดิน HS (b) การใส่ค่าสถานะเริ่มต้นของการจำลองรวมถึงรูปแบบในการทดสอบและ (c) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ จากแบบจำลองดิน



รูปที่ 2 ขั้นตอนการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสติเฟนในแบบจำลองดินด้วยวิธี FEM



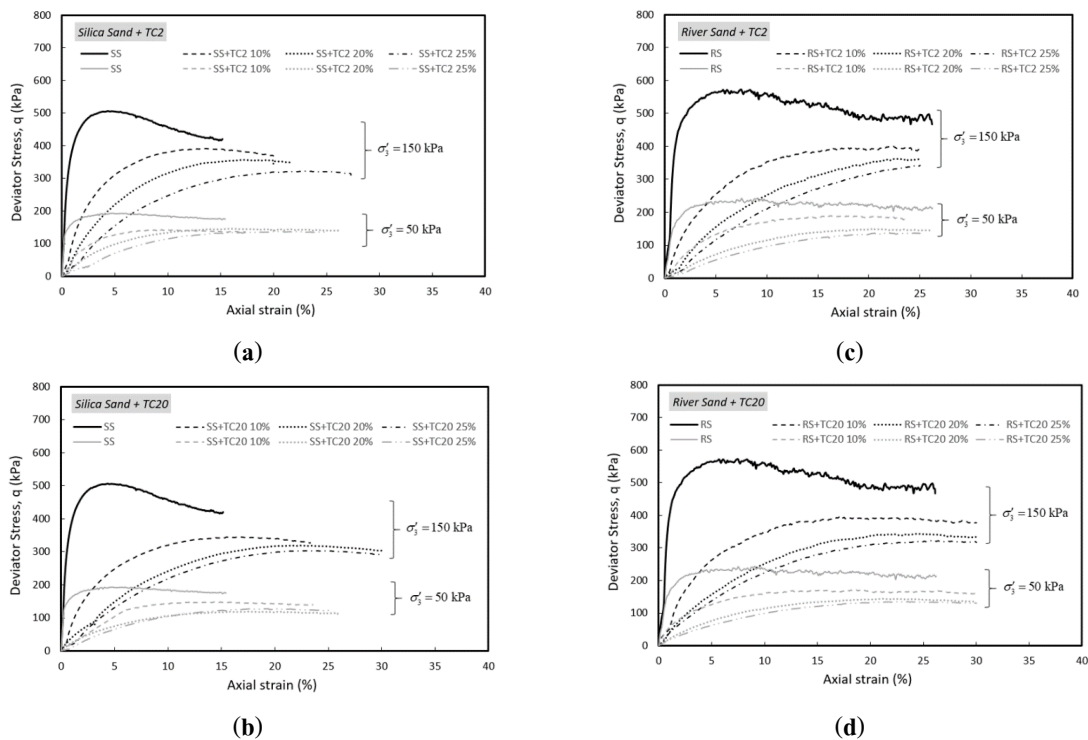
รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการจำลองด้วยวิธี FEM ในโมดูล SoilTest จากโปรแกรม Plaxis 2D (a) การใส่ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสติเฟนในแบบจำลองดิน HS (b) การใส่ค่าสภาวะเริ่มต้นของการจำลองรวมถึงรูปแบบในการทดสอบและ (c) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดตามแนวแกนจากแบบจำลองดิน

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1. การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

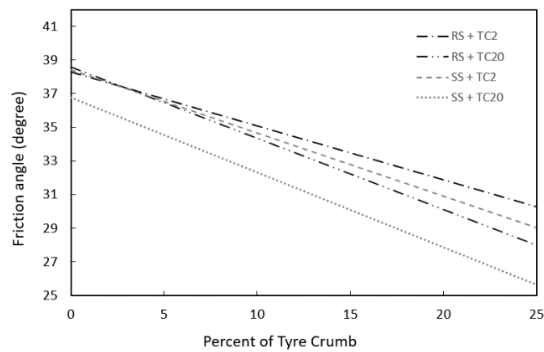
ผลการทดสอบตัวอย่างดินทราย SS และ RS และตัวอย่างดินทรายผสมทรายกรวดขนาด 2 mesh (TC2) และขนาด 20 mesh (TC20) ที่ความเค้นโอบริต 50 kPa และ 150 kPa ที่สถานะแน่นจากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำจำนวน 28 ตัวอย่างแสดงได้ดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าทั้งดินทราย SS และ RS ที่ไม่ผสมทรายกรวดขนาดความสัมพัทธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ มีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นและหลังจากค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด ดินทรายทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมของสภาวะความอ่อนตัวของความเครียด (Strain Softening) เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเค้นโอบริตที่มากขึ้น ในดินทราย SS ที่ลักษณะของเม็ดดินกลมมนค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (q_{max}) มีค่าน้อยกว่าดินทราย RS ที่มีรูปร่างลักษณะเม็ดดินแบบเหลี่ยมมุม อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนผสมทรายกรวดในดินทรายทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ทั้งค่าความแข็งแรง (Stiffness) และกำลังในการรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) จะลดลงตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กำลังในการรับแรงเฉือนสุดท้าย (Ultimate Shear

Strength) (ในช่วงความเครียดตามแนวแกนสูง) มีแนวโน้มที่เข้าใกล้กันและไม่ต่างกันมากนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าความเค้นโอบริตต่ำ รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวแปรกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength Parameters) ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (ϕ') ด้วยวิธีการวาดวงกลมมอร์ตามทฤษฎีการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criterion) แสดงให้เห็นว่าค่า ϕ' มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนผสมทรายกรวดที่เพิ่มขึ้นทั้งดินทราย SS และ RS ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับหลายงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ทรายกรวดขนาดเล็กลงกว่า 10 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าดินทรายชนิดเดียวกัน อัตราส่วนผสมเท่ากัน รวมถึงความเค้นโอบริตที่เท่ากัน ดินทรายที่ผสมทรายกรวดที่มีขนาดที่เล็กกว่าจะทำให้ค่า ϕ' ลดลงมากกว่า ข้อสังเกตที่สำคัญอีกประการหนึ่งพบว่าในดินทรายบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ผสมทรายกรวด เม็ดดินที่มีลักษณะเหลี่ยมมุมจะมีค่า ϕ' ที่มากกว่าเม็ดดินที่มีลักษณะมนกลมซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคเม็ดดิน หรือ Interparticle Force ที่เกิดขึ้นมีมากกว่า แต่เมื่อผสมทรายกรวดเข้าไปในดินทรายเหล่านั้นค่า ϕ' ของดินทรายทั้งสองชนิดจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4 ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนที่ความเค้นโอบริต 50 kPa และ 150 kPa

(a) ดินทราย SS + TC2 (b) ดินทราย SS + TC20 (c) ดินทราย RS + TC2 และ (d) ดินทราย RS + TC20



รูปที่ 5 มุมเสียดทานภายในของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ (TC2 และ TC 20)

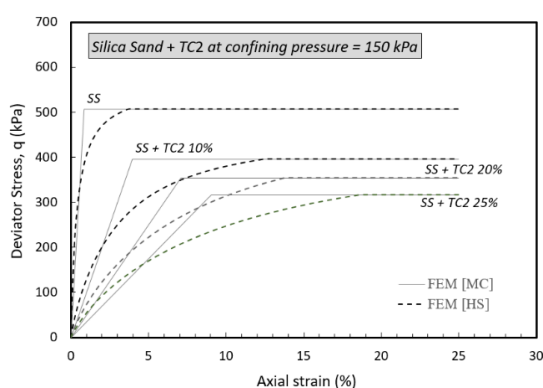
ค่า ϕ' และค่าแรงเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (Effective Cohesion, c') ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนตามทฤษฎีการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์นี้จะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงเบื้องต้นสำหรับการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในหัวข้อถัดไป

5.2. การปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์

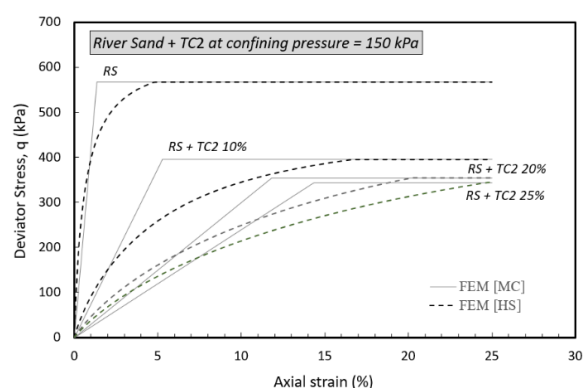
การปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ใช้ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการเป็นเส้นโค้งอ้างอิงเพื่อปรับเทียบและตรวจสอบค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในแบบจำลองดินทั้งสองด้วยวิธี FEM โดยใช้ขั้นตอนการปรับเทียบแสดงดังรูปที่ 2 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากผลการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ของ

ทั้งดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบอ้างอิงจากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ตัวอย่างดินทรายมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้นหรือเส้นโค้งพาราโบลา แบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรมดังกล่าวได้ใกล้เคียงอย่างค่อนข้างแม่นยำ สังเกตได้จากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากการจำลองใน FEM ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D จากแบบจำลองดิน HS มีลักษณะเส้นโค้งที่เข้ากันได้พอดีกับผลการทดสอบอ้างอิงในห้องปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าแบบจำลองดิน HS ไม่สามารถอธิบายอธิบายพฤติกรรมการรับแรงเฉือนหลังดินเกิดการรับแรงเฉือนสูงสุดกรณีเกิดพฤติกรรมสภาวะความอ่อนตัวของความเครียด (Strain Softening) ได้ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี [23] รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากการจำลองใน FEM ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนอ้างอิงที่ความเค้นโอบรัด 150 kPa ของ (a) ดินทราย SS และ (b) ดินทราย RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



(a)



(b)

รูปที่ 6 ตัวอย่างผลการจำลอง FEM ของแบบจำลองดิน MC และ HS ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D ที่ความเค้นโอบรัด 150 kPa ของ (a) ดินทราย SS และ (b) ดินทราย RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ในส่วนของแบบจำลองดิน MC จะเห็นได้ว่าค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์มีความสอดคล้องกับค่าตัวแปรกำลังที่ได้จากแบบจำลองดิน HS แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากพื้นฐานของแบบจำลองดิน MC มีลักษณะเชิงเส้นโดยสมบูรณ์ทำให้ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินในช่วงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบไม่เชิงเส้นได้ดีเท่ากับแบบจำลองดิน HS โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินทรายผสมเศษยางรถยนต์

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสังเกตเห็นได้ว่า ในแบบจำลอง HS ตัวแปรที่มีค่าคงที่แม้ว่าความเค้นโอบรัดและปริมาณเศษยางรถยนต์ที่ผสมในดินทรายจะเปลี่ยนไปเท่าใดก็

ตาม ได้แก่ ตัวแปรกำลัง 2 ตัวแปร คือ $\psi' = 0$ และ $c'_{ref} = 10$ kN/m² ตัวแปรขั้นสูง 2 ตัวแปร คือ $p^{ref} = 100$ kN/m² และ $v'_{ur} = 0.2$ และตัวแปรสตีเฟนส์ที่มีค่าเท่ากัน ได้แก่ $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$ ในแบบจำลอง MC ได้แก่ ตัวแปรกำลัง 2 ตัวแปร คือ $\psi' = 0$ และ $c'_{ref} = 10$ kN/m² ตัวแปรสตีเฟนส์ 1 ตัวแปร คือ $v'_{ur} = 0.3$ โดยในช่วงการจำลองด้วย FEM ในช่วงท้ายซึ่งเป็นช่วงการแสดงถึงกำลังในการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแบบจำลองดิน HS จะมีผลการจำลองสอดคล้องกับแบบจำลองดิน MC ผลการเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในแบบจำลองดิน HS และ MC ของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ด้วยวิธี FEM แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในแบบจำลองดิน HS และ MC ของดินทราย SS, RS และดินทราย SS และ RS ผสมกับเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนและความเค้นโอบรัดต่าง ๆ

Sand/Parameters			$\sigma'_3 = 50$ kN/m ²				$\sigma'_3 = 150$ kN/m ²			
			TC2				TC2			
			0%	10%	20%	25%	0%	10%	20%	25%
Strength parameters (HS)										
SS	$\phi' (\phi')$	degree	37	31	31	30	37.5	33	31	29
	R_f		0.94	0.78	0.68	0.6	0.91	0.85	0.7	0.72
RS	$\phi' (\phi')$	degree	41	36	31.5	30	39.5	33	31	30.5
	R_f		0.91	0.81	0.65	0.5	0.89	0.81	0.62	0.62
Strength parameters (MC)										
SS	$\phi' (\phi')$	degree	37	31	31	30	37.5	33	31	29
RS	$\phi' (\phi')$	degree	41	36	31.5	30	39.5	33	31	30.5
Stiffness parameters (HS)										
SS	E_{50}^{ref}	kN/m ²	59,000	5,000	2,200	1,500	60,000	10,000	5,000	3,500
	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	177,000	15,000	6,600	4,500	180,000	30,000	15,000	10,500
	Power (m)		0.65	0.1	0.1	0.1	0.7	0.1	0.15	0.12
	K_0^{nc}		0.398	0.485	0.485	0.500	0.391	0.455	0.485	0.515
RS	E_{50}^{ref}	kN/m ²	40,000	4,000	1,800	1,300	42,000	6,300	3,000	2,400
	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	120,000	12,000	5,400	3,900	126,000	18,900	9,000	7,200
	Power (m)		0.85	0.1	0.12	0.12	0.85	0.12	0.12	0.1
	K_0^{nc}		0.343	0.412	0.477	0.500	0.363	0.455	0.485	0.492

ตารางที่ 2 ตัวแปรกำลังและตัวแปรสติฟเนสในแบบจำลองดิน HS และ MC ของดินทราย SS, RS และดินทราย SS และ RS ผสมกับเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนและความเค้นโอบริตต่าง ๆ (ต่อ)

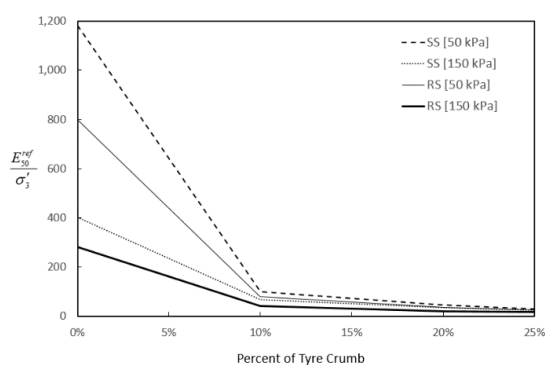
Sand/Parameters	$\sigma'_3 = 50 \text{ kN/m}^2$				$\sigma'_3 = 150 \text{ kN/m}^2$			
	TC2				TC2			
	0%	10%	20%	25%	0%	10%	20%	25%
Stiffness parameters (MC)								
SS E' kN/m ²	59,000	5,000	2,200	1,500	60,000	10,000	5,000	3,500
RS E' kN/m ²	25,000	4,000	1,800	1,300	42,000	7,500	3,000	2,400

หมายเหตุ: - แบบจำลองดิน HS ตัวแปรกำลังที่มีค่าคงที่ คือ $c'_{ref} = 10 \text{ kN/m}^2$, $\psi' = 0^\circ$ ตัวแปรสติฟเนสที่มีค่าคงที่ คือ $p_{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$ และ $\nu'_{ur} = 0.2$ และตัวแปรสติฟเนสที่มีค่าเท่ากัน คือ $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$
 - แบบจำลองดิน MC ตัวแปรกำลังที่มีค่าคงที่ คือ $c'_{ref} = 10 \text{ kN/m}^2$, $\psi' = 0^\circ$ และ ตัวแปรสติฟเนสที่มีค่าคงที่ คือ $\nu' = 0.3$

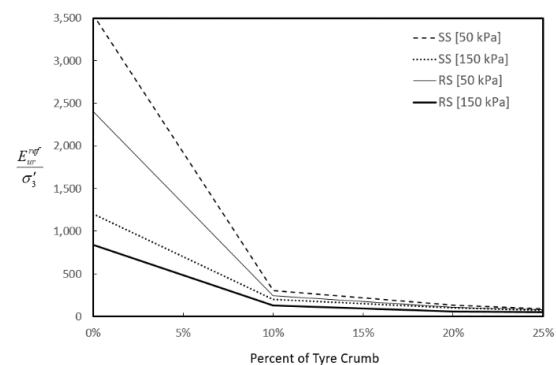
รูปที่ 7 แสดงค่าออร์มอลไลซ์ (Normalized) ตัวแปรสติฟเนสกับค่าความเค้นโอบริต ได้แก่ E_{50}^{ref} / σ'_3 และ E_{ur}^{ref} / σ'_3 ของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในแบบจำลองดิน HS ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า R_f และ ค่า K_0^{nc} ลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับในลักษณะเชิงเส้นตรงเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้น และในส่วนของตัวแปรสติฟเนส (Power, m) จะลดลงอย่างมากเมื่อเศษยางรถยนต์ถูกผสมลงในดินทรายแม้ในปริมาณไม่มากโดยมีแนวโน้มการลดลงเช่นเดียวกับค่าตัวแปรสติฟเนส E_{50}^{ref} และ E_{ur}^{ref} ในขณะที่หากปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้นจาก 10% ขึ้นไปจะไม่ทำให้ค่า E_{50}^{ref} และ E_{ur}^{ref} เปลี่ยนแปลงมากนัก

รูปที่ 8 แสดงค่าตัวแปรกำลัง (R_f) และตัวแปรสติฟเนส

(Power, m และ K_0^{nc}) ของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในแบบจำลองดิน HS ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า R_f และ ค่า K_0^{nc} ลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับในลักษณะเชิงเส้นตรงเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้น และในส่วนของตัวแปรสติฟเนส (Power, m) จะลดลงอย่างมากเมื่อเศษยางรถยนต์ถูกผสมลงในดินทรายแม้ในปริมาณไม่มากโดยมีแนวโน้มการลดลงเช่นเดียวกับค่าตัวแปรสติฟเนส E_{50}^{ref} และ E_{ur}^{ref} ในขณะที่หากปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้นจาก 10% ค่าตัวแปร Power (m) จะมีค่าค่อนข้างคงที่

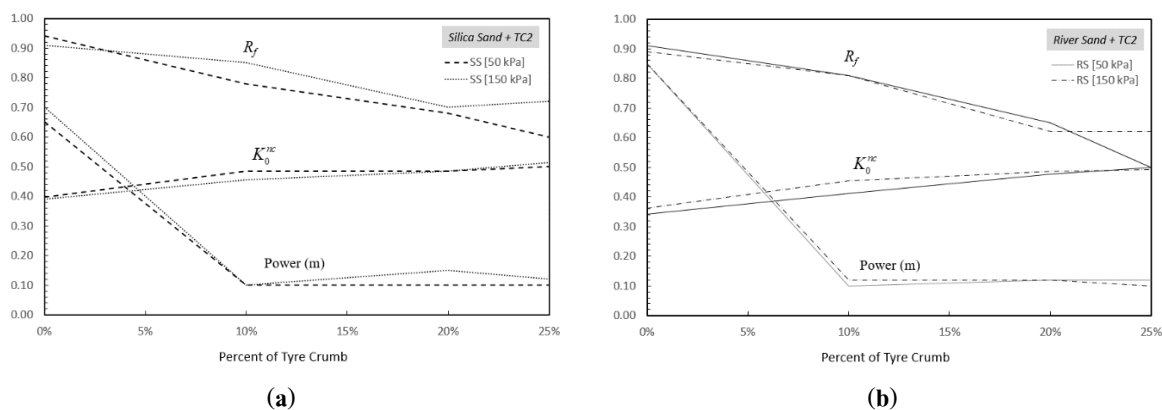


(a)



(b)

รูปที่ 7 ค่าออร์มอลไลซ์ (Normalized) ตัวแปรสติฟเนสกับค่าความเค้นโอบริตของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) E_{50}^{ref} / σ'_3 (b) E_{ur}^{ref} / σ'_3 ในแบบจำลองดิน HS



รูปที่ 8 ค่าตัวแปรกำลัง (R_f) และตัวแปรสตีเฟนส (Power, m และ K_0^{nc}) ของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) ดินทราย SS (b) ดินทราย RS ในแบบจำลองดิน HS

ในแบบจำลองดิน MC ค่าตัวแปรกำลังของทั้งดินทราย SS และดินทราย RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่ค่าอัตราส่วนต่าง ๆ จะมีค่าเท่ากับในแบบจำลองดิน HS ในขณะที่ตัวแปรสตีเฟนส (E') จะมีค่าลดลงเมื่อประมาณเศษยางรถยนต์ในดินทรายเพิ่มมากขึ้น โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการลดลงของตัวแปรสตีเฟนสในแบบจำลองดิน HS

6. สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบตัวอย่างดินทรายและตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ทั้งสองชนิด ได้แก่ ดินทราย SS ดินทราย SS + TC2 ดินทราย RS และดินทราย RS + TC2 ในการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (การทดสอบอ้างอิง) และการเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสจากผลการทดสอบอ้างอิงข้างต้นด้วยการจำลอง FEM ทั้งแบบจำลองดิน MC และ HS ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D สรุปได้ว่า

1. ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนพบว่า ค่าความแข็งแรง กำลังรับแรงเฉือน ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินของตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยในดินทรายบริสุทธิ์ (ไม่มีส่วนผสมยางรถยนต์) ทั้งตัวอย่างดินทราย SS และ RS เมื่อวิบัติจะมีพฤติกรรมหรือสภาวะอ่อนตัวของความเครียดเกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเค้นโอบรัดมีค่าสูง (150 kPa)

2. ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของดินทรายชนิดเดียวกันในอัตราส่วนผสมเศษยางรถยนต์รวมถึงความเค้นโอบรัดที่เท่ากัน เศษยางรถยนต์ขนาดเล็กกว่า (TC20 ขนาดเล็กกว่า TC2) จะทำให้ค่า ϕ' ลดลงมากกว่า

3. ในดินทรายบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ผสมเศษยางรถยนต์เม็ดดินที่มีลักษณะเหลี่ยมมุมจะมีค่า ϕ' ที่มากกว่าเม็ดดินที่มีลักษณะมนกลมซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่เกิดขึ้นมีมากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อผสมเศษยางรถยนต์เข้าไปในดินทราย ค่า ϕ' ของดินทรายทั้งสองชนิดจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

4. การเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสในแบบจำลองดิน HS พบว่า แบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรม การรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงและแม่นยำกับผลการทดสอบอ้างอิงจากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ตัวอย่างดินทรายมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดิน HS ไม่สามารถอธิบายอธิบายพฤติกรรม การรับแรงเฉือนหลังตัวอย่างดินทรายดินทรายบริสุทธิ์เกิดการรับแรงเฉือนสูงสุดกรณีเกิดพฤติกรรมสภาวะความอ่อนตัวของความเครียดได้ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีได้กล่าวไว้

5. การเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสในแบบจำลองดิน MC พบว่า ค่าตัวแปรกำลังของดินทรายทั้งสองชนิดที่ผสมเศษยางรถยนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าเท่ากับในแบบจำลองดิน HS ในขณะที่ตัวแปรสตีเฟน

จะมีค่าลดลงเมื่อประมาณเศษยางรถยนต์ในดินทรายเพิ่มมากขึ้น โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการลดลงของตัวแปรสถิติในแบบจำลองดิน HS

6. ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบที่ถูกต้องแล้ว สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองดินในโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและฐานรากในการประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์กับงานทางวิศวกรรมโยธา เช่น การวิเคราะห์คันดินถม การวิเคราะห์กำแพงกันดิน วัสดุถมหน้าหนักเบาในงานทาง เป็นต้น โดยเศษยางรถยนต์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นเศษยางรถยนต์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายเป็นจำนวนมากจากโรงงานรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าตามท้องตลาดในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Rubber Recycling Technology*, Research and Development Centre for Thai Rubber Industry, Oct 18, 2021. [Online]. Available: http://rubber.oie.go.th/box/Article/19951/1_rubberpowder.pdf
- [2] E. Masad, R. Taha, C. Ho and T. Papagiannakis, "Engineering Properties of Tire/Soil Mixtures as a Lightweight Fill Material," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 297–304, 1996, doi: 10.1520/GTJ10355J.
- [3] S. Youwai and D. T. Bergado, "Strength and Deformation Characteristics of Shredded Rubber Tire-Sand Mixtures," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, pp. 254–264, 2003, doi: 10.1139/t02-104.
- [4] S. Kawata, M. Hyodo, P. Orense, S. Yamada and H. Hazarika, "Undrained and Drained Shear Behaviour of Sand and Tire Chips Composite Material," in *Proc. of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, Yokosuka, Japan, 2007, pp. 277–283.
- [5] M. Neaz Sheikh, M. S. Mashiri, J. S. Vinod and H. H. Tsang, "Shear and Compressibility Behavior of Sand-Tire Crumb Mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1366–1374, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000696.
- [6] R. Noorzad and M. Raveshi, "Mechanical Behavior of Waste Tire Crumbs-Sand Mixtures Determined by Triaxial Tests," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 35, pp. 1793–1802, 2017, doi: 10.1007/s10706-017-0209-9.
- [7] P. Pongvithayapanu, "Direct Shear Behaviour of Sand-Tyre Crumb Mixtures," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, pp. 1–14, 2021, doi: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.005.
- [8] T. Edil and P. Bosscher, "Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 453–464, 1994, doi: 10.1520/GTJ10306J.
- [9] G. V. Rao and R. K. Dutta, "Compressibility and Strength Behaviour of Sand-Tyre Chip Mixtures," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 24, pp. 711–724, 2006, doi: 10.1007/s10706-004-4006-x.
- [10] A. H. J. Al-Rkaby, "Strength and Deformation of Sand-Tire Rubber Mixtures (STRM): An Experimental Study," *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 41, no. 2, pp. 74–80, 2019, doi: 10.2478/sgem-2019-0007.
- [11] S. B. Reddy and A. M. Krishna, "Recycled Tire Chips Mixed with Sand as Lightweight Backfill Material in Retaining Wall Applications: An Experimental Investigation," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1, no. 31, 2015, doi: 10.1007/s40891-015-0036-0.
- [12] S. N. Moghaddas Tafreshi, Gh. Tavakoli Mehrjardi and A. R. Dawson, "Buried Pipes in Rubber-Soil Backfilled Trenches under Cyclic Loading," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, pp. 1346–1356, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000710, 2012

- [13] J. H. Lee, R. Salgado, A. Bernal, and C. W. Lovell "Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 132–141, 1999, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:2(132).
- [14] S. Youwai and D. T. Bergado, "Numerical Analysis of Reinforced Wall Using Rubber Tire Chips-Sand Mixtures as Backfill Material," *Computers and Geotechnics*, vol 31, pp. 103–114, 2004, doi: 10.1016/j.compgeo.2004.01.008.
- [15] S. B. Reddy, A. M. Krishna and K. R. Reddy "Sustainable Utilization of Scrap Tire Derived Geomaterials for Geotechnical Applications," *Indian Geotechnical Journal*, vol 48, pp. 251–266, 2018, doi: 10.1007/s40098-017-0273-3, 2018.
- [16] P. Horatiu and B. Loretta, "Using Finite Element Method in Geotechnical Design, Soil Constitutive Laws and Calibration of the Parameters: Retaining wall case study," *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics Journal*, vol 5, pp. 177–186, 2010.
- [17] C. Surarak, S. Likitlersuang, D. Wanatowski, A. Balasubramaniam, E. Oh and H. Guan, "Stiffness and Strength Parameters for Hardening Soil Model of Soft and Stiff Bangkok Clays," *Soils and Foundations*, vol. 52, no. 4, pp. 682–697, 2012, doi: 10.1016/j.sandf.2012.07.009.
- [18] G. Darvintharen, M. A. M. Ismail, M. F. M. Zaki and M. H. Z. Abidin, "Calibration of Stiffness Parameters for Hardening Soil Model in Residual Soil from Kenny Hill Formation" *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, vol. 67, pp. 119–125, doi: 10.7186/bgsm67201915.
- [19] F. Yanbin, H. Siyue, Z. Sizhan and Y. Yong, "Parameter Analysis on Hardening Soil Model of Soft Soil for Foundation Pits Based on Shear Rates in Shenzhen Bay, China," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1155/2020/7810918.
- [20] S. Fergani, K. A. A. Mokhtar, L. Djerbal, P. Pizette, N. - E. Abriak and A. Nechnech., "FEM Simulations of Granular Matter Behaviour under Triaxial Tests," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol 39, pp. 991–1008, 2021, doi: 10.1007/s10706-020-01540-x.
- [21] S. Saleh, N. Z. M. Yunus, K. Ahmad and K. N. M. Said, "Numerical Simulation with Hardening Soil Model Parameters of Marine Clay Obtained from Conventional Tests," *SN Applied Sciences*, vol. 3, 2021, Art. no. 156, doi: 10.1007/s42452-020-04115-w.
- [22] Bentley Systems Inc., Exton, PA, USA. *Plaxis 2D Reference Manual-Plaxis CONNECT Edition V21.00*. 2020. Accessed: Dec. 01, 2020. [Online]. Available: https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS2DCE_2D00_V21.00_2D00_02_2D00_Reference_2D00_2D.pdf
- [23] Bentley Systems, Inc., Exton, PA, USA. *Plaxis 2D Material Models Manual-Plaxis CONNECT Edition V21.00*. 2020. Accessed: Dec. 01, 2020. [Online]. Available: https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS2DCE_2D00_V21.00_2D00_03_2D00_Material_2D00_Models.pdf
- [24] S. Yimsiri, "Undrained Strength-Deformation Characteristics of Bangkok Clay under General Stress Condition," Dept. of Civ. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, Final Report, 2014.

ผลกระทบของเทคนิคการพยากรณ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟค
ภายใต้การสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่งในโซ่อุปทาน

Impact of exponential smoothing forecasting technique on bullwhip effect index
under a dual-supplier supply chain system

กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข^{1*}, วริษา ต่างใจ², ทศพล เกียรติเจริญผล¹, ลักณ์สิริ ตรีนานูรัตน์³, ดารินทร์ ล้วนวิเศษ⁴,
อภิรดี สุขมิลินท์⁵, จารุวรรณ แก้วล้วน¹, จุฑามาศ เกษแก้ว¹ และ กนกกรรณ ลีโรจนaprapa⁶

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

² ภาควิชาสถิติ, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง หัวหมาก บางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240

³ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คอหงส์
หาดใหญ่ สงขลา 90110

⁴ สาขาวิชาสิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี เมือง อุดรธานี 41000

⁵ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร อนุสาวรีย์
บางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

⁶ ภาควิชาสถิติ, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Kittiwat Sirikasemsuk^{1*}, Warisa Thangjai², Tossapol Kiatcharoenpol¹, Laksiri Treeranurat³, Darin Luanwiset⁴,
Apiradee Sukmilin⁵, Jaruan Kaewluan¹, Jutamart Ketkaew¹ and Kanogkan Leerojanaprapa⁶

¹ Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Lat Krabang, Bangkok, 10520, Thailand

² Department of Statistics, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Huamark,
Bangkapi, Bangkok, 10240, Thailand

³ Department of Industrial Engineering and Manufacturing, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Kho Hong, Hatyai, Songkhla, 90110, Thailand

⁴ Department of Environment, Faculty of Science, Udon Thani Rajabhat University, Muang,
Udon Thani, 41000, Thailand

⁵ Environmental Science and Technology Program, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University,
Anusawari, Bang Khen, Bangkok, 10220, Thailand

⁶ Statistics Department, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Lat Krabang, Bangkok,
10520, Thailand

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

Received: Aug 29, 2021; Revised: Dec 01, 2021; Accepted: Dec 3, 2021

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและจำลองพฤติกรรมของบูลวิปเอฟเฟกต์ของโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง ซึ่งบูลวิปเอฟเฟกต์เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ในห่วงโซ่อุปทาน โดยที่ความแปรปรวนของลูกค้านำดับถัดไป จะสูงกว่าความแปรปรวนของลูกค้านำก่อนหน้า โครงสร้างโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง ประกอบด้วย ผู้ผลิตที่รับช่วงต่อ 1 แห่ง ผู้ผลิตสินค้า 2 แห่ง และผู้ค้าปลีก 1 แห่ง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ทุกสมาชิกในโซ่อุปทานใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล และใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังเป็นแบบสั่งซื้อที่เหมาะสม (Order-up-to Inventory Policy) และความต้องการของลูกค้าที่ผู้ค้าปลีกต้องเผชิญถูกสมมติให้เป็นไปตามตัวแบบออเทอริเกรสชันอันดับที่หนึ่ง [The First Order Autoregressive (AR(1))] ขอบเขตที่สำคัญของบทความวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระยะเวลานำส่งสินค้าจากผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง ถึงผู้ค้าปลีกมีค่าเท่ากัน ผลการวิเคราะห์พบว่า อิทธิพลของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีกไม่มีผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์ ดังนั้นค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์ในการสั่งซื้อวัตถุดิบจากหนึ่งแหล่งและสองแหล่งจะมีเท่ากัน นอกจากนี้ค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์แปรผันกับค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล และค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอริเกรสชันมีผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์ สุดท้ายนี้ผู้จัดการโซ่อุปทานในฝ่ายจัดซื้อจะได้รับและเพิ่มความเข้าใจถึงผลกระทบดังกล่าวในการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่งหรือหนึ่งแหล่งในโซ่อุปทานจากงานวิจัยฉบับนี้

คำสำคัญ : โซ่อุปทาน, บูลวิปเอฟเฟกต์, ระบบการจัดซื้อสินค้าจากสองแหล่ง, นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังเป็นแบบสั่งซื้อที่เหมาะสม, การพยากรณ์แบบปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล

Abstract

This research objective is to study and simulate the bullwhip effect under a dual-supplier system. The bullwhip effect is an adverse phenomenon in the supply chain in which the demand variance at upstream members is higher than the demand variance at downstream members. A dual-supplier system consists of a sub-supplier, two suppliers and a retailer. In this research, all members use the exponential smoothing forecasting technique and the order-up-to inventory policy. Also, it is assumed that the incoming demand process for the retailer is the first order autoregressive (AR(1)) model. In the important scope of this research, the lead times from two suppliers to a retailer are equal. After analysis, it is found that the factor of the proportion of the supplier's order quantity to the total order quantity issued by the retailer does not affect the bullwhip effect index. Hence, the bullwhip effect values between the dual-supplier and single-supplier models are equal. In addition, the bullwhip effects vary according to the smoothing factor of the exponential smoothing forecasting technique; and the first-order autocorrelation coefficient has an effect on the bullwhip effects. Finally, purchasing and supply chain managers will gain and increase a clear understanding of such behavior matters in the dual-supplier or single-supplier systems in the supply chain from this current research.

Key words: Supply Chain; Bullwhip Effect; Dual-supplier System; Order-up-to Inventory; Exponential Smoothing Forecasting Technique

1. บทนำ

ปัจจุบันองค์กรต่าง ๆ ต้องเผชิญกับการแข่งขันที่สูง ให้องค์กรต้องปรับตัว และเตรียมพร้อมรับมือกับการแข่งขันที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา การปรับตัวเพื่อเพิ่มความสามารถในการ

แข่งขันให้องค์กรนั้น วิธีการที่เป็นที่นิยม คือ การมุ่งตอบสนองความต้องการของลูกค้าและสร้างความพึงพอใจสูงสุดให้แก่ลูกค้า หากองค์กรใดสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า และสร้างความพึงพอใจให้แก่ลูกค้าได้

สูงสุด องค์การนั้นย่อมได้ครอบครองส่วนแบ่งทางการตลาดมากที่สุด และองค์การสามารถดำเนินการต่อไปได้

ในอุตสาหกรรมการผลิตสินค้าใด ๆ องค์การหนึ่ง ๆ อาจไม่สามารถดำเนินงานได้ทุกลักษณะงานเพียงองค์การเดียวตลอดการผลิต แต่อาจดำเนินงานร่วมกับองค์การอื่น ๆ ที่ดำเนินงานในลักษณะงานที่ต่างกัน เช่น องค์การหนึ่งดำเนินการจัดเตรียมวัตถุดิบในการผลิตสินค้าสำเร็จรูป (ฝั่งต้นน้ำ) อีกองค์การหนึ่งดำเนินการแปรรูปวัตถุดิบไปเป็นสินค้าสำเร็จรูป (ฝั่งกลางน้ำ) และอีกองค์การหนึ่งดำเนินการกระจายสินค้าสำเร็จรูปไปสู่ลูกค้า (ฝั่งปลายน้ำ) เรียกองค์การต่าง ๆ ที่ดำเนินงานร่วมกันในลักษณะนี้ว่า ห่วงโซ่อุปทาน การดำเนินงานร่วมกันในโซ่อุปทานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ข้อมูลความต้องการของลูกค้าถือเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับแต่ละองค์การ

ทุก ๆ องค์การปรารถนาที่จะทราบข้อมูลความต้องการที่แน่นอนของลูกค้าในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ แต่ในความเป็นจริงแล้ว องค์การไม่สามารถทราบได้ว่าความต้องการของลูกค้าทั้งหมดในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ นั้นเป็นเท่าใด จนกว่าจะสิ้นสุดหรือผ่านช่วงเวลานั้นไปแล้ว ทำให้้องค์การต้องใช้ข้อมูลความต้องการจริงของลูกค้าที่ทราบแล้วในอดีต มาพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาปัจจุบัน และจัดเตรียมสินค้าหรือบริการไว้ตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่จะเกิดขึ้น

การพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าทำให้้องค์การสามารถจัดเตรียมสินค้าและบริการไว้ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ แต่ไม่อาจยืนยันได้ว่าจะสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้หรือไม่ เนื่องจากการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าเป็นการทำนายหรือคาดคะเนความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาปัจจุบัน ซึ่งความต้องการนั้นยังไม่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อความต้องการจริงของลูกค้าเกิดขึ้นแล้ว อาจจะมากหรือน้อยกว่าค่าที่พยากรณ์ไว้ เมื่อการพยากรณ์มีความไม่แน่นอนแทรกอยู่ และแต่ละองค์การในโซ่อุปทานต้องพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าเป็นลำดับเรื่อยไปตลอดโซ่อุปทาน และทำให้ความไม่แน่นอนถูกส่งต่อกันไปเป็นลำดับ จนท้ายที่สุดแล้วความแปรปรวนของความต้องการของลูกค้าที่ฝั่งต้นน้ำสูงกว่าความแปรปรวนของความต้องการ

ของลูกค้าที่ฝั่งปลายน้ำ เกิดเป็นปรากฏการณ์บลูวิปเอฟเฟกซ์ [1]

บลูวิปเอฟเฟกซ์เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ในโซ่อุปทาน ซึ่งเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น ระยะเวลาจัดส่งสินค้าที่ไม่เท่ากับ 0 ความขาดแคลนของการจัดหา (Supply Shortage) และการประมวลผลสัญญาณความต้องการของลูกค้า [2-3] หากไม่ต้องการให้เกิดบลูวิปเอฟเฟกซ์ จำเป็นต้องกำจัดสาเหตุต่าง ๆ ให้หมดไป แต่เป็นการยากที่จะสามารถกำจัดสาเหตุเหล่านั้นให้หมดไปได้

จากการทบทวนวรรณกรรมผู้วิจัยพบงานวิจัยหลาย ๆ งานที่ศึกษาบลูวิปเอฟเฟกซ์ในโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง เช่น งานวิจัยของ Chen และ คณะ [4] ศึกษาบลูวิปเอฟเฟกซ์ในโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง โดยใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล และกำหนดให้ความต้องการของลูกค้าเป็นไปตามตัวแบบ AR(1) และตัวแบบแนวโน้มเชิงเส้น พบว่า ค่าดัชนีบลูวิปเอฟเฟกซ์เพิ่มขึ้น เมื่อค่าคงที่ของการปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียลเพิ่มขึ้น และ พารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอเรกเรชันที่น้อยกว่า 0 ทำให้เกิดค่าดัชนีบลูวิปเอฟเฟกซ์มากกว่าพารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอเรกเรชันที่มากกว่า 0 นอกจากนั้นในงานวิจัยของ Chen และคณะ [4] ยังได้เปรียบเทียบผลการวิจัยที่ได้กับผลการวิจัยด้วยวิธีการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ พบว่าการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียลทำให้เกิดบลูวิปเอฟเฟกซ์มากกว่าการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่

จากงานวิจัยของ Zhang [5] ศึกษาผลกระทบของเทคนิคการพยากรณ์ต่อค่าบลูวิปเอฟเฟกซ์ โดยกำหนดความต้องการของลูกค้าเป็นไปตามตัวแบบ AR(1) และใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังแบบสั่งซื้อที่เหมาะสม (Order-up-to Inventory Policy) โดยทำการศึกษาเทคนิคการพยากรณ์ 3 แบบ คือ แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ และแบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล พบว่า สำหรับการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุดนั้น บลูวิปเอฟเฟกซ์ไม่เกิดขึ้น เมื่อพารามิเตอร์ออเทอเรกเรชันน้อยกว่า 0 และเมื่อระยะเวลานำส่งสินค้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดบลูวิปเอฟเฟกซ์มากขึ้น สำหรับการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ บลูวิปเอฟเฟกซ์มี

แนวโน้มลดลง เมื่อช่วงเวลาในการพยากรณ์ความต้องการแบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น และสำหรับการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล บูลวิปเอฟเฟกต์มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ออเทอรีเกรสชัน

จากงานวิจัยของ Alwan และคณะ [1] ศึกษาค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์บนโซ่อุปทานสองระดับ ที่ประกอบด้วย ผู้ค้าปลีก 1 แห่ง และผู้ผลิตสินค้า 1 แห่ง โดยผู้ค้าปลีกใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังแบบสั่งซื้อที่เหมาะสม และใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด นอกจากนี้กำหนดให้ความต้องการของลูกค้าเป็นไปตามตัวแบบ AR(1) และทำการศึกษาด้วยวิธีการคิดวิเคราะห์ ซึ่งได้เปรียบเทียบผลของเทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด, เทคนิคการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ และแบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์ พบว่า บูลวิปเอฟเฟกต์ไม่เกิดขึ้น เมื่อใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุดในกรณีที่พารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอรีเกรสชันเป็นลบ และบูลวิปเอฟเฟกต์เป็นฟังก์ชันของระยะเวลานำส่งสินค้า เมื่อใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ และแบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล กล่าวคือ บูลวิปเอฟเฟกต์เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลานำส่งสินค้ามากขึ้น แต่หากใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด จะได้ว่าระยะเวลานำส่งสินค้าจะมีผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์อย่างจำกัด นอกจากนี้ยังได้กล่าวอีกว่า บูลวิปเอฟเฟกต์สามารถลดลงหรือ ถูกกำจัดให้หมดไปได้ โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอรีเกรสชัน ในกรณีที่ใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

จากงานวิจัยของ Wang และคณะ [6] ทำการเปรียบเทียบบูลวิปเอฟเฟกต์บนโซ่อุปทาน เมื่อใช้เทคนิคการพยากรณ์ 3 แบบ คือ แบบถูกต้อง (วิธีการพยากรณ์ที่ถูกต้องตามรูปแบบความต้องการของลูกค้า) แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ และแบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล โดยกำหนดรูปแบบความต้องการของลูกค้าเป็น 3 แบบ ได้แก่ AR(1), MA(1) และ ARIMA(1,1) ทำการศึกษามบนโซ่อุปทานหนึ่งระดับ ที่ประกอบด้วยผู้ค้าปลีก 1 แห่ง ซึ่งใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังแบบสั่งซื้อที่เหมาะสม และทำการศึกษาด้วยวิธีการจำลองโมเดลโซ่

อุปทาน พบว่า การใช้พารามิเตอร์ของเทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสม สามารถลดความแปรปรวนลงได้ แต่ไม่สามารถกำจัดบูลวิปเอฟเฟกต์ทั้งหมดให้หมดไปได้ บูลวิปเอฟเฟกต์เป็นฟังก์ชันของระยะเวลานำส่งสินค้า คือ บูลวิปเอฟเฟกต์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลานำส่งสินค้าเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ความต้องการของลูกค้าเป็นแบบ AR(1) และ ARIMA(1, 1) สำหรับในกรณีที่ความต้องการของลูกค้าเป็นแบบ MA(1) ระยะเวลานำส่งสินค้าจะไม่มีผลต่อบูลวิปเอฟเฟกต์ แต่ตัวพารามิเตอร์ออเทอรีเกรสชันจะส่งผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์ บูลวิปเอฟเฟกต์ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการพยากรณ์ และระยะเวลาที่สั้นและรวดเร็วในการรับรู้ข้อมูลปริมาณการสั่งซื้อสินค้า

จากงานวิจัยของ Hong และ Ping [7] ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการพยากรณ์ต่อบูลวิปเอฟเฟกต์ และหาวิธีการลดค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์ เมื่อใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบต่าง ๆ โดยศึกษาเทคนิคการพยากรณ์ 3 แบบ คือ แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล และแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ทำการศึกษายาใต้โซ่อุปทานสองระดับ ที่ประกอบด้วย ผู้ค้าปลีก 1 แห่ง และผู้ผลิตสินค้า 1 แห่ง นอกจากนี้ได้กำหนดให้ผู้ค้าปลีกใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังแบบสั่งซื้อที่เหมาะสม และความต้องการของลูกค้าเป็นไปตามตัวแบบ AR(1) โดยเริ่มทำการศึกษาจากการคิดวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ พบว่า บูลวิปเอฟเฟกต์เกิดขึ้นเมื่อผู้ค้าปลีกใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบถ่วงเฉลี่ยเคลื่อนที่ หรือแบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล และใช้นโยบายสั่งซื้อที่เหมาะสม แต่ถ้าใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด บูลวิปเอฟเฟกต์เกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอรีเกรสชันอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และบูลวิปเอฟเฟกต์จะไม่เกิดขึ้นภายใต้พารามิเตอร์ของตัวแบบออเทอรีเกรสชันอยู่ในช่วง -1 ถึง 0 นอกจากนั้นยังได้ทำการจำลองโมเดลโซ่อุปทาน เพื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์จากแบบจำลอง และค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์จากการคิดวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ พบว่า ค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงเชื่อได้ว่าค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกต์ที่เกิดขึ้นนั้นถูกต้อง

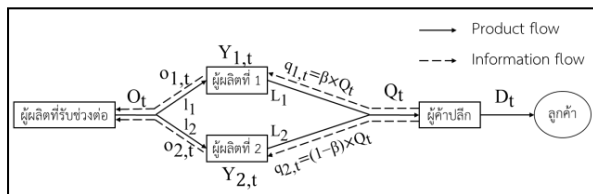
จากงานวิจัยของ Sirikasemsuk และ Luong [8] ผู้วิจัยได้นำมาศึกษาเพิ่มเติม โดยเปลี่ยนเทคนิคการพยากรณ์จากแบบ

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด (Minimum Mean Square Error) มาเป็นการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล และใช้การศึกษาโดยการจำลองโมเดลแทนการคิดวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Approach) โดยงานวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของบูลวิปเอฟเฟกบนโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีกต่อบูลวิปเอฟเฟก และเปรียบเทียบบูลวิปเอฟเฟกระหว่างโมเดลการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่งและการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง ภายใต้ขอบเขตที่สำคัญของงานวิจัยที่กำหนดให้ระยะเวลานำส่งสินค้าจากผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง ถึงผู้ค้าปลีกมีค่าเท่ากัน

2. คำอธิบายแบบโมเดล

2.1. โครงสร้างโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง

ในบทความวิจัยฉบับนี้ ได้ศึกษาโครงสร้างโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง ซึ่งเป็นโซ่อุปทาน 3 ระดับที่ประกอบด้วย ผู้ค้าปลีก (Retailer) 1 แห่ง ผู้ผลิตสินค้า (Supplier) 2 แห่ง และผู้ผลิตที่รับช่วงต่อ (Sub-supplier) 1 แห่ง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง

สัญลักษณ์ที่ใช้ในบทความวิจัยฉบับนี้

- j = หมายเลขที่ของผู้ผลิตสินค้า (ได้แก่ 1 และ 2)
- BW = บูลวิปเอฟเฟก (Bullwhip Effect)
- D_t = ความต้องการของลูกค้าในเวลา t
- F_t = ค่าพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าในเวลา t โดยผู้ค้าปลีก
- $P_{j,t}$ = ค่าพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าในเวลา t โดยผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ j

- Q_t = ปริมาณคำสั่งซื้อของผู้ค้าปลีกรวมทั้งหมดในช่วงเวลา t
- $q_{j,t}$ = ปริมาณคำสั่งซื้อของผู้ค้าปลีกที่ส่งให้ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ j ในช่วงเวลา t (ได้แก่ $q_{1,t}$ และ $q_{2,t}$)
- $o_{j,t}$ = ปริมาณคำสั่งซื้อของผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ j ที่ส่งให้ผู้ผลิตที่รับช่วงต่อ ในช่วงเวลา t (ได้แก่ $o_{1,t}$ และ $o_{2,t}$)
- O_t = ปริมาณคำสั่งซื้อทั้งหมดที่ผู้ผลิตที่รับช่วงต่อได้รับในช่วงเวลา t
- L_j = ระยะเวลา นำส่งสินค้าระหว่างผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ j ถึงผู้ค้าปลีก (ได้แก่ L_1 และ L_2)
- I_j = ระยะเวลา นำส่งสินค้าระหว่างผู้ผลิตที่รับช่วงต่อถึงผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ j (ได้แก่ I_1 และ I_2)
- S_t = ระดับสินค้าคงคลังสูงสุดที่ต้องการ ณ ช่วงเวลา t ที่ผู้ค้าปลีก
- $Y_{j,t}$ = ระดับสินค้าคงคลังสูงสุดที่ต้องการ ณ ช่วงเวลา t ที่ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ j
- z = ระดับการให้บริการ
- ε_t = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ช่วงเวลา t ของตัวแบบออเทรเกรสชัน โดยมีการแจกแจงแบบปกติด้วยพารามิเตอร์ค่ากลางเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ_ε^2 ซึ่งแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน
- σ_ε^2 = ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน
- σ_t^L = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความต้องการของลูกค้าที่พยากรณ์กับความต้องการของลูกค้าที่เกิดขึ้นจริงระหว่างระยะเวลานำส่งสินค้าที่ผู้ค้าปลีก
- σ_t^j = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความต้องการของลูกค้าที่พยากรณ์กับความต้องการของลูกค้าที่เกิดขึ้นจริงระหว่างระยะเวลานำส่งสินค้าที่ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ j
- δ = พารามิเตอร์คงที่ของตัวแบบออเทรเกรสชัน
- $\emptyset$ = พารามิเตอร์ของตัวแบบออเทรเกรสชัน

β = สัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีก
ที่ซึ่ง $0 \leq \beta \leq 1$

α = ค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล

2.2.รูปแบบความต้องการของลูกค้า

ความต้องการของลูกค้าที่ผู้ค้าปลีกต้องเผชิญถูกสมมติให้เป็นไปตามตัวแบบออทอเรียเกรสชันลำดับที่หนึ่ง (AR(1)) โดยมีสมการของตัวแบบ AR(1) ดังสมการที่ (1)

$$D_t = \delta + \phi D_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

อนึ่ง ความต้องการของลูกค้าแบบ AR(1) ถูกใช้อย่างแพร่หลาย สามารถพบได้ในงานวิจัยหลายฉบับ [1],[4-6]

ค่าพารามิเตอร์ออทอเรียเกรสชันที่แตกต่างกัน จะให้เกิดรูปแบบความต้องการของลูกค้าที่หลากหลาย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงถือว่า ได้พิจารณาความต้องการของลูกค้าที่หลากหลาย ภายใต้ความต้องการของลูกค้าแบบ AR(1)

2.3.เทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล

เทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียลเป็นการประมาณความต้องการของลูกค้าในปัจจุบัน โดยใช้ผลรวมของการถ่วงน้ำหนักข้อมูลความต้องการจริงของลูกค้าในช่วงเวลาก่อนหน้า และข้อมูลการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาก่อนหน้า มาเป็นข้อมูลการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าในปัจจุบัน โดยมีสมการการพยากรณ์ความต้องการแบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียลดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\text{ที่ผู้ค้าปลีก} \quad F_t = \alpha D_{t-1} + (1 - \alpha) F_{t-1} \quad (2)$$

$$\text{ที่ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ } j \quad P_{j,t} = \alpha d_{j,t-1} + (1 - \alpha) P_{j,t-1} \quad (3)$$

2.4.นโยบายสินค้าคงคลัง

จากงานวิจัยของ Hosoda และ Disney [9] กล่าวว่า นโยบายการสั่งซื้อที่เหมาะสมสามารถลดความแปรปรวนของระดับสินค้าคงคลัง ลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บสินค้าคงคลัง และสามารถลดค่าใช้จ่ายในกรณีที่ไม่มีสินค้าเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า นอกจากนี้ยังสามารถปรับความ

แปรปรวนของระดับสินค้าคงคลังให้ตรงกับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตลอดระยะเวลานำส่งสินค้า ในบทความวิจัยฉบับนี้ จึงกำหนดให้ทุกสมาชิกในโซ่อุปทานใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังแบบการสั่งซื้อที่เหมาะสม โดยมีสมการระดับสินค้าคงคลังสูงสุดที่ต้องการ ณ ช่วงเวลา t ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$\text{ที่ผู้ค้าปลีก} \quad S_t = L_j F_t + z \sigma_t^L \quad (4)$$

$$\text{ที่ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ } j \quad Y_{j,t} = L_j P_{j,t} + z \sigma_t^j \quad (5)$$

โดยปริมาณคำสั่งซื้อสินค้าสามารถหาได้จากสมการที่ (6) และ (7)

$$\text{ที่ผู้ค้าปลีก} \quad Q_t = S_t - S_{t-1} + D_{t-1} \quad (6)$$

$$\text{ที่ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ } j \quad o_{j,t} = Y_{j,t} - Y_{j,t-1} + q_{j,t-1} \quad (7)$$

2.5.กลไกการทำงานของระบบและการคำนวณหาค่าดัชนีบูลวิเปอฟเฟล

1) ผู้ค้าปลีกจะไม่ทราบความต้องการของลูกค้าเป็นแบบ (AR(1)) และในช่วงต้นเวลา t ใด ๆ ผู้ค้าปลีกจะไม่ทราบความต้องการของลูกค้า (D_t) ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลา t จนกว่าจะสิ้นสุดช่วงเวลานั้น ๆ

2) ผู้ค้าปลีกจึงต้องพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าโดยอาศัยความต้องการจริงของลูกค้าในอดีตที่ทราบแล้วมาพยากรณ์

3) ผู้ค้าปลีกจะคำนวณหาปริมาณคำสั่งซื้อรวมทั้งหมดด้วยนโยบายการสั่งซื้อที่เหมาะสม (ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลานำส่งสินค้า) และส่งคำสั่งซื้อสินค้าไปยังผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ 1 และแห่งที่ 2 ($q_{1,t}$ และ $q_{2,t}$ ตามลำดับ) เนื่องจากผู้ค้าปลีกสั่งซื้อสินค้าจากผู้ผลิตสินค้า 2 แห่ง จึงต้องมีการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้าให้แก่ผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง โดยใช้สัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีก สามารถหาปริมาณคำสั่งซื้อที่ผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง ได้รับ ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$\text{ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ 1} \quad q_{1,t} = \beta \times Q_t \quad (8)$$

$$\text{ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ 2} \quad q_{2,t} = (1 - \beta) \times Q_t \quad (9)$$

4) เมื่อผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ 1 และ 2 ได้รับคำสั่งซื้อสินค้าจากผู้ค้าปลีก ซึ่ง $q_{1,t}$ และ $q_{2,t}$ จะเป็นความต้องการของลูกค้าลำดับถัดมา แต่ในช่วงต้นเวลา t ใด ๆ ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ 1 และ 2 จะไม่ทราบความต้องการที่แท้จริงของผู้ค้าปลีก ($q_{1,t}$ และ $q_{2,t}$ ตามลำดับ)

5) ผู้ผลิตสินค้าแต่ละแห่งจึงต้องพยากรณ์ความต้องการของผู้ค้าปลีก

6) ผู้ผลิตสินค้าแต่ละแห่งจะกำหนดหาปริมาณคำสั่งซื้อสินค้าของตน นั่นคือ $o_{1,t}$ และ $o_{2,t}$ ส่งให้ผู้ผลิตที่รับช่วงต่อ

7) เมื่อปริมาณคำสั่งซื้อของผู้ผลิตสินค้าแต่ละแห่งถูกส่งมายังผู้ผลิตที่รับช่วงต่อ ทำให้ผู้ผลิตที่รับช่วงต่อทราบปริมาณคำสั่งซื้อรวมของผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง (O_t) ดังสมการที่ (10)

$$O_t = o_{1,t} + o_{2,t} \quad (10)$$

8) จากการเก็บข้อมูลนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดเวลา จะสามารถหาค่าดัชนีบูลวิปเฟลคของระบบได้จากอัตราส่วนความแปรปรวนของปริมาณคำสั่งซื้อรวมของผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง ต่อความแปรปรวนของความต้องการของลูกค้าเริ่มต้น ดังสมการที่ (11)

$$BW = \frac{\text{VAR}(O_t)}{\text{VAR}(D_t)} = \frac{\text{VAR}(o_{1,t} + o_{2,t})}{\text{VAR}(D_t)} \quad (11)$$

หมายเหตุ ถ้าค่า BW มากกว่า 1 จะถือว่าเกิดบูลวิปเฟลค

2.6.ขอบเขตของบทความวิจัยและคำอธิบายเพิ่มเติมที่สำคัญ

สำคัญ

1) ระยะเวลาจัดส่งสินค้า นั่นคือ L_j และ I_j จะเป็นจำนวนเต็มบวกและเป็นแบบดิเทอร์มินิสติก

2) ในการศึกษาบูลวิปเฟลคบนโซ่อุปทานจะไม่กำหนดให้ L_j และ I_j เท่ากับ 0 ซึ่งหมายความว่า ถ้าสั่งสินค้าจะได้รับทันที ดังนั้นบูลวิปเฟลคจึงไม่เกิดขึ้น

3) บทความวิจัยนี้กำหนดให้ $L_1 = L_2 = 1$ และ $I_1 = I_2 = 1$ เพื่อลดอิทธิพลที่มาจากระยะเวลานำส่งสินค้าระหว่างผู้ผลิตที่รับช่วงต่อถึงผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่งต่อค่าดัชนีบูล

วิปเฟลค นอกจากนี้ที่ยังเป็นการลดความซับซ้อนของระบบด้วย

4) สินค้าที่ถูกส่งไปจะมีการมาส่งที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลา $t + L_j$ หรือ $t + I_j$ และแต่ละสมาชิกในโซ่อุปทานจะทบทวนระดับสินค้าคงคลังที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลา t เพื่อนำไปสู่การออกคำสั่งซื้อ

5) กำหนดให้ทุกสมาชิกในโซ่อุปทานใช้ค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล (α) เท่ากันตลอดโซ่อุปทาน

6) ค่า β จะสนใจเฉพาะ $0 \leq \beta \leq 0.5$ เพราะระบบจะสมมาตรกับ $0.5 < \beta \leq 1$

7) พารามิเตอร์ของตัวแบบบอเทอริเกรสชัน (ϕ) มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 ($-1 \leq \phi \leq 1$) เพื่อให้ตัวแบบมีความเสถียร (Stationary Process)

3. การสร้างและการจำลองค่าดัชนีบูลวิปเฟลค

ก่อนการสร้างและการจำลองค่าดัชนีบูลวิปเฟลค มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบ ดังนี้

- จำนวนวันที่ศึกษาในแบบจำลอง (t) คือ 360 วัน ดังรูปที่ 2 คอลัมน์ A

- ระดับการให้บริการ (Service Level, z) คือ 96%

- พารามิเตอร์คงที่ของตัวแบบบอเทอริเกรสชัน (δ) ใช้ค่าที่ไม่ติดลบ ในที่นี้กำหนดให้ $\delta = 1120$

- ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (σ_e^2) คือ 1000 หมายเหตุ

1) จากงานวิจัยของ Luong [10] พบว่า ค่าพารามิเตอร์คงที่ของตัวแบบบอเทอริเกรสชัน (δ), ค่าระดับการให้บริการ (z) และค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (σ_e^2) ไม่มีผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเฟลค ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จึงไม่มีความจำเป็นที่จะศึกษาตัวแปรดังกล่าว

2) ความต้องการเริ่มต้น (D_0) ปรับตามค่าพารามิเตอร์บอเทอริเกรสชัน เพื่อให้ความต้องการจริงของลูกค้าที่จำลองขึ้นเข้าสู่สถานะที่เสถียรเร็วขึ้น

3.1.การสร้างและการจำลองโมเดลที่ผู้ค้าปลีก

การสร้างและการจำลองของผู้ค้าปลีก ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1) การสร้างรูปแบบความต้องการของลูกค้า ตามตัว
แบบ AR(1) ตามสมการที่ (1) ดังรูปที่ 2 คอลัมน์ B และ C

	A	B	C
1	0	0.4	
2	0	1120	
3	Variance error	1000	
4	Dt (t=0)	1850	
5	t (time)	Error (normal dist.)	Dt (Real demand by AR(1))
6	0		1850
7	1	-17.75240858	1842.247591
8	2	17.61222168	1874.511258
9	3	-78.13443128	1791.670072
10	4	34.49375916	1871.161788
11	5	9.721013051	1878.185728
12	6	74.5748117	1945.849103
13	7	23.40394438	1921.743586
14	8	54.00176482	1942.699199
15	9	27.90163061	1924.98131
16	10	30.6353471	1920.627871
...	...	...	...
360	354	4.358376373	1868.196564
361	355	10.29653409	1877.57516
362	356	-21.55510769	1849.474956
363	357	-64.85463065	1794.935352
364	358	25.6847145	1863.658855
365	359	-7.397803201	1858.065739
366	360	1.11396749	1864.340263

รูปที่ 2 การสร้างรูปแบบความต้องการของลูกค้าตามตัว
แบบ AR(1)

2) การพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าโดยผู้ค้าปลีก
ตามสมการที่ (2) ดังรูปที่ 3 คอลัมน์ D

	A	B	C	D
1	0	0.4	L (Lead time)	1
2	0	1120	z (Service level)	1.750686071
3	Variance error	1000	p (Period of moving average forecasting)	2
4	Dt (t=0)	1850		
5	t (time)	Error (normal dist.)	Dt (Real demand by AR(1))	Ft (Forecasting demand)
6	0		1850	
7	1	-17.75240858	1842.247591	
8	2	17.61222168	1874.511258	
9	3	-78.13443128	1791.670072	1858.379425
10	4	34.49375916	1871.161788	1833.090665
11	5	9.721013051	1878.185728	1831.41593
12	6	74.5748117	1945.849103	1874.673758
13	7	23.40394438	1921.743586	1912.017416
14	8	54.00176482	1942.699199	1933.796344
15	9	27.90163061	1924.98131	1932.221392
16	10	30.6353471	1920.627871	1933.840255
...	...	...	...	...
360	354	4.358376373	1868.196564	1855.350585
361	355	10.29653409	1877.57516	1863.896016
362	356	-21.55510769	1849.474956	1872.885862
363	357	-64.85463065	1794.935352	1863.525058
364	358	25.6847145	1863.658855	1822.205154
365	359	-7.397803201	1858.065739	1829.297104
366	360	1.11396749	1864.340263	1860.867297

รูปที่ 3 การคำนวณค่าพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า
แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล

3) การหาระดับสินค้าคงคลังสูงสุดที่ต้องการ (S_t) และ
การหาปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีก (Q_t) ตามสมการที่ (4)
และ (6) ดังรูปที่ 4 คอลัมน์ F และ G ตามลำดับ

4) การแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้าให้กับผู้ผลิตสินค้าทั้ง
2 แห่งโดยผู้ค้าปลีก ($q_{1,t}$ และ $q_{2,t}$) ตามสมการที่ (8) และ (9)
ดังรูปที่ 4 คอลัมน์ H และ I ตามลำดับ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0	0.4	L1 = L2	1	z	1.750686071			
2	0	1120	L1 = L2	1	Standard deviation of error	31.32114937			
3	Variance error	1000	α	0.2	β	0.3			
4	Dt (t=0)	1850	1- α	0.8	1- β	0.7			
5									
6	t (time)	Error	Dt	Ft	Error of forecasting	St	Qt	q1,t	q2,t
7	0		1850						
8	1	-17.75240858	1842.247591	1842.247591	0	1897.081091			
9	2	17.61222168	1874.511258	1842.247591	-32.26366683	1897.081091	1842.247591	552.6742774	1289.573314
10	3	-78.13443128	1791.670072	1848.700325	57.03025277	1903.533825	1880.963992	564.2891975	1316.674794
11	4	34.49375916	1871.161788	1837.294274	-33.86751373	1892.127774	1780.264021	534.0792064	1246.184815
12	5	9.721013051	1878.185728	1844.067777	-34.11795125	1898.901277	1877.935291	563.3805872	1314.554703
13	6	74.5748117	1945.849103	1850.891367	-94.95773576	1905.724867	1885.009318	565.5027955	1319.506523
14	7	23.40394438	1921.743586	1869.882914	-51.8606712	1924.716414	1964.84065	589.452195	1375.388455
15	8	54.00176482	1942.699199	1880.255049	-62.44415043	1935.088549	1932.11572	579.6347159	1352.481004
16	9	27.90163061	1924.98131	1892.743879	-32.23743152	1947.577379	1955.188029	586.5564087	1368.63162
17	10	30.6353471	1920.627871	1899.191365	-21.43650617	1954.024865	1931.428797	579.428639	1352.000158
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
362	355	10.29653409	1877.57516	1861.27721	-16.2979494	1916.11071	1869.926402	560.9779207	1308.948482
363	356	-21.55510769	1849.474956	1864.5368	15.06184394	1919.3703	1880.834749	564.2504248	1316.584325
364	357	-64.85463065	1794.935352	1861.524431	66.5890795	1916.357931	1846.462587	553.9387762	1292.523811
365	358	25.6847145	1863.658855	1848.206615	-15.45223982	1903.040115	1781.617536	534.4852608	1247.132275
366	359	-7.397803201	1858.065739	1851.297063	-6.768675515	1906.130563	1866.749303	560.024791	1306.724512
367	360	1.11396749	1864.340263	1852.650798	-11.68946457	1907.484298	1859.419474	557.8258422	1301.593632

รูปที่ 4 ข้อมูลจากการจำลองโมเดลที่ผู้ค้าปลีก

3.2.การสร้างและการจำลองโมเดลที่ผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง
ขั้นตอนการสร้างและการจำลองของผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2
แห่ง ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1) การพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าโดยผู้ผลิต
สินค้าแต่ละแห่ง ตามสมการที่ (3) ดังรูปที่ 5 คอลัมน์ K
และ P

2) การหาระดับสินค้าคงคลังสูงสุดที่ต้องการ ($Y_{j,t}$) และการหาปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ผลิตสินค้าแต่ละแห่ง ($o_{j,t}$) ตามสมการที่ (5) และ (7) ดังรูปที่ 5 คอลัมน์ M, R และ N, S ตามลำดับ

3.3.การสร้างและการจำลองค่าบูลิโอฟเฟลของระบบ

ขั้นตอนการสร้างและการจำลองค่าดัชนีบูลิโอฟเฟลของระบบ ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1) เมื่อผู้ผลิตที่รับช่วงต่อได้รับคำสั่งซื้อจากผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง ($o_{1,t}$ และ $o_{2,t}$) ทำให้ผู้ผลิตที่รับช่วงต่อทราบปริมาณคำสั่งซื้อรวมของผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง (O_t) ดังรูปที่ 5 คอลัมน์ T

2) ปริมาณคำสั่งซื้อรวมของผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง ในดัง

รูปที่ 5 คอลัมน์ T สามารถคำนวณหาความแปรปรวนของปริมาณคำสั่งซื้อทั้งหมดจากผู้ผลิตที่รับช่วงต่อได้ ดังรูปที่ 5 เซลล์ที่ U2

3) ที่ปลายสุดของโซ่อุปทาน ความต้องการของลูกค้า (D_t) ถูกจำลองขึ้นเป็นไปตามตัวแบบ AR(1) ดังรูปที่ 2 คอลัมน์ C ซึ่งคอลัมน์ดังกล่าวจะสามารถคำนวณหาความแปรปรวนของความต้องการของลูกค้าได้ ดังรูปที่ 5 เซลล์ที่ U1

4) เมื่อนำความแปรปรวนของปริมาณคำสั่งซื้อ ($VAR(O_t)$) หารด้วยความแปรปรวนของความต้องการของลูกค้า ($VAR(D_t)$) ดังสมการที่ (11) จะได้ค่าดัชนีบูลิโอฟเฟลของระบบการสั่งซื้อสินค้าจากผู้ผลิตสองแหล่ง ดังรูปที่ 5 เซลล์ที่ U3

	A	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1												VAR(Ot)	1971.08
2				Standard deviation of error	35.69648094				Standard deviation of error	26.37851977		VAR(Dt)	1002.06
3												BW	1.96703
4													
5													
6	t (time)	d1,t	P1,t	Supplier 1 Error forecast	Y1,t	o1,t	d2,t	P2,t	Supplier 2 Error of forecast	Y2,t	o2,t	Sub-supplier Ot	
7	0												
8	1												
9	2	552.6742774	552.6742774	0	615.1676094		1289.573314	1289.573314	0	1335.753821			
10	3	564.2891975	552.6742774	-9.291936047	615.1676094	552.6742774	1316.674794	1289.573314	-27.10148014	1335.753821	1289.573314	1842.247591	
11	4	534.0792064	554.9972614	16.734444	617.4905934	566.6121815	1246.184815	1294.99361	48.80879499	1341.174117	1322.09509	1888.707272	
12	5	563.3805872	550.8136504	-10.05354942	613.3069824	529.8955954	1314.554703	1285.231851	-29.32285247	1331.412358	1236.423056	1766.318651	
13	6	565.5027955	553.3270378	-9.740606202	615.8203698	565.8939746	1319.506523	1291.096422	-28.41010142	1337.276929	1320.419274	1886.313249	
14	7	589.452195	555.7621893	-26.95200456	618.2555213	567.9379471	1375.388455	1296.778442	-78.6100133	1342.958949	1325.188543	1893.12649	
15	8	579.6347159	562.5001905	-13.70762037	624.9935225	596.1901962	1352.481004	1312.500444	-39.98055941	1358.680952	1391.110458	1987.300654	
16	9	586.5564087	565.9270956	-16.50345053	628.4204276	583.061621	1368.63162	1320.496556	-48.13506405	1366.677063	1360.477116	1943.538737	
17	10	579.428639	570.0529582	-7.5005446	632.5462902	590.6822714	1352.000158	1330.123569	-21.87658842	1376.304076	1378.258633	1968.940905	
-													
-													
-													
362	355	560.9779207	557.4936015	-2.787455299	619.9869335	557.9794094	1308.948482	1300.818404	-8.130077955	1346.998911	1301.951955	1859.931365	
363	356	564.2504288	558.1904654	-4.847967584	620.6837973	561.6747845	1316.584325	1302.444419	-14.13990545	1348.624926	1310.574497	1872.249282	
364	357	553.9387762	559.4024573	4.370944844	621.8957892	565.4624167	1292.523811	1305.2724	12.74858913	1351.452907	1319.412306	1884.874722	
365	358	534.4852608	558.3097211	19.05956822	620.803053	552.84604	1247.132275	1302.722682	55.59040732	1348.90319	1289.974093	1842.820133	
366	359	560.024791	553.544829	-5.183969568	616.038161	529.7203687	1306.724512	1291.604601	-15.11991124	1337.785108	1236.014194	1765.734562	
367	360	557.8258422	554.8408214	-557.8258422	617.3341534	561.3207833	1301.593632	1294.628583	-6.965048552	1340.80909	1309.748494	1871.069278	

รูปที่ 5 ข้อมูลจากการจำลองโมเดลที่ผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง และค่าบูลิโอฟเฟลของระบบ

4. ผลการวิจัย

4.1.ผลกระทบของเทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็ก

โปเนนเชียลต่อค่าดัชนีบูลิโอฟเฟล

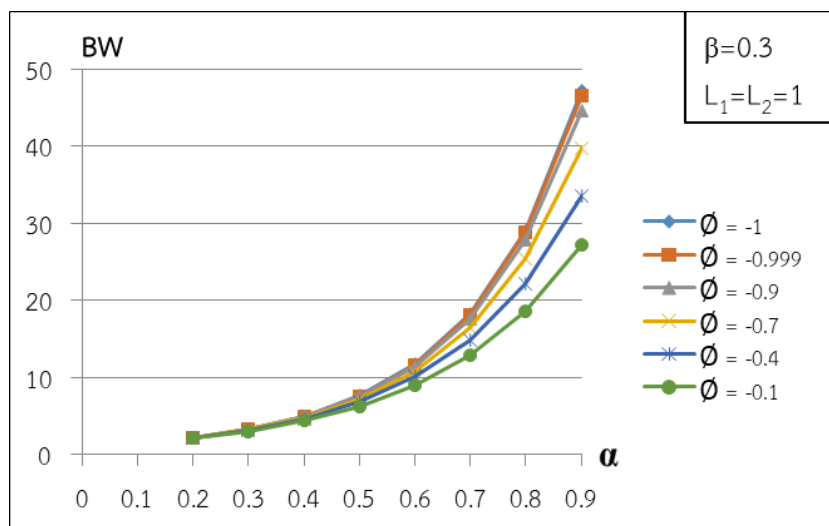
ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีบูลิโอฟเฟล คือ ค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล โดยมีผลกระทบต่อค่าดัชนีบูลิโอฟเฟล แสดงดังตารางที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

บูลิโอฟเฟลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียลเพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มเช่นนี้เกิดขึ้นสำหรับทุกค่าพารามิเตอร์ออเทอรีเกรสชันที่อยู่

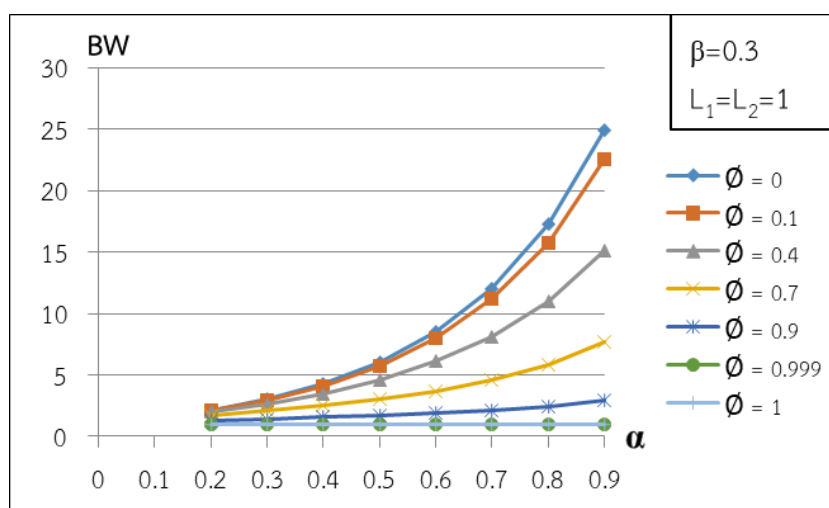
ในช่วง -1 ถึง 1 และสำหรับทุก ๆ ค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล ที่ค่าพารามิเตอร์ออเทอรีเกรสชันเท่ากับ 1 บูลิโอฟเฟลไม่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 6 และ 7

4.2.ผลกระทบของพารามิเตอร์ออเทอรีเกรสชันต่อค่าดัชนีบูลิโอฟเฟล

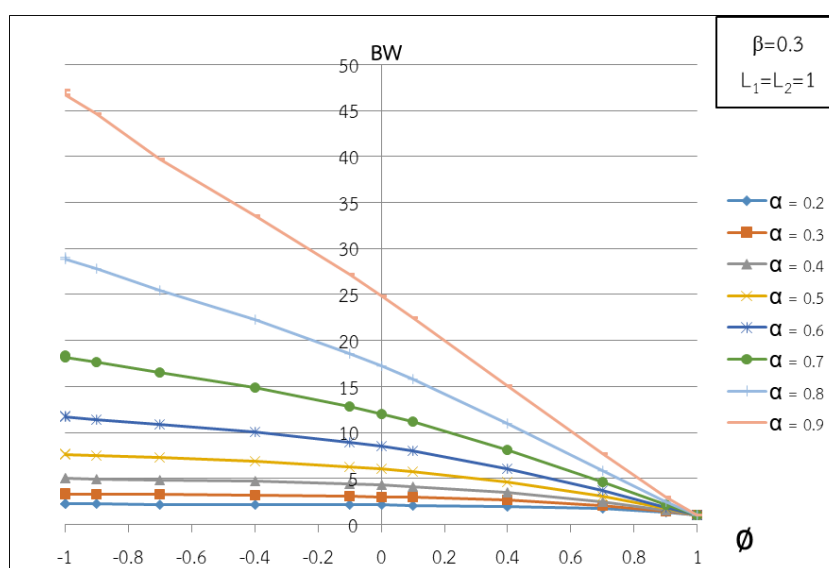
ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ออเทอรีเกรสชันต่อค่าดัชนีบูลิโอฟเฟล เมื่อสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีกเท่ากัน แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า บูลิโอฟเฟลมีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าพารามิเตอร์ออเทอรีเกรสชันเพิ่มขึ้นจาก -1 ถึง 1 ดังรูปที่ 8



รูปที่ 6 ผลกระทบของค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟลค เมื่อ $\phi < 0$



รูปที่ 7 ผลกระทบของค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟลค เมื่อ $\phi \geq 0$

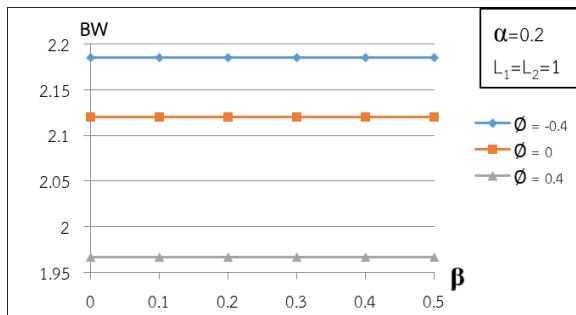


รูปที่ 8 ผลกระทบของพารามิเตอร์อเทอริเกรสชันต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟลค เมื่อ $0 < \alpha < 1$

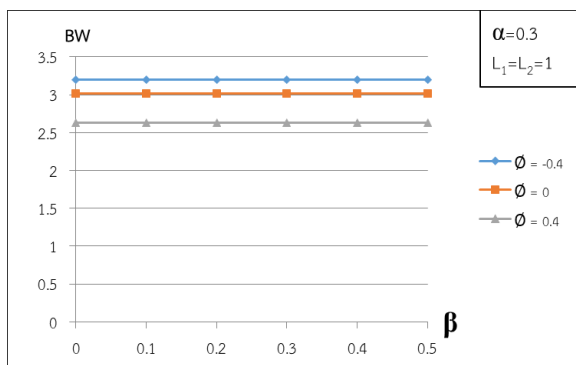
4.3.ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อต่อค่า

ดัชนีมูลวิเปเฟล

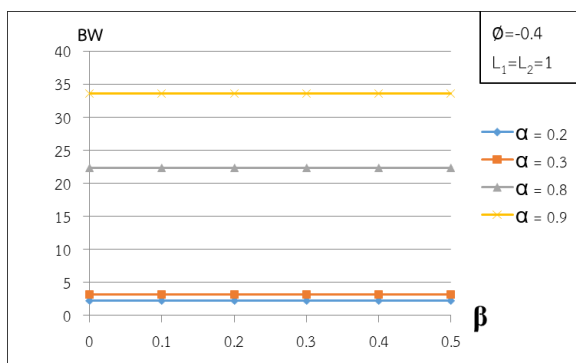
ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีกต่อค่าดัชนีมูลวิเปเฟล แสดงดังตารางที่ 3 เมื่อสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อเปลี่ยนแปลง ค่าดัชนีมูลวิเปเฟลของที่ ดังรูปที่ 9-13



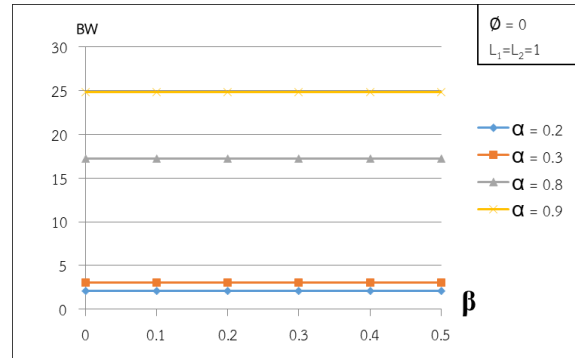
รูปที่ 9 ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้า เมื่อ $\delta = -0.4, 0, 0.4$ และ $\alpha = 0.2$



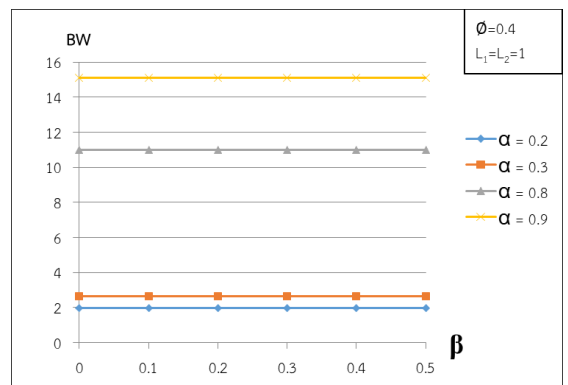
รูปที่ 10 ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้า เมื่อ $\delta = -0.4, 0, 0.4$ และ $\alpha = 0.3$



รูปที่ 11 ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้า เมื่อ $\delta = -0.4$ และ $\alpha = 0.2, 0.3, 0.8, 0.9$



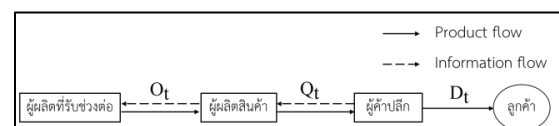
รูปที่ 12 ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้า เมื่อ $\delta = 0$ และ $\alpha = 0.2, 0.3, 0.8, 0.9$



รูปที่ 13 ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้า เมื่อ $\delta = 0.4$ และ $\alpha = 0.2, 0.3, 0.8, 0.9$

4.4 การขึ้นเป็นนัยระหว่างการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง และการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง

หากพิจารณาสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีก (β) ที่มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 พบว่าจะทำให้ปริมาณการสั่งซื้อสินค้าของผู้ผลิตสินค้าแห่งใดแห่งหนึ่งเท่ากับ 0 หรือเป็นการสั่งซื้อสินค้าจากผู้ผลิตสินค้าเพียงแห่งเดียว จึงทำให้โซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง ดังรูปที่ 1 เทียบเท่าโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง ดังรูปที่ 14 ซึ่งโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง ประกอบด้วยผู้ค้าปลีก (Retailer) 1 แห่ง ผู้ผลิตสินค้า (Supplier) 1 แห่ง และผู้ผลิตที่รับช่วงต่อ (Sub-supplier) 1 แห่ง



รูปที่ 14 โครงสร้างโซ่อุปทานการสั่งซื้อจากหนึ่งแหล่ง

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีมูลวิเปเฟลของค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียลค่าต่าง ๆ

α	BW												
	$\varnothing = -1$	$\varnothing = -0.999$	$\varnothing = -0.9$	$\varnothing = -0.7$	$\varnothing = -0.4$	$\varnothing = -0.1$	$\varnothing = 0$	$\varnothing = 0.1$	$\varnothing = 0.4$	$\varnothing = 0.7$	$\varnothing = 0.9$	$\varnothing = 0.999$	$\varnothing = 1$
0.2	2.2225	2.2055	2.1997	2.1927	2.1851	2.1433	2.1205	2.0928	1.9670	1.7129	1.3263	1.0000	1.0000
0.3	3.3329	3.3067	3.2892	3.2532	3.1985	3.0734	3.0121	2.9391	2.6273	2.0816	1.4337	1.0000	1.0000
0.4	5.0276	4.9867	4.9425	4.8388	4.6784	4.3889	4.2553	4.1002	3.4741	2.5056	1.5494	1.0000	1.0000
0.5	7.6469	7.5816	7.4808	7.2314	6.8549	6.2633	6.0041	5.7103	4.5878	3.0288	1.6907	1.0000	1.0000
0.6	11.7581	11.6520	11.4334	10.8822	10.0828	8.9563	8.4867	7.9669	6.0845	3.7061	1.8746	1.0000	1.0000
0.7	18.3337	18.1572	17.6984	16.5304	14.9193	12.8639	12.0485	11.1676	8.1366	4.6140	2.1231	1.0000	1.0000
0.8	29.0931	28.7918	27.8390	25.4183	22.2604	18.6046	17.2256	15.7715	11.0080	5.8665	2.4682	1.0000	1.0000
0.9	47.1921	46.6622	44.6845	39.6989	33.5836	27.1690	24.8722	22.5075	15.1148	7.6414	2.9598	1.0000	1.0000

ตารางที่ 2 ค่าดัชนีมูลวิปลาทวิคูณของพารามิเตอร์ของตัวแบบอเทอริเกรสชันค่าต่าง ๆ

[illegible]

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีบูลิปีเอฟเฟคของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อสินค้าโดยผู้ค้าปลีกค่าต่าง ๆ

β	BW											
	$\alpha = 0.2$			$\alpha = 0.3$			$\alpha = 0.8$			$\alpha = 0.9$		
	$\phi = -0.4$	$\phi = 0$	$\phi = 0.4$	$\phi = -0.4$	$\phi = 0$	$\phi = 0.4$	$\phi = -0.4$	$\phi = 0$	$\phi = 0.4$	$\phi = -0.4$	$\phi = 0$	$\phi = 0.4$
0	2.1851	2.1205	1.9670	3.1985	3.0121	2.6273	22.2604	17.2256	11.0080	33.5836	24.8722	15.1148
0.1	2.1851	2.1205	1.9670	3.1985	3.0121	2.6273	22.2604	17.2256	11.0080	33.5836	24.8722	15.1148
0.2	2.1851	2.1205	1.9670	3.1985	3.0121	2.6273	22.2604	17.2256	11.0080	33.5836	24.8722	15.1148
0.3	2.1851	2.1205	1.9670	3.1985	3.0121	2.6273	22.2604	17.2256	11.0080	33.5836	24.8722	15.1148
0.4	2.1851	2.1205	1.9670	3.1985	3.0121	2.6273	22.2604	17.2256	11.0080	33.5836	24.8722	15.1148
0.5	2.1851	2.1205	1.9670	3.1985	3.0121	2.6273	22.2604	17.2256	11.0080	33.5836	24.8722	15.1148

และจากข้อสรุปที่ว่า สัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อโดยผู้ค้าปลีกไม่มีผลต่อค่าดัชนีบูลิปีเอฟเฟคของระบบการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง ที่ระยะเวลานำส่งสินค้า

ระหว่างผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่งถึงผู้ค้าปลีกมีค่าเท่ากัน ดังนั้นโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่งจึงเทียบเท่ากับโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีบูลิปีเอฟเฟคภายใต้การสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง และหนึ่งแหล่ง

α	BW of Dual Sourcing			BW of Single Sourcing		
	$\phi = -0.4$	$\phi = 0$	$\phi = 0.4$	$\phi = -0.4$	$\phi = 0$	$\phi = 0.4$
0.2	2.1851	2.1205	1.9670	2.1851	2.1205	1.9670
0.3	3.1985	3.0121	2.6273	3.1985	3.0121	2.6273
0.4	4.6784	4.2553	3.4741	4.6784	4.2553	3.4741
0.5	6.8550	6.0041	4.5878	6.8550	6.0041	4.5878
0.6	10.0828	8.4867	6.0845	10.0828	8.4867	6.0845
0.7	14.9193	12.0486	8.1366	14.9193	12.0486	8.1366
0.8	22.2604	17.2257	11.0080	22.2604	17.2257	11.0080
0.9	33.5836	24.8722	15.1148	33.5836	24.8722	15.1148

5. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของบูลิปีเอฟเฟคภายใต้การสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่งในโซ่อุปทาน โดยทุกสมาชิกใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล และใช้นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังแบบสั่งซื้อที่

เหมาะสม และความต้องการของลูกค้าที่ผู้ค้าปลีกต้องเผชิญ ถูกสมมติให้เป็นไปตามตัวแบบออเทอริเกรสชันอันดับที่หนึ่ง (AR(1)) โดยขอบเขตที่สำคัญของบทความวิจัยนี้กำหนดให้ระยะเวลานำส่งสินค้าจากผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่งถึงผู้ค้าปลีกมีค่าเท่ากัน และเท่ากับ 1 ($L_1 = L_2 = 1$) สามารถ

สรุปในเบื้องต้นได้ว่า โซ่อุปทานดังกล่าวไม่สามารถหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์บูลวิปเอฟเฟกได้ ยกเว้นในกรณีที่ $\theta = 1$ นอกจากนี้ยังมีผลที่น่าสนใจดังนี้

1) ค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล เป็นปัจจัยของเทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียลที่มีผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟก ยิ่งค่าคงที่การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียลมากขึ้น การเกิดบูลวิปเอฟเฟกยิ่งมากขึ้น

2) ค่าพารามิเตอร์ออเทอริเทรชันมีผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟก โดยยิ่งค่าพารามิเตอร์ออเทอริเทรชันเข้าใกล้ 1 การเกิดบูลวิปเอฟเฟกยิ่งน้อยลง

3) สัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อ (β) ไม่มีผลต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกในโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง โดยมีระยะเวลานำส่งสินค้าจากผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่ง ถึงผู้ค้าปลีกมีค่าเท่ากัน

4) โมเดลโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่ง (โดยที่ผู้ผลิตสินค้าแห่งที่ 1 และ 2 มีการพยากรณ์ความต้องการสินค้ารวม 2 แห่งซึ่งมีการจัดเก็บสินค้าทั้ง 2 แห่ง) ให้ค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกเท่ากับโมเดลโซ่อุปทานการสั่งซื้อสินค้าจากหนึ่งแหล่ง (โดยมีผู้ผลิตสินค้ารายเดียว ทำการพยากรณ์ความต้องการสินค้าและจัดเก็บสินค้าทีเดียว)

ในบทความวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟก เมื่อกำหนดให้ระยะเวลานำส่งสินค้าจากผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 แห่งถึงผู้ค้าปลีกมีค่าเท่ากัน และเท่ากับ 1 และใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล แต่ไม่ได้ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งปริมาณคำสั่งซื้อต่อค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟก เมื่อระยะเวลานำส่งสินค้าจากผู้ผลิตสินค้าทั้ง 2 ถึงผู้ค้าปลีกที่มีค่าไม่เท่ากันและใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบอื่น ๆ ซึ่งอาจจะได้ข้อสรุปที่แตกต่างจากบทความวิจัยนี้

แม้ว่าความต้องการของลูกค้าในงานวิจัยฉบับนี้จะไม่ใช่ข้อมูลที่แท้จริง แต่ก็จัดว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการทำวิจัยในการศึกษาค่าดัชนีบูลวิปเอฟเฟกภายใต้การสั่งซื้อสินค้าจากสองแหล่งในโซ่อุปทาน ซึ่งในอนาคตสามารถต่อยอดไปใช้ความต้องการลูกค้าที่แท้จริงได้โดยไม่ยาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. C. Alwan, J. J. Liu and D. Q. Yao, "Stochastic characterization of upstream demand process in a supply chain," *IIE Transaction*, vol. 35, pp. 207–219, 2003.
- [2] H. Lee, V. Padmanabhan and S. Whang, "Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect," *Management Science*, vol. 43, no. 4, pp. 546–558, 1997, doi: 10.1287/mnsc.43.4.546.
- [3] H. Lee, V. Padmanabhan and S. Whang, "The bullwhip effect in supply chains", *Sloan Management Review*, vol. 38, no. 3, pp. 93–102, 1997.
- [4] F. Chen, J. K. Ryan and D. Simchi-Levi, "The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect," *Naval Research Logistics*, vol. 47, no. 4, pp.269–286, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1520-6750(200006)47:4<269::AID-NAV1>3.0.CO;2-Q.
- [5] X. Zhang, "The impact of forecasting methods on the bullwhip effect," *International Journal of Production Economics*, vol. 88, no. 1, pp.15–27, 2004, doi: 10.1016/S0925-5273(03)00128-2.
- [6] J. L. Wang, J. H. Kuo, S. Chou and S. Z. Wang, "A comparison of bullwhip effect in a single-stage supply chain for autocorrelated demands when using Correct, MA, and EWMA methods," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp.4726–4736, 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2009.09.071.
- [7] L. Hong, and W. Ping, "Bullwhip effect analysis in supply chain for demand forecasting technology," *Systems Engineering – Theory & Practice*, vol.27, no. 7, pp.26–33, 2007, doi: 10.1016/S1874-8651(08)60044-7.
- [8] K. Sirikasemsuk and H.T. Luong, "Measure of bullwhip effect – a dual sourcing model", *International Journal of Operational Research*, vol. 20, no. 4, pp. 396–426, 2014, doi: . 10.1504/IJOR. 2014.063149

-
- [9] T. Hosoda and S.M. Disney, "The role of an ordering policy as an inventory and cost controller," in *Logistics Research Network Annual Conference*, Dublin, Ireland, September 8–10, 2004.
- [10] H.T. Luong, "Measure of bullwhip effect in supply chain with autoregressive demand process", *European Journal of Operational Research*, vol. 180, no. 3, pp. 1086–1097, 2007, 10.1016/j.ejor.2006.02.050.

การออกแบบเชิงหลักการและการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

Conceptual Design and Aerodynamic Analysis of Tail-Sitter VTOL UAV

นภดล ปุ่นประเสริฐ¹ และ วันชัย เกียจันทร^{1,*}

¹ สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช สายไหม สายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

Noppadon Punprasert¹ and Wanchai Jiajan^{1,*}

Graduate School Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force, Saimai, Saimai, Bangkok, 10220, Thailand

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

Received: MMM DD, YEAR; **Revised:** MMM DD, YEAR; **Accepted:** MMM DD, YEAR

บทคัดย่อ

อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง (Tail-Sitter VTOL UAV) เป็นหนึ่งในนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับที่มีแนวโน้มได้รับความนิยมสูงในการพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการกิจที่หลากหลายรูปแบบ ทั้งนี้เนื่องจากมีขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาสะดวก และระบบไม่ซับซ้อน ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งสมรรถนะด้านระยะเวลาการบินปฏิบัติการที่เหมาะสม แต่การพัฒนาอากาศยานไร้คนขับประเภทนี้ให้ตอบโจทย์ภารกิจ มีความยากและท้าทาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งความซับซ้อนด้านการออกแบบ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกระบวนการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง ที่มีความง่าย ไม่ซับซ้อน และมีวิธีการแบบตรง ๆ ในระเบียบวิธีการออกแบบเชิงหลักการอย่างเป็นขั้นตอน รวมถึงการสร้างกราฟขอบเขตสมรรถนะอากาศยานสำหรับเลือกจุดที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง มากไปกว่านั้น ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์โดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เข้ากับระเบียบวิธีการออกแบบเชิงหลักการ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการประมาณค่าเริ่มต้นอากาศพลศาสตร์ และสมรรถนะของอากาศยานไร้คนขับ เพื่อยืนยันความเชื่อถือได้ของผลลัพธ์กระบวนการออกแบบ ซึ่งผลลัพธ์จากระเบียบวิธีการออกแบบเชิงหลักการแสดงให้เห็นถึงความง่ายและความรวดเร็วในการเลือกจุดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำหนดขนาดรูปร่างอากาศยานไร้คนขับ และกำลังขับของระบบขับเคลื่อนอากาศยาน โดยปราศจากความซับซ้อนของกระบวนการออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการหาจุดที่เหมาะสมโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง, การออกแบบเชิงหลักการ, อากาศพลศาสตร์, โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

Abstract

Tail-Sitter VTOL unmanned aerial vehicle (Tail-Sitter VTOL UAV) is one of the most popular UAV novel technology for various missions. Compact size, light weight, user-friendly, and reasonable flight endurance of this configuration are the main reasons for many applications. However, design methodology to meet the mission's requirements for this type of UAV is the most difficult and challenge, especially complexities of the design processes. The purpose of this paper is to develop a conceptual design process for Tail-Sitter VTOL UAV. This methodology is simple and straightforward methodology to generate a design procedures and performance constraint diagram for selecting the

critical performance parameters for Tail-sitter VTOL UAV systems. Moreover, to ensure the design methodology, computational fluid dynamics (CFD) is also integrated into design processes to analyze the aerodynamics of layout design. It also allows the designer to verify initial aerodynamic estimations and performance analysis. As a result, this methodology provides rapid selection of the optimum preliminary sizing parameters without the complexities compared with the traditional numerical optimization methods.

Keywords: Tail-Sitter VTOL UAV, Conceptual Design, Aerodynamics, Computational Fluid Dynamic

ศัพท์เฉพาะ

A	= พื้นที่หมุนใบพัด, m^2
AR	= อัตราส่วนระหว่างกลางปีกขยาเฉลี่ย
C_d	= สัมประสิทธิ์แรงต้านปีกเฉลี่ย
C_{dB}	= สัมประสิทธิ์แรงต้านใบพัดเฉลี่ย
D_{Do}	= สัมประสิทธิ์แรงต้านคัตตัว
e	= ประสิทธิภาพการกระจายแรงบนปีก
K	= $1/\pi e AR$
k_i	= ค่าตัวประกอบพลังงานเหนียว
S	= พื้นที่ปีก, m^2
V, V_∞	= ความเร็วการบินแนวระดับ, m/s
V_s	= ความเร็วร่วงหล่น, m/s
V_y	= ความเร็วที่ใช้ในการไต่ระดับ, m/s
$V_{y,c}$	= ความเร็วการไต่ในระดับกำหนด, m/s
V_i	= ความเร็วเหนียวใบพัด, m/s
V_{tip}	= ความเร็วปลายปีกใบพัด, m/s
W	= น้ำหนักอากาศยาน, N
W_{Empty}	= น้ำหนักเปล่าอากาศยาน, N
W_{TO}	= น้ำหนักรวมบรรทุกขึ้นอากาศยาน, N
η_p	= ประสิทธิภาพใบพัด
η_m	= ประสิทธิภาพมอเตอร์
ρ_o	= ความหนาแน่นอากาศที่ความสูงระดับน้ำทะเล, kg/m^3
ρ_c	= ความหนาแน่นอากาศที่ระดับความสูงการบินลอยตัว, kg/m^3
σ	= อัตราส่วนความแข็งใบพัด
σ_{air}	= ความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์
μ	= $V_\infty \cos(\alpha) / V_{tip}$
θ_{tilt}	= มุมเปลี่ยนท่าทางการบิน
α	= มุมที่กระแสอากาศกระทำต่อจานใบพัด

P = ความดันที่อากาศยาน

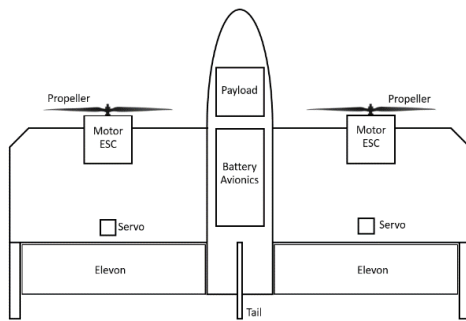
P_{atm} = ความดันบรรยากาศรอบข้าง

1. บทนำ

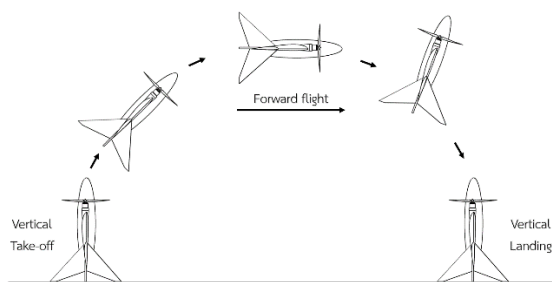
ปัจจุบัน อากาศยานไร้คนขับเป็นนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ยุทธศาสตร์ชาติด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศซึ่งนอกเหนือจากการใช้งานในภารกิจด้านความมั่นคงแล้ว ยังเป็นเทคโนโลยีนำร่องในด้าน Dual-Use Technology ที่นำไปใช้งานในด้านการพลเรือน ทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาในระดับชาติได้ เช่น การบินลาดตระเวนทางอากาศเชิงรุกเพื่อการป้องกันการบุกรุกเขตป่าสงวน การสำรวจทรัพยากรธรรมชาติและสัตว์ป่าและการบินลาดตระเวนเฝ้าตรวจแจ้งเตือนปัญหาไฟป่าและหมอกควัน เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก ซึ่งใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยชุดมอเตอร์ไฟฟ้าและใบพัดโดยอาศัยแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลัก อากาศยานไร้คนขับประเภทนี้มีจุดแข็งในด้านความคล่องตัวในการปฏิบัติการกิจ ใช้งานง่าย มีข้อดีด้านความเงียบในการปฏิบัติการกิจ รวมไปถึงมีมูลค่าในการซ่อมแซมบำรุงต่ำ ซึ่งปัจจุบัน นวัตกรรมด้านอากาศยานไร้คนขับพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มขีดความสามารถ และตอบสนองกับภารกิจด้านต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น

อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กขึ้น-ลงทางตั้ง (Vertical Take-Off and Landing, VTOL) เป็นหนึ่งในนวัตกรรมด้านเทคโนโลยี อากาศยานไร้คนขับที่ถูกพัฒนาขึ้นให้มีขีดความสามารถในการปฏิบัติการกิจขึ้น-ลงในพื้นที่จำกัด เช่น พื้นที่ในเขตป่าสงวน อุทยานแห่งชาติ แนวตะเข็บชายแดน เป็นต้น รวมถึงพื้นที่ที่ไม่มีสนามบินในการใช้วิ่งขึ้นและลงจอด เมื่อพิจารณาารูปแบบของอากาศยานไร้คนขับประเภทนี้

อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง หรือ Tail-Sitter VTOL UAV (ดังรูปที่ 1) มีแนวโน้มได้รับความนิยมสูงในการพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในภารกิจที่หลากหลายรูปแบบ ทั้งนี้เนื่องจากมีขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาสะดวก และระบบไม่ซับซ้อน ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งสมรรถนะด้านระยะเวลาการบินปฏิบัติการที่ เหมาะสมซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นโดยตรงจากการออกแบบรูปทรงอากาศยานไร้คนขับที่มีลักษณะ เหมือนการออกแบบอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึงโดยทั่วไป แต่มีความแตกต่างกันตรงลักษณะการบินในช่วง เปลี่ยนผ่านจากท่าทางการบินขึ้นลงในลักษณะแนวดิ่ง (Vertical Flight) แล้วค่อยเปลี่ยนเป็นการบินแบบแนวนอน (Horizontal Flight) หรือการบินตรงระดับในท้ายที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง



รูปที่ 2 รูปแบบท่าทางการบินของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง

จากท่าทางการบินของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กขึ้น-ลงทางดิ่งแบบหางตั้งในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการผสมผสานถึงจุดแข็งของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนในการขึ้น-ลงทางดิ่ง และจุดแข็งด้านสมรรถนะการบิน

ทนทาน (Endurance) ของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึงได้อย่างลงตัว อย่างไรก็ตามการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับประเภทนี้ให้ตอบโจทย์ภารกิจ มีความยากและท้าทาย ทั้งในแง่ของการออกแบบอากาศยานไร้คนขับ ที่มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ รวมถึงการใช้เวลาในการออกแบบที่มีความเหมาะสม ลดความซับซ้อนในการออกแบบ นอกจากนี้ความเข้าใจในหลักอากาศพลศาสตร์ที่ซับซ้อนในช่วงการบินเปลี่ยนผ่านหรือ Transition Flight เป็นกุญแจสำคัญเพื่อประกอบการพิจารณาในการออกแบบ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง [1-5] พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากได้แสดงผลงานวิจัยและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับประเภทนี้ในหลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่าง เช่น อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่ง Martial Tailsitter ที่พัฒนาโดย University of Surrey[1] อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่ง T-wing [2] และ Bidule [3] พัฒนาโดย University of Sydney ITU-Tailsitter จาก Istanbul Technical University [4] และ ATOMS Tailsitter ที่พัฒนาจาก Delft University of Technology [5] แต่อย่างไรก็ตาม ในบรรดา งานวิจัยที่กล่าวมานี้ มีเพียง อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่ง Martial Tailsitter [1] T-wing [2] และ ITU-Tailsitter [4] ที่มีการเสนอถึงที่มาของกระบวนการออกแบบเชิงหลักการ และมีแหล่งข้อมูลอ้างอิงที่เปิดเผย นอกจากนี้ ในแง่ของการบินและการควบคุมอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทนี้ Dizhou 2012 [6] ได้เสนอวิธีการปรับพื้นบังคับ (Control Surface) เพื่อใช้ในการเปลี่ยนท่าทางการบินจากแนวดิ่งเป็นแนวระดับ หรือช่วง Transition Flight เพื่อลดโอกาสการขับเคลื่อนการเปลี่ยนท่าทางการบินจากการใช้ปรับเอียงมอเตอร์หรือปีก ซึ่งส่งผลให้ลดน้ำหนักและความซับซ้อนของอุปกรณ์ ทางกลได้เป็นนัยสำคัญ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้พบว่า ระบบขับเคลื่อนอากาศยานไร้คนขับขึ้นลงทางดิ่งหางตั้งที่มีใบพัดจำนวนใบพัด 2 ใบ ที่ติดตั้งบนปีกทั้ง 2 ข้าง ทำให้อากาศยานรักษาเสถียรภาพการบินแนวดิ่งได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งระบบขับเคลื่อนรูปแบบอื่น ๆ

สำหรับงานวิจัยในด้านการออกแบบ Stone R.H., 1999 [7] ได้แสดงวิธีการออกแบบอากาศยานไร้คนขับประเภทหางตั้งที่มีรูปแบบเป็น Canard หรือชุดควบคุมเสถียรภาพในแนวระดับที่ติดตั้งอยู่ส่วนหน้าของอากาศยานโดยใช้วิธี Multidiscipline Optimization ซึ่งวิธีการนี้มี 36 ค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงได้ และมีค่าคงที่ถึง 75 ค่า ในสมการที่รวมค่าน้ำหนักของชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ และโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ Bo w et al., 2015 [8] ได้เสนอวิธีการออกแบบอากาศยานประเภทนี้โดยใช้วิธีการหาจุดที่เหมาะสมโดยใช้การประมาณน้ำหนักรวมสุทธิของอากาศยานไร้คนขับเป็น Objective Function เพื่อหาตัวแปรในการกำหนดขนาดของอากาศยานไร้คนขับที่เหมาะสม ผลลัพธ์ของวิธีการได้นำไปใช้ในการปรับเทียบกับอากาศยานไร้คนขับที่ได้มีการพัฒนาแล้วเช่น อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งหางตั้ง T-wing [2] และ ITU-Tailsitter [4] เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อสร้างความเชื่อถือได้ของกระบวนการออกแบบ Luk S. et al., 2020 [9] ได้เสนอวิธีการออกแบบขั้นต้นของอากาศยานไร้คนขับประเภทหางตั้ง โดยใช้วิธีการหาจุดที่เหมาะสมหรือ Optimization Method โดยสามารถลดระยะเวลาในการออกแบบลงได้เฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการหาชุดอุปกรณ์ที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหการออกแบบต้นแบบอากาศยานไร้คนขับที่มีความคลาดเคลื่อนไปจากความจริง

จากการศึกษางานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า ระเบียบวิธีกระบวนการออกแบบ [2-4] สามารถตอบโจทย์ให้ได้มาซึ่งขนาดและรูปร่างของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งแบบหางตั้งและสร้างความน่าเชื่อถือของกระบวนการออกแบบ แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดยังมีความซับซ้อนในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์และมีความยาก ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบได้ในเวลาจำกัด รวมถึงจำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมเพื่อสามารถสร้างระเบียบวิธีในการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ นอกจากนี้ระเบียบวิธีการออกแบบในแหล่งข้อมูล [2-4] โดยส่วนใหญ่ ไม่ได้รวมการคำนวณอากาศพลศาสตร์เชิงลึกของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการออกแบบเชิงหลักการ ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญใน

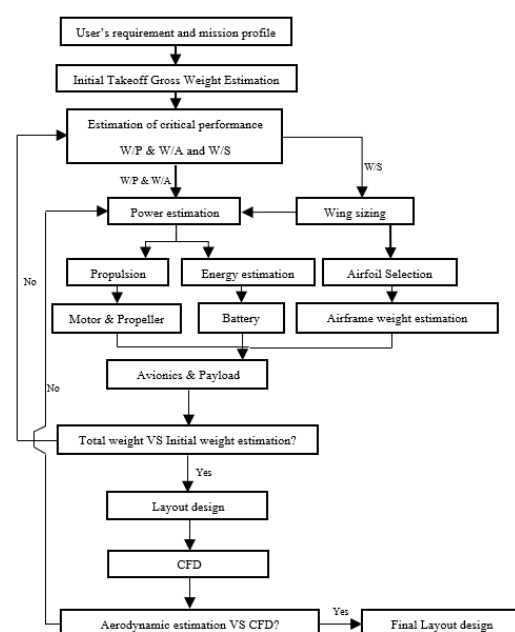
การวิเคราะห์สมรรถนะอากาศยานในเบื้องต้นที่ตอบโจทย์กับความต้องการของภารกิจที่กำหนดไว้ตั้งแต่ต้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างระเบียบวิธีกระบวนการออกแบบเชิงหลักการที่มีความง่าย ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งความเชื่อถือได้ของกระบวนการออกแบบ นอกจากนี้ยังรวมกระบวนการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์อย่างละเอียดโดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เข้ากับระเบียบวิธีกระบวนการออกแบบเชิงหลักการ ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความเชื่อถือได้ของผลลัพธ์กระบวนการออกแบบ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1.แผนผังวงจรกระบวนการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง (Tail-Sitter VTOL UAV)

งานวิจัยนี้ได้เสนอแผนผังวงจรระเบียบวิธีกระบวนการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานหลัก โดยเน้นขั้นตอนกระบวนการตามแผนผังรูปที่ 3



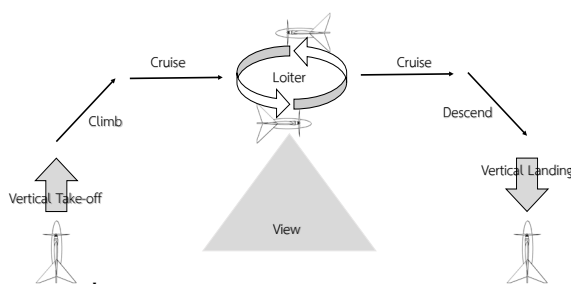
รูปที่ 3 แผนผังวงจรระเบียบวิธีกระบวนการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

จากรูปที่ 3 สามารถแสดงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

2.1.1 การกำหนดความต้องการและรูปแบบการปฏิบัติการกิจของอากาศยานไร้คนขับ (User's Requirements and Mission Profile)

ในงานวิจัยนี้ต้องการออกแบบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่งที่มีลักษณะระบบขับเคลื่อน แบบ 2 ใบพัด (ดังรูปที่ 1) เพื่อใช้ในการกิจลาดตระเวน เผาตรวจ และค้นหา ซึ่งมีรูปแบบการบินปฏิบัติการกิจดังรูปที่ 4 รวมถึงได้กำหนดความต้องการเพื่อใช้ในการออกแบบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่งไว้ดังนี้

- อากาศยานไร้คนขับต้นแบบต้องมีน้ำหนักรวมไม่เกิน 4 กิโลกรัม และมีความยาวปีกไม่เกิน 1.2 เมตร ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการขนส่งและง่ายต่อการใช้งาน รวมถึงสามารถใช้ปฏิบัติการกิจด้วยจำนวนคนเพียง 1-2 คน
- สามารถบรรทุกสัมภาระได้สูงสุด 800 กรัม
- สามารถบินทำภารกิจได้นานมากกว่า 1 ชั่วโมง
- มีอัตราการไต่ในการขึ้น-ลงทางดิ่งด้วยความเร็ว 1 เมตร/วินาที
- ความสูงในการบิน 150-350 เมตร
- บินเดินทางด้วยความเร็ว 16 เมตรต่อวินาที และความเร็วร่วงหล่นต่ำกว่า 12 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4 รูปแบบการปฏิบัติการกิจของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่ง

2.1.2 การประมาณค่าเริ่มต้นน้ำหนักรวม (Initial Weight Estimation)

วิธีการประมาณค่าเริ่มต้นของน้ำหนักรวมอากาศยานก่อนขึ้นบิน สามารถแบ่งตามประเภทของอากาศยานที่ต้องการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ วิธีการประมาณค่า

น้ำหนักของอากาศยานประเภทที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานหลัก อ้างอิงตามทฤษฎีของ Raymer, D., 2012 [10] ซึ่งใช้หลักการคำนวณจากวิธี Fuel Weight Fraction ทั้งนี้เนื่องจากอากาศยานมีน้ำหนักที่ไม่คงที่ระหว่างทำการบินเดินทางเนื่องจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และวิธีการประมาณค่าน้ำหนักของอากาศยานที่ใช้พลังงานไฟฟ้า (Electrical Engine UAV) ตามทฤษฎีของ Giuseppe [11] ซึ่งใช้หลักการคำนวณจากค่าข้อมูลทางสถิติของอัตราส่วนอุปกรณ์บรรทุก (Payload) เทียบต่อค่าน้ำหนักรวมของอากาศยาน หรือ Payload Weight Fraction ซึ่งจากวิธีการประมาณค่าน้ำหนักของอากาศยานตามที่กล่าวข้างต้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการประมาณค่าน้ำหนักของอากาศยานที่ใช้พลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎีของ Giuseppe [11] เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน และน้ำหนักของอากาศยานจะมีค่าคงที่ตลอดในระหว่างทำการบินเดินทาง โดยมีรายละเอียดขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

1.) การสำรวจข้อมูลทางสถิติของอัตราส่วนน้ำหนักกระวางบรรทุก (Payload) ต่อน้ำหนักรวมของอากาศยาน (Take off Gross Weight) ที่ใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ ในการทำโครงสร้าง [11] เช่น วัสดุผสมโฟม และไม้บัลซ่า เป็นต้น โดยมีข้อมูลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 1

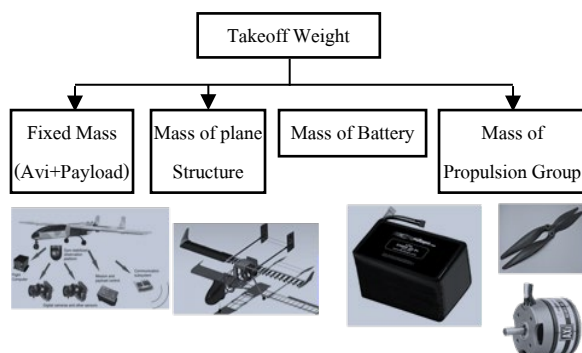
ตารางที่ 1 ข้อมูลทางสถิติของอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกต่อน้ำหนักรวมของอากาศยานจากชนิดของวัสดุ [11]

TYPICAL FRACTIONS	PAYLOAD
COMPOSITE	15 – 20 %
BALSA	8 – 10 %
FOAM	< 8 %

2) การเลือกอัตราส่วนน้ำหนักกระวางบรรทุกต่อน้ำหนักรวมของอากาศยาน โดยจากข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 1 ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ Payload Weight Fraction เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเหตุผล 2 ประการ คือ

2.1) งานวิจัยนี้ใช้วัสดุผสม (Composite Material) เป็นโครงสร้างหลัก จึงสามารถเลือกใช้ค่าอัตราส่วนน้ำหนักกระวาง

บรรทุกต่อน้ำหนักรวมของอากาศยาน อยู่ในช่วง 15–20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้ำหนักรวมบินขึ้นของอากาศยาน สามารถแบ่งน้ำหนักของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ทั้งหมด 4 ส่วน คือน้ำหนักของชุด Avionics และ Payload น้ำหนักของโครงสร้างอากาศยาน น้ำหนักของแบตเตอรี่ และน้ำหนักของชุดขับเคลื่อนอากาศยาน (มอเตอร์และใบพัด) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของน้ำหนักรวมของอากาศยานไร้คนขับทั้งหมด 4 ส่วน

2.2) จากการศึกษาฐานข้อมูลของการสำรวจตลาด (Market Survey) ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนทั้งหมด 6 รูปแบบ [11] พบว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนอุปกรณ์บรรทุก (Payload) เทียบต่อน้ำหนักรวมของอากาศยาน หรือค่า WP/WTO มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.21 หรือ 21 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและความสอดคล้องกับฐานข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางสถิติของอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกต่อน้ำหนักรวมของอากาศยาน [11]

UAV	Wingspan (m)	TOW (kg)	PL (kg)	Endurance (mins)	Cruise (m/s)	Wp/Wt
Hong hu	0.9	2	0.4	38	15	0.2
Wingtra One	1.25	3.7	0.8	58	16	0.22
Alfa Pixhawk	1.2	1.8	0.4	30	12	0.22

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางสถิติของอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกต่อน้ำหนักรวมของอากาศยาน [11] (ต่อ)

UAV	Wingspan (m)	TOW (kg)	PL (kg)	Endurance (mins)	Cruise (m/s)	Wp/Wt
xCraft x2 Geo	0.84	1.27	0.3	45	20	0.24
Atmos Marlyn	1.6	5.7	1	50	12.5	0.18
Quantix	1	2.26	0.5	45	16.6	0.22
						0.212

ดังนั้นจากการกำหนดค่าอุปกรณ์บรรทุกหรือค่าน้ำหนัก Payload ในขั้นตอนที่ 1 (ประมาณ 0.8 กิโลกรัม) สามารถคำนวณค่าน้ำหนักรวมของอากาศยานได้โดยมีค่าประมาณน้ำหนักรวมอากาศยาน = $0.8 / 0.21 = 3.8$ กิโลกรัมก่อนวิ่งขึ้น (Take-off weight)

นอกจากนี้ ทางคณะผู้วิจัยยังสามารถกำหนดน้ำหนักเริ่มต้นจากการประมาณน้ำหนักของอุปกรณ์แต่ละชนิดในรูปที่ 5 ได้ดังปรากฏในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกขึ้นเริ่มต้นของอากาศยาน

Main Components	Sub-Components	Weight (g)
Avionics + Payload		
	Servos x2	150
	Receiver	100
	Flight Control	100
	Speed Control	100
	Gimbal	800
Battery		
	Li-po Battery	950
Propulsion Group		
	Vertical Thrust Motor x2	600
Airframe		
	Empty Airframe	1,000
Initial Total Weight		3,800

2.1.3 การประมาณค่าสมรรถนะวิกฤติ ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่ง (Estimation of Critical Performance)

ขั้นตอนนี้เป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่งจากที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 1 อากาศยานไร้คนขับมีรูปแบบการบินที่ผสมผสานระหว่างอากาศยานแบบปีกหมุนในการขึ้น-ลงทางดิ่งและการบินในลักษณะแบบปีกตรึงในการบินเดินทาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้กำหนดหลักการในการเลือกใช้สมการสมรรถนะของอากาศยานไร้คนขับที่เป็นลักษณะลูกผสมระหว่างอากาศยานแบบปีกหมุนและปีกตรึงเครื่องยนต์ใบพัดเข้าด้วยกัน ซึ่งอ้างอิงจาก Johnson W., 1980 [12] และ Raymer, D., 2012 [10] ทั้งนี้เพื่อหาจุดที่เหมาะสมของค่าตัวแปรที่สำคัญที่ประกอบด้วย ค่า Power loading (W/P) ค่า Wing Loading (W/S) และ ค่า Disk Loading (W/A) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณกำหนดขนาดและรูปร่าง รวมทั้งกำลังของระบบขับเคลื่อนของอากาศยานไร้คนขับได้ต่อไป

1) สมการขอบเขตของสมรรถนะอากาศยานแบบปีกหมุน (Rotorcraft Performance Constraints Equation)

ในการกำหนดหาขนาดของอากาศยานแบบปีกหมุนขึ้นลงทางดิ่ง Kamal M.A. และ Alex, R., 2018 [13] ได้เสนอรูปแบบสมการสมรรถนะเพื่อกำหนดขอบเขตการกำหนดขนาดใบพัดและระบบขับเคลื่อนอากาศยานโดยอ้างอิงสมการพื้นฐานสมรรถนะของอากาศยานแบบปีกหมุน [12] ซึ่งในรูปแบบการบินของอากาศยานแบบปีกหมุน นั้นจะมีท่าทางการบินแบบขึ้นลงทางดิ่ง และบินรักษาระดับแบบลอยตัวในแนวดิ่ง ดังนั้นจำเป็นต้องนำสมการสมรรถนะของอากาศยานปีกหมุนพื้นฐานมาคำนวณโดยอ้างอิงจากทฤษฎีอากาศยานแบบปีกหมุน [12] ซึ่งสมการสมรรถนะจะเป็นตัวกำหนดขนาดของกำลังระบบขับเคลื่อนที่เหมาะสมและเพียงพอในการยกน้ำหนักอากาศยานที่ประมาณไว้ โดยสมการเหล่านี้ ประกอบด้วย สมการสมรรถนะการลอยตัวนิ่งของอากาศยาน (Hovering Flight Performance) สมการสมรรถนะการบินไต่ขึ้น-ลงแนวดิ่ง (Vertical Climb Flight Performance) สมรรถนะการบินไปข้างหน้าด้วย

ท่าทางแบบปีกหมุน (Transition Flight Performance) และ สมรรถนะการบินลอยตัวในระดับความสูงที่กำหนด (Hovering Ceiling) โดยมีสมการสมรรถนะดังต่อไปนี้

1.1) สมการที่ (1) สมรรถนะการลอยตัวนิ่งของอากาศยาน (Hovering Flight Performance)

$$\left(\frac{W}{P}\right) = \left(\frac{k_f \frac{W^2}{\sqrt{2\rho A}} + \rho A V_{tip}^3 \left(\frac{\sigma_{cdB}}{8}\right)}{k_f \frac{W^2}{\sqrt{2\rho A}} \left(\frac{W}{P}\right)^{\frac{1}{2p}} \left(\frac{W}{P}\right)^{\frac{1}{2p}}} \right) \quad (1)$$

1.2) สมการที่ (2) สมรรถนะการบินไต่ขึ้น-ลงแนวดิ่ง (Vertical Climb Flight Performance)

$$\left(\frac{W}{P}\right) = \frac{1}{V_y \cdot \frac{k_f V_y}{2} + \frac{k_j}{2} \sqrt{V_y^2 + \frac{2}{\rho_0} \left(\frac{W}{A}\right) + \frac{\rho_0 V_{tip}^3 \left(\frac{\sigma_{cdB}}{8}\right)}{\left(\frac{W}{A}\right)}}} \quad (2)$$

1.3) สมการที่ (3) สมรรถนะการลอยตัวที่ความสูงกำหนด (Hovering Ceiling Performance)

$$\left(\frac{W}{P}\right) = \frac{\sigma_{air}}{V_{yc} \cdot \frac{k_f V_{yc}}{2} + \frac{k_j}{2} \sqrt{V_{yc}^2 + \frac{2}{\rho_c} \left(\frac{W}{A}\right) + \frac{\rho_0 V_{tip}^3 \left(\frac{\sigma_{cdB}}{8}\right)}{\left(\frac{W}{A}\right)}}} \quad (3)$$

1.4) สมรรถนะการบินไปข้างหน้าด้วยท่าทางแบบปีกหมุน (Transition Flight Performance) ดังสมการที่ (4)

$$\left(\frac{W}{P}\right) = \frac{1}{\frac{k_f}{\sin(\theta_{tilt})} \sqrt{\frac{V_\infty^2}{2} + \left(\frac{V_\infty^2}{2}\right)^2 + \left(\frac{W}{2\rho \sin(\theta_{tilt}) A}\right)^2} + \frac{\rho V_{tip}^3 \left(\frac{\sigma_{cdB}}{8}\right) (1 + 4.6\mu^2)}{\left(\frac{W}{A}\right)} + \left(0.5\rho_0 V_\infty^3 C_{d0} \left(\frac{S}{W}\right) + \frac{2K}{\rho_0 V_\infty} \left(\frac{W}{S}\right)} \right) \quad (4)$$

จากสมการที่ (1)–(4) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จำเป็นต้องมีการกำหนดตัวแปรในสมการตามข้อมูลบันทึกที่ได้จากการทดลองและข้อมูลทางสถิติที่คาดว่าจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการเลือกจุดที่เหมาะสมในการออกแบบ [13] รวมถึงค่าที่กำหนดขึ้นตามความต้องการสมรรถนะของอากาศยานที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการออกแบบที่ 1 ดังปรากฏในตารางที่ 4 จากนั้นจึงนำค่าตัวแปรเหล่านี้แทนเข้าในสมการที่ (1)–(4) ซึ่งเมื่อนำสมการไปสร้างกราฟ จะได้กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง W/A

(Disk Loading) กับ W/HP (Power Loading) โดยค่า W/A จะใช้เพื่อกำหนดขนาดของใบพัดที่ต้องใช้ในการบินขึ้น-ลงทางดิ่ง และในส่วนของ W/HP จะสามารถนำไปคำนวณกำลังของระบบขับเคลื่อนที่เหมาะสมได้ต่อไป

ตารางที่ 4 การกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นในสมการขอบเขตสมรรถนะอากาศยานแบบปีกหมุน

Vy (m/s)	A (m ²)	Vtip (m/s)	σ
1	0.17118	145.229	0.04
ki	Vy,c (m/s)	Cd _B	V _∞ (m/s)
1.15	0.5	0.018	16

2) สมการขอบเขตสมรรถนะอากาศยานแบบปีกดิ่ง

(Fixed-Wing Performance Constraints Equation)

ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดอากาศยานแบบปีกดิ่ง รวมถึงกำลังของระบบขับเคลื่อนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการการบินตรงระดับ สามารถคำนวณโดยใช้สมการขอบเขตสมรรถนะของอากาศยานแบบปีกดิ่งระบบขับเคลื่อนแบบใบพัดได้โดยอ้างอิงวิธีการจาก Raymer, P., 2012 [10] ซึ่งมีปรากฏในสมการที่ (5)–(8) ดังนี้

2.1) สมการสมรรถนะการเลี้ยว (Turn Performance)

$$\left(\frac{W}{HP}\right) = \frac{1}{\frac{1}{550\eta_p} \left[\frac{1}{2} \rho V^3 C_{d0} \left(\frac{S}{W}\right) + 2K \frac{W^2}{\rho V^4} \right]} \quad (5)$$

2.2) สมการสมรรถนะการบินทนนาน (Endurance Performance)

$$\left(\frac{W}{HP}\right) = \frac{1}{\frac{4}{550\eta_p} C_{d0} \frac{1}{K^{\frac{3}{4}}} \left(\frac{2W}{\rho S}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

2.3) สมการสมรรถนะการบินเดินทาง (Cruise Performance)

$$\left(\frac{W}{HP}\right) = \frac{1}{\frac{2}{550\eta_p} C_{d0} \frac{1}{K^{\frac{3}{4}}} \left(\frac{2W}{\rho S}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

2.4) สมการสมรรถนะการร่วงหล่น (Stall Performance)

$$\left(\frac{W}{S}\right) = \frac{\rho}{2} C_{L_{max}} V_{SO}^2 \quad (8)$$

จากสมการที่ (5)–(8) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จำเป็นต้องมีการกำหนดตัวแปรในสมการตามข้อมูลบันทึกที่ได้จากการทดลองและข้อมูลทางสถิติซึ่งจะมีลักษณะการดำเนินการเช่นเดียวกันกับการคำนวณสมรรถนะอากาศยานปีกหมุน รวมถึงค่าที่กำหนดขึ้นตามความต้องการสมรรถนะของอากาศยานที่กำหนดไว้ในกรอบออกแบบสมรรถนะของอากาศยานที่กำหนดไว้ในกรอบออกแบบขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นในสมการขอบเขตสมรรถนะอากาศยานแบบปีกดิ่ง

V _{stall} (m/s)	V _{loiter} (m/s)	ρ@150m (Kg/m ³)	ρ@SL (Kg/m ³)
12	16	1.207	1.225
η _p	ROC (m/s)	e	K
0.8	5	0.8	0.099432
CL _{max}	Cd ₀	AR	n
1.1	0.04	4	2.5

จากตารางที่ 5 เมื่อนำค่าตัวแปรแทนค่าลงในสมการที่ (5)–(8) จะพบว่าสมการเหล่านี้สามารถนำมาสร้างกราฟได้ผลลัพธ์คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า W/S (Wing Loading) และ W/HP (Power Loading) โดยค่า W/S จะสามารถกำหนดขนาดของปีก ในขณะที่ค่า W/HP สามารถใช้ในการกำหนดขนาดระบบขับเคลื่อนที่เหมาะสมได้

3) การรวมค่าสมการขอบเขตของสมรรถนะอากาศยานแบบปีกหมุนและปีกดิ่งเข้าด้วยกันเพื่อเลือกจุดที่เหมาะสม (Combination of Rotorcraft and Fixed-Wing Performance Constraints Equation)

สำหรับการเลือกจุดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำหนดขนาดรูปร่างและกำลังขับของระบบของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งแบบหางตั้ง ในงานวิจัยนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรที่สำคัญ คือ ค่า Power Loading

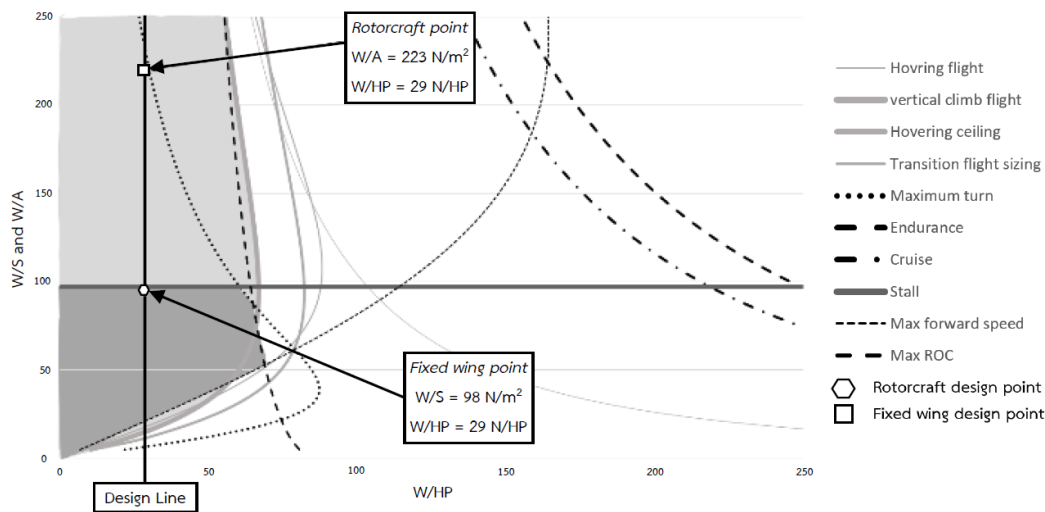
(W/P) ค่า Wing Loading (W/S) และ ค่า Disk Loading (W/A) ในรูปแบบของกราฟดังแสดงในรูปที่ 6

วิธีการเลือกจุดที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ของกราฟค่าสมการขอบเขตของสมรรถนะอากาศยานแบบปีกหมุน และ ปีกตรึง ดังรูปที่ 6 ในทางทฤษฎี สำหรับอากาศยานแบบปีกตรึงสามารถทำได้โดยการเลือกจุดที่มีค่า Wing Loading (W/S) และ Power Loading (W/HP) สูงสุด ซึ่งค่าเหล่านี้ต้องอยู่

ภายใต้เงื่อนไขพื้นที่ขอบเขตที่เป็นจุดตัดระหว่างกราฟสมการขอบเขตสมรรถนะอากาศยานแบบปีกตรึงของสมการที่ (5)–(8) ซึ่งพื้นที่ที่เกิดขึ้นได้จุดตัดของกราฟสมการเหล่านี้ถูกเรียกว่า พื้นที่ที่เป็นไปได้ในการออกแบบ

อากาศยานแบบปีกตรึง (Fixed-Wing Feasible Design Region) ดังแสดงในรูปที่ 6

ในขณะที่ การเลือกจุดที่เหมาะสมสำหรับอากาศยานแบบปีกหมุนในทางทฤษฎี สามารถทำได้โดยการเลือกจุดที่มีค่า Disk Loading (W/A) และ Power Loading (W/HP) สูงสุด ในทำนองเดียวกัน ค่าเหล่านี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขพื้นที่ขอบเขตที่เป็นจุดตัดระหว่างกราฟสมการขอบเขตสมรรถนะอากาศยานแบบปีกหมุนของสมการที่ (1)–(4) ซึ่งพื้นที่ที่เกิดขึ้นได้จุดตัดของกราฟสมการเหล่านี้ถูกเรียกว่า พื้นที่ที่เป็นไปได้ในการออกแบบอากาศยานแบบปีกหมุน (Rotorcraft Feasible Design Region) ดังแสดงในพื้นที่เรณาดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปแสดงพื้นที่ออกแบบอากาศยานไร้คนขับทางดั่งขนาดเล็กแบบขึ้นลงทางดั่ง

ดังนั้น จากการวิเคราะห์กราฟเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการออกแบบของค่าตัวแปรที่สำคัญกล่าวคือค่า Power Loading (W/HP) ค่า Wing Loading (W/S) และ ค่า Disk Loading (W/A) ตามเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเลือกจุดค่า Wing Loading (W/S) ของอากาศยานแบบปีกตรึงเท่ากับ 98 N/m^2 และค่า Disk Loading (W/A) อากาศยานแบบปีกหมุนเท่ากับ 223 N/m^2 ตามลำดับ ในขณะที่ได้กำหนดเลือกจุดค่า Power Loading (W/HP) เท่ากับ 29 N/HP ของอากาศยานทั้ง 2 รูปแบบ ทั้งนี้เนื่องจากเงื่อนไขการกำหนดความต้องการในขั้นตอนที่ 1 ได้กำหนดรูปแบบของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดั่งประเภททางดั่ง ให้เป็นการใช้ระบบขับเคลื่อน 2 ใบพัด ทั้งในลักษณะการ

บินขึ้น-ลงทางดั่งและการบินตรงระดับ ดังนั้นระบบขับเคลื่อนของอากาศยานทั้ง 2 รูปแบบเป็นระบบที่ทำงานร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 1

4) การประมาณค่ากำลังขับที่ต้องการ (Power Estimation)

สำหรับการประมาณค่ากำลังขับที่ต้องการ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ การเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นระบบขับเคลื่อนหลักของงานวิจัยนี้ จากการเลือกจุดที่เหมาะสมของค่า Power Loading (W/HP) เท่ากับ 29 N/HP ในขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อ 2.1 ข้อ 3.3 สามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อกำหนดขนาดกำลังของมอเตอร์ได้ จากการประมาณค่าเริ่มต้นของน้ำหนักอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดั่งแบบทางดั่งที่ได้จากการออกแบบขั้นตอนที่ 1 สามารถคำนวณได้ขนาดกำลังมอเตอร์ต่ำสุดเท่ากับ 958 วัตต์

ที่ทำให้อากาศยานสามารถบินขึ้น-ลงในแนวดิ่งด้วยอัตราการไต่ 1 m/s ได้เพียงพอ และสามารถบินในแนวระดับได้ตามภารกิจ

ดังนั้น จากการกำหนดความต้องการของรูปแบบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้งโดยใช้ระบบขับเคลื่อนแบบ 2 ใบพัด จึงทำให้สามารถเลือกขนาดของกำลังมอเตอร์ในแต่ละตัวมีค่าน้อยเท่ากับ 479 วัตต์ ซึ่งจากข้อมูลการคำนวณของกำลังมอเตอร์ดังที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดเลือกใช้มอเตอร์ที่มีขายตามท้องตลาดดังรูปที่ 7 และมีข้อมูลลักษณะเฉพาะตามตารางที่ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ตัวอย่างมอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นระบบขับเคลื่อนหลักของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

ตารางที่ 6 ข้อมูลลักษณะเฉพาะมอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นระบบขับเคลื่อนหลักของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

ชื่อ/รุ่นของมอเตอร์	EMAX Brushless Motor BL2826
ความเร็วรอบ	850 KV
กำลังขับสูงสุด	732 w
แรงขับสูงสุด	2.65 kg
ขนาดใบพัดที่เหมาะสม	13 inch x 6.5 inch
ความต่างศักย์	14.8 V
น้ำหนัก	182 g
กระแสไฟฟ้าที่ใช้สูงสุด	61A
อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (ESC)	80A

จากตารางที่ 6 พบว่า ข้อมูลลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ที่วางขายในท้องตลาด มีข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับขนาดใบพัดที่เหมาะสมและขนาดแรงขับสูงสุดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ของมอเตอร์ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบค่า

ความถูกต้องของค่าตัวแปรที่ได้จากสมการขอบเขตสมรรถนะกับการมีอยู่จริงของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์และใบพัดในท้องตลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าตัวแปร Disk Loading (W/A) ที่เหมาะสมที่เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 6 มีค่าเท่ากับ 223 N/m^2 เมื่อกำหนดย้อนกลับเพื่อหาขนาดพื้นที่ของใบพัดที่หมุน 1 รอบเป็นลักษณะของวงกลมมีค่าเท่ากับ 0.1711 m^2 ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับกับขนาดใบพัดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 นิ้ว หรือ 0.33 เมตร มากไปกว่านั้นจากค่าแรงขับสูงสุดที่ให้ในตารางที่ 6 พบว่า คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนของขนาดแรงขับเปรียบเทียบกับน้ำหนักของอากาศยาน (Thrust to Weight Ratio (T/W)) เท่ากับ 1.325:1 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลทางสถิติของการเลือกระบบขับเคลื่อนของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทนี้ [14] ซึ่งควรมีค่า T/W เท่ากับ 1.2–1.5:1 ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราส่วนนี้ทำให้อากาศยานมีการใช้พลังงานที่เหมาะสมและสามารถรักษาเสถียรภาพการบินแนวดิ่งได้ค่อนข้างคงที่

5) การกำหนดค่าขนาดของปีกอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง (Wing Sizing)

จากการเลือกจุดที่เหมาะสมของค่า Wing Loading (W/S) เท่ากับ 98 N/m^2 ในขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อ 2.1 ข้อ 3.3 สามารถนำน้ำหนักรวมเริ่มต้นไปคำนวณหาพื้นที่ของปีกอากาศยานได้ โดยผลลัพธ์จากการคำนวณพื้นที่ปีกของอากาศยานไร้คนขับมีค่าเท่ากับ 0.417 m^2

6) การประมาณค่าพลังงานที่ต้องใช้ ในการบินปฏิบัติการกิจ (Energy estimation)

จากรูปแบบการบินปฏิบัติการกิจที่กำหนดไว้ในการออกแบบขั้นตอนที่ 1 (ดังรูปที่ 4) สามารถสรุปรูปแบบการบินได้ทั้งหมด 3 ระยะหลัก ๆ คือ ระยะการบินขึ้นแนวดิ่ง (Vertical Take-Off) ระยะการบินเดินทาง (Cruise) และระยะการลงจอดในแนวดิ่ง (Vertical Landing) ซึ่งทั้ง 3 ระยะการบินนี้สามารถนำไปคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการได้ดังนี้

- การคำนวณพลังงานไฟฟ้าของระยะการบินขึ้น-ลงแนวดิ่ง โดยใช้เวลา 2 นาที

- ในระยะการบินช่วงนี้ สามารถคำนวณหาปริมาณพลังงานไฟฟ้าหรือขนาดความจุของแบตเตอรี่ เพื่อกำหนดขนาดแบตเตอรี่ได้ดังนี้
- ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อมอเตอร์ 1 ตัว = 61 A (จากข้อมูลตามตารางคุณลักษณะของชุดขับเคลื่อนในแหล่งข้อมูลอ้างอิง ในตารางที่ 6) ดังนั้นจากตารางที่ 6 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อมอเตอร์ทั้งหมด 2 ตัว (แบตเตอรี่ 4 เซลล์) = $61 \times 2 = 122 \text{ A}$
จากข้อมูลในเบื้องต้นสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขึ้นและลงทางดิ่ง (ใช้เวลา 2 นาที) = $122 \times 2 / 60 = 4.06 \text{ Ah}$ หรือ 4,066 mAh

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าของการบินเดินทางด้วยความเร็วคงที่ 16 m/s โดยใช้เวลา 60 นาที ในการปฏิบัติการ

จากสมการกำลังขับที่ต้องการ (Power Required, Pr) ของการบินตรงระดับด้วยความเร็วคงที่

$$P_r = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_{d0} + \frac{2W^2}{\rho V S} \left(\frac{1}{\pi e A R} \right) \quad (9)$$

และ สมการกำลังทางไฟฟ้าที่ต้องการ (Electric power, Pe)

$$P_e = \frac{P_r}{\eta_m \eta_p} \quad (10)$$

$$P_e = IE \quad (11)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์ (A) E คือค่าความต่างศักย์ หน่วย โวลต์ (V) η_m คือ ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ และ η_p คือ ค่าประสิทธิภาพใบพัด จากสมการที่ (9)–(11) เมื่อแทนค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดในตารางที่ 5 สามารถคำนวณอัตราการใช้กระแสไฟฟ้าในช่วงการบินเดินทางหรือ Cruise current draw ได้เท่ากับ 9.54 A (อ้างอิงจากแบตเตอรี่ 4 เซลล์ 14.8V) ดังนั้น จากกำหนดความต้องการของสมรรถนะบินทนนาน (Endurance) เท่ากับ 1 ชั่วโมง จะมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ดังนี้
พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ = $9.54 \text{ A} \times 1 \text{ h} = 9.54 \text{ Ah} = 9,540 \text{ mAh}$

สรุปผลการคำนวณหาขนาดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่งในการบินปฏิบัติการกิจในเวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมง พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการรวมเท่ากับ 13,606 mAh โดยใช้แบตเตอรี่ชนิด 4 เซลล์แบบลิเทียมพอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถใช้ค่าประจุไฟฟ้าได้สูงสุดหรือค่า Depth of Discharge (DOD) เท่ากับ 90 % ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่รวมมีค่าเท่ากับ 15,117 mAh ดังนั้น จากข้อมูลความต้องการพลังงานไฟฟ้าดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบตเตอรี่ รุ่น Maxsmp ขนาดความจุพลังงาน 16,000 mAh ค่าความต่างศักย์ 14.8V และมีน้ำหนัก 1,332 g ซึ่งจากข้อมูลแบตเตอรี่จะพบว่ามีขนาดพลังงานที่เพียงพอและมีแหล่งข้อมูลอ้างอิงที่เชื่อถือได้ [15] ดังปรากฏในรูปที่ 8

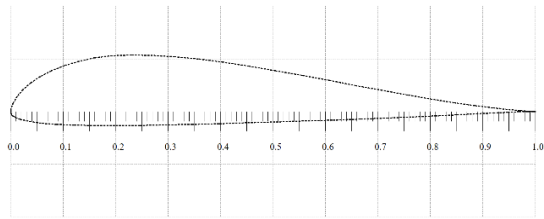


รูปที่ 8 ตัวอย่างแบตเตอรี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่ง

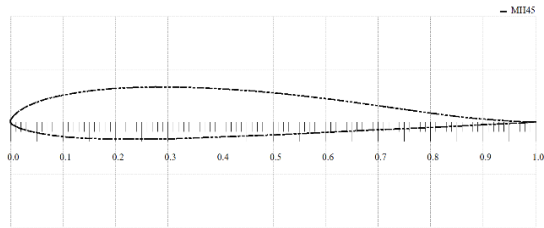
7) การเลือกรูปแบบแผนอากาศของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแผนอากาศสำหรับอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่ง จากฐานข้อมูลแผนอากาศ UIUC [16] มาทั้งหมด 4 รูปแบบคือ MH82 MH45 MH46 และ S5010 ดังปรากฏในรูปที่ 9 ซึ่งในขั้นตอนนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของแผนอากาศทั้ง 4 รูปแบบ โดยใช้โปรแกรม XFRL5 [17] จากนั้นจะเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของแผนอากาศทั้ง 4 รูปแบบเพื่อหาแผนอากาศที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำสุดที่ ค่าแรงยกที่ออกแบบไว้ (CL_design) ในการบินตรงระดับความเร็วคงที่ 16 m/s ซึ่งจากผลการเลือกจุดที่เหมาะสมของค่า Wing Loading (W/S)

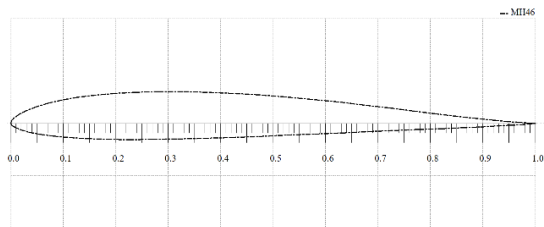
เท่ากับ 98 N/m^2 ในขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อ 2.1 ข้อ 3.3 สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยกได้เท่ากับ 0.65



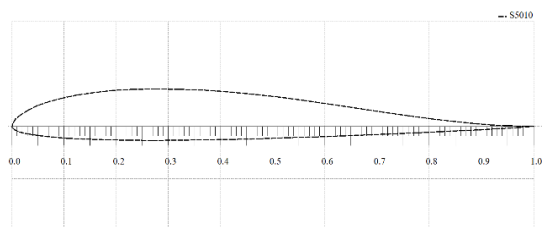
(ก)



(ข)



(ค)

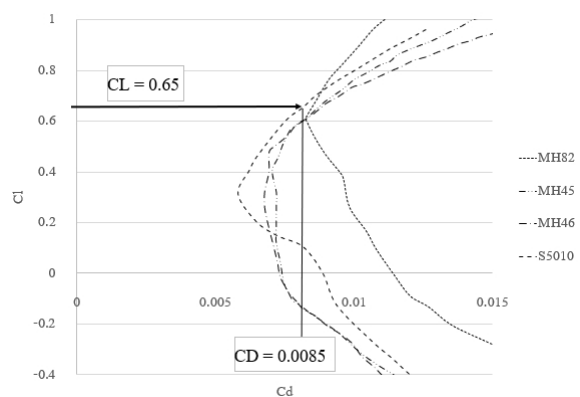


(ง)

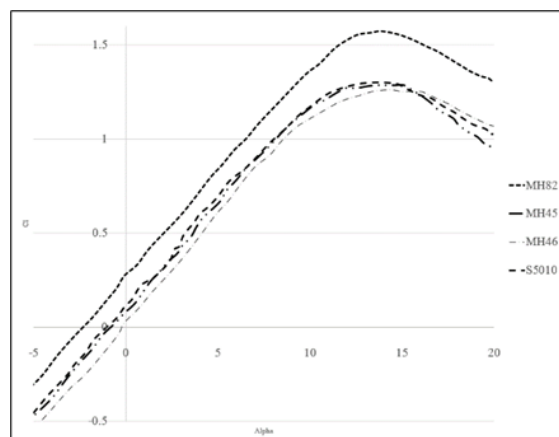
รูปที่ 9 แพนอากาศทั้ง 4 รูปแบบเพื่อใช้ในการเลือก
แพนอากาศที่เหมาะสมที่สุด (ก) MH82 (ข) MH45
(ค) MH46 (ง) S5010

จากรูปที่ 9 พบว่า แพนอากาศเหล่านี้เป็นแพนอากาศสำหรับอากาศยานแบบปีกบิน (Flying Wing) ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการออกแบบอากาศยานไร้คนขับที่มีขนาดกะทัดรัด พกพาสะดวก นอกจากนี้ ในแง่ทางอากาศพลศาสตร์ รูปทรงอากาศยานไร้คนขับแบบปีกบินมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าอากาศยานรูปทรงเชิงอนุรักษ์ (Conventional Aircraft) อย่างเป็นนัยสำคัญ [18] โดยจะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะ

ด้านการบินทนนานซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของอากาศยานไร้คนขับที่มีภารกิจในการลาดตระเวน นอกจากนี้ แพนอากาศที่เลือกมาต้องมีความเหมาะสมที่อยู่ในเงื่อนไขความต้องการของภารกิจที่กำหนดการบินความเร็วช่วงหล่นน้อยกว่า 12 เมตร/วินาที ในขณะที่ยังสามารถสร้างเสถียรภาพในแกนลำตัวได้ โดยผลลัพธ์การคำนวณโดยใช้โปรแกรม XFRLR [17] ของแพนอากาศทั้ง 4 รูปแบบสามารถแสดงการเปรียบเทียบให้อยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน และ สัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะ ดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับ
สัมประสิทธิ์แรงต้านของแพนอากาศทั้ง 4 รูปแบบ



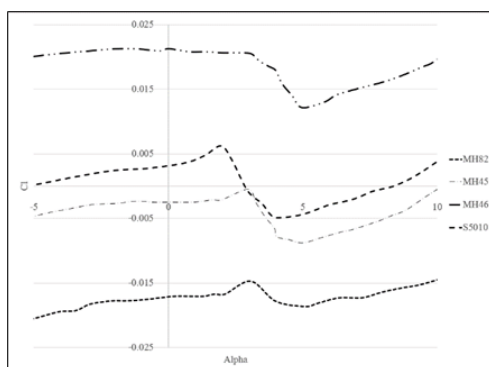
รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับ
มุมปะทะของแพนอากาศทั้ง 4 รูปแบบ

จากรูปที่ 10 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแพนอากาศแบบ S5010 มีค่าต่ำสุดที่สัมประสิทธิ์แรงยกเท่ากับ 0.3–

0.6 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดในความต้องการของการออกแบบไว้ที่
สภาวะการบินตรงระดับด้วยความเร็ว 16–20 เมตร/วินาที

เมื่อพิจารณาค่าความต้องการของความเร็วร่วลงที่
กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดความต้องการในการทำ
ภารกิจ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 12 เมตร/วินาที โดยสามารถเลือกแผน
อากาศได้จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด
หรือค่า CL_{max} ของแผนอากาศทั้ง 4 รูปแบบได้ดังกราฟที่
ปรากฏในรูปที่ 11 จากรูปนี้พบว่า แผนอากาศ MH82 มีค่า
สัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดคือมีค่าเท่ากับ 1.6 อันดับรองลงมา
คือแผนอากาศ S5010 และ MH45 มีค่าเท่ากับ 1.25 สำหรับ
แผนอากาศ MH4 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกต่ำสุดประมาณ 1.2
โดยจากการคำนวณหาค่าความเร็วร่วลงที่ได้จากการ
คำนวณในสมการที่ (8) พบว่า แผนอากาศทั้ง 4 รูปแบบมีค่า
ความเร็วร่วลงต่ำกว่า 12 เมตร/วินาทีซึ่งตรงกับความต้องการ
ที่กำหนดขึ้น ในขั้นตอนการออกแบบขั้นที่ 1

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางอากาศ
พลศาสตร์กับมุมปะทะที่ได้จากวิธีการวอร์เทกเลททิซ ดังรูป
ที่ 12 รูปนี้แสดงให้เห็นว่าโมเมนต์ปีกของแผนอากาศแบบ
S5010 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ตลอดทุกมุมปะทะที่พิจารณา ซึ่งจะ
ส่งผลต่อการรักษาเสถียรภาพสถิตในแกนลำตัว ดังนั้นจึงไม่
จำเป็นต้องใช้วิธีการลู๊ปกและบิดมุมที่ปลายปีกเพื่อรักษา
เสถียรภาพในแกนลำตัวหรือ Longitudinal Static Stability
สำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกบิน [19]



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบจุด
ศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์เทียบกับมุมปะทะของแผน
อากาศทั้ง 4 รูปแบบ

จากผลการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของ
แผนอากาศทั้ง 4 รูปแบบ คณะผู้วิจัยได้เลือกแผนอากาศแบบ
S5010 ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำที่สุดที่
สภาวะเงื่อนไขการบินที่กำหนด ซึ่งค่าอากาศพลศาสตร์นี้จะ
ส่งผลโดยตรงกับสมรรถนะด้านระยะเวลาการบิน และแผน
อากาศชนิดนี้มีค่าความเร็วร่วลงเป็นไปตามเงื่อนไขการ
ออกแบบ นอกจากนี้ แผนอากาศชนิดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์
โมเมนต์ปีกจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะส่งผลดีในการรักษา
เสถียรภาพสถิตในแกนลำตัวได้เมื่อเปรียบเทียบกับแผน
อากาศชนิดอื่น ๆ

8) การเลือกส่วนประกอบติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ
(Component Selection)

ในขั้นตอนการเลือกส่วนประกอบติดตั้งให้กับอากาศยาน
ไร้คนขับ จำเป็นต้องพิจารณาและตัดสินใจในการเลือก
ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับสมรรถนะและข้อจำกัด
ของอากาศยาน และสามารถทำให้อากาศยานไร้คนขับขนาด
เล็กสามารถปฏิบัติการได้ตรงตามกำหนด

ความต้องการและรูปแบบภารกิจ ซึ่งส่วนประกอบหลัก
ที่จะทำการพิจารณาและเลือกในขั้นตอนนี้ประกอบด้วย 2
ส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

8.1) ระบบอุปกรณ์บรรทุก (Payload) ซึ่งเป็นการติดตั้ง
ระบบอุปกรณ์การภาพสำหรับการปฏิบัติการลาดตระเวน
และเฝ้าตรวจทางอากาศ โดยอากาศยานไร้คนขับสามารถ
รองรับอุปกรณ์บรรทุกได้ไม่เกิน 0.8 กิโลกรัม จึงจะสามารถ
ปฏิบัติการได้ตามสมรรถนะที่กำหนด

8.2) ระบบควบคุมการบินอัตโนมัติและระบบเอวอนิกส์
พื้นฐาน ซึ่งอากาศยานไร้คนขับสามารถรองรับน้ำหนักใน
ส่วนนี้ได้ประมาณ 0.3 กิโลกรัม

9) การประมาณค่าน้ำหนักโครงสร้างอากาศยาน

ในงานวิจัยนี้ ได้ประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณเพื่อประมาณ
ค่าน้ำหนักลำตัวของโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้
สมการของ Stender [20] ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่าง
น้ำหนักโครงสร้างค่า Aspect Ratio และพื้นที่ปีกดังสมการที่ (12)

$$W_{af} = 8.763AR^{0.467}S^{0.778} \quad (12)$$

จากสมการนี้ สามารถคำนวณค่าเปล่าของโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้งได้เท่ากับ 0.912 กิโลกรัม

10) การประเมินน้ำหนักรวมในขั้นตอนสุดท้าย

สำหรับในขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบ คือการนำข้อมูลน้ำหนักเริ่มต้นมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักใหม่ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะของการคำนวณแบบวนซ้ำถ้าเงื่อนไขของน้ำหนักรวมในการคำนวณลำดับครั้งถัดไปมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ในลำดับก่อนหน้า การคำนวณในการออกแบบจะถือว่าเสร็จสิ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การคำนวณแบบวนซ้ำในขั้นตอนนี้เพียง 4 รอบ ก็สามารรถได้คำตอบที่เป็นไปตามเงื่อนไขการวนซ้ำของการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์น้ำหนักรวมและค่าตัวแปรขอบเขตสมรรถนะที่เหมาะสมได้แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาน้ำหนักอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

Iterations	Take-Off weight	W/S	W/A	W/Hp
1	3,800	98	216	27
2	3,892	98	222	29
3	3,910	98	223	29
4	3,910	98	223	29

11) การดำเนินการวาดแบบโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง (Layout Design)

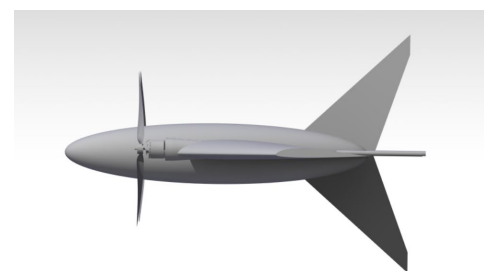
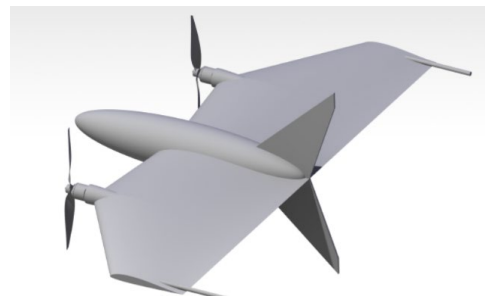
ขั้นตอนการการวาดแบบโครงสร้างหรือ Layout Design นับเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการออกแบบเชิงหลักการ ภายหลังจากที่ดำเนินการออกแบบในขั้นตอนที่ 1-10 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว และทำการวิเคราะห์พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลในการดำเนินการทั้งหมด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวาดแบบโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้งโดยใช้โปรแกรมสร้างรูปแบบ 3 มิติ (CATIA) ดังแสดงในรูปที่ 13 และมีรายละเอียดตามตารางที่ 8

จากรูปที่ 13 จะพบว่ารูปแบบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งเป็นอากาศยานไร้คนขับประเภทแบบปีกบิน โดยมีระบบขับเคลื่อนแบบ 2 มอเตอร์และ 2 ใบพัด ตามความ

ต้องการในการออกแบบ และมีการสร้างเสถียรภาพในด้านทิศทางหรือ Directional Static Stability โดยใช้เพนหางตั้ง ซึ่งติดตั้งบริเวณทั้งบนและล่างลำตัวอากาศยาน นอกจากนี้เพนหางตั้งยังสามารถใช้ประโยชน์เป็นชุดขาตั้งเพื่อใช้ในการบินขึ้น-ลงทางดิ่งได้

ตารางที่ 8 ข้อมูลขนาดและรูปร่างอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

ส่วนประกอบต่าง ๆ	รายละเอียด
Wing section	S5010
Wingspan (m)	1.21
MAC (m)	0.355
Wing area (m ²)	0.417
Body Length (m)	0.61
Root chord length (m)	0.38
Tip chord length (m)	0.20



รูปที่ 13 โครงร่างแบบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

2.2.การวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง

เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการคำนวณสมรรถนะด้านการบินทนนานของอากาศยานไร้คนขับซึ่งเป็นผลลัพธ์ในขั้นตอน

การออกแบบเชิงหลักการ รวมถึงเพื่อเปรียบเทียบการประมาณเริ่มต้นของค่าอากาศพลศาสตร์ในกระบวนการออกแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์โดยใช้วิธีการวอร์เทคแลตทิซ [21] และโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการวิเคราะห์เชิงลึกของค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์อากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้งที่ได้จากกระบวนการออกแบบดังกล่าวมาข้างต้น ซึ่งประกอบด้วยค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิต พื้นฐาน ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน และค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบจุดศูนย์ถ่วง

1) การวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics)

ในหัวข้อนี้ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภทหางตั้ง ดังรูปที่ 15 ถูกนำมาคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในรูปแบบของ Finite Volume Method โดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent โปรแกรมนี้ใช้เข้าไปแก้สมการรูปแบบจำลองการไหลของอากาศแบบเทอร์บูเลนต์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) โดยกระแสน้ำถูกสมมติให้เป็น การไหลแบบเทอร์บูเลนต์ และการไหลในย่านความเร็วต่ำกว่าเสียงแบบไร้การอัดตัว (Incompressible Flow) ดังสมการที่ (13) และ (14) แสดงไว้ดังนี้

กฎอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

สมการที่ 2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u_i'' u_j''} \right] \quad (14)$$

โดย $\tilde{u}_i$ และ u_i'' คือ ค่าความเร็วเฉลี่ย (Mean Velocity) และความเร็วแบบไร้ระเบียบ (Fluctuating Velocity) ในแต่ละระนาบ คือแกน (x y z) จากระบบสมการนี้ จะเห็นได้ว่าสมการไม่เป็นรูปแบบเชิงเส้น (Non-Linear Equations) ซึ่งมีความซับซ้อนมากและไม่สามารถแก้สมการในรูปแบบของ Exact

Solution ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเป็นแก้สมการในระบบเชิงตัวเลข ตามที่กล่าวในเบื้องต้น ในงานวิจัยนี้ค่าอากาศพลศาสตร์สถิตถูกคำนวณใน 3 มิติ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์รอบจุดศูนย์ถ่วงของอากาศยานในมุมปะทะต่าง ๆ ดังนั้น เพื่อสามารถปิดระบบสมการ (13) และ (14) เทอร์บูเลนต์โมเดลแบบ SST k- ω [22] จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยมีเหตุผลประกอบ 2 ประการ ได้แก่

1.1) เทอร์บูเลนต์ โมเดลนี้ได้รับการยอมรับ จากองค์การ NASA ประเทศสหรัฐอเมริกา ว่า มีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถประยุกต์ใช้ได้ ในหลายรูปแบบของการไหล [22] โดยเฉพาะการไหลที่มีความดันย้อนกลับสูง (Strong Adverse Pressure Gradient) การไหลแยกตัวของอากาศ (Flow Separations) และการไหลในชั้นซิดผิว (Boundary Layer) เป็นต้น

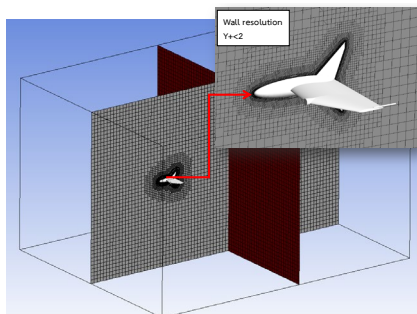
1.2) เทอร์บูเลนต์ โมเดลชนิดนี้ เป็นเทอร์บูเลนต์โมเดลแบบถูกผสมซึ่งได้ถูกออกแบบจากการนำเอาข้อดี ระหว่างเทอร์บูเลนต์ โมเดลแบบ Standard k- ω และเทอร์บูเลนต์ โมเดลแบบตระกูล k- ϵ กล่าวคือ เทอร์บูเลนต์ โมเดลแบบ Standard k- ω สามารถแก้ปัญหการไหลได้ดีในชั้นซิดผิว และข้อดีของเทอร์บูเลนต์ โมเดลแบบตระกูล k- ϵ ที่สามารถแก้ปัญหได้ดีในชั้นการไหลนอกชั้นซิดผิว นั่นเป็นเหตุผลว่าทำไมเทอร์บูเลนต์โมเดลชนิดนี้ถึงได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง

เพื่อแก้ระบบสมการเชิงตัวเลขของสมการ RANS ในรูปแบบ 3 มิติ ตารางที่เป็นระเบียบ (Structured grid) ได้ถูกสร้างรอบอากาศยานโดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench 16.0 ดังรูปที่ 14 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของตารางอยู่ในบริเวณส่วนหน้า ส่วนท้าย และบริเวณใกล้ชั้นซิดผิว ทั้งนี้เพื่อสามารถคำนวณรายละเอียดของชั้นซิดผิวแบบเทอร์บูเลนต์ได้ โดยเฉพาะรายละเอียดของ Laminar Sub-Layer ที่อยู่ในชั้นซิดผิวแบบ เทอร์บูเลนต์จะมีความยากและซับซ้อนในการคำนวณอย่างละเอียด อย่างไรก็ตามเพื่อให้ค่าความถูกต้องของชั้นซิดผิวมีความแม่นยำมากขึ้นโดยใช้เทอร์บูเลนต์ SST k- ω ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ ค่า y^+ ที่คำนวณได้ ถูกกำหนดให้มีค่าตามเงื่อนไข $y^+ < 2$ ดังนั้นความห่างของรูปแบบตาข่าย หรือ

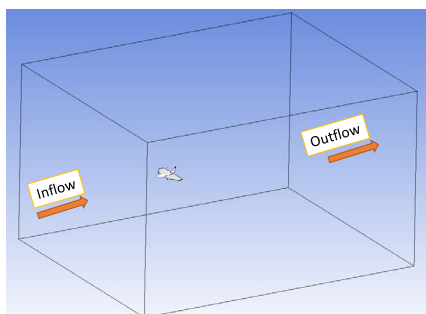
เซลล์ (Cells) ในชั้นแรกที่ตั้งกับผิวอากาศยานจึงมีค่าประมาณ 10^{-5} mm และสำหรับชั้นต่อไปของ Cells จะมีอัตราส่วนการยืดออก (Stretching Ratio) อยู่ประมาณ 1.25

สำหรับการสร้างโดเมนการไหลของกระแสอากาศ ในงานวิจัยนี้กำหนดระยะห่างจากขอบเขตโดเมนการไหลเข้าของอากาศ (Inflow) ถึงส่วนหน้าของปีกจะมีค่าประมาณ 10 เท่าของความยาว Chord เฉลี่ย และระยะจากส่วนท้ายปีก ถึงขอบเขตโดเมนการไหลออกของอากาศ (Outflow) จะมีค่าประมาณ 25 เท่าของความยาว Chord เฉลี่ย ตามลำดับ

การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการไหลของโปรแกรมคำนวณอากาศพลศาสตร์ เป็นดังรูปที่ 15 เงื่อนไขและขอบเขตการไหลเข้าและออกของอากาศ (Inflow and Outflow Boundaries) ถูกตั้งค่าโดยใช้อ้างอิงของค่ามาตรฐานของความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่ระดับน้ำทะเล (101,325 Pa, 288 K) ในย่านเลขเรย์โนลด์ ($3 \times 10^5 - 5 \times 10^5$) ที่มุมปะทะ -4 ถึง 18 องศา



รูปที่ 14 การสร้างกริดรอบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่ง



รูปที่ 15 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการไหลของกระแสอากาศ

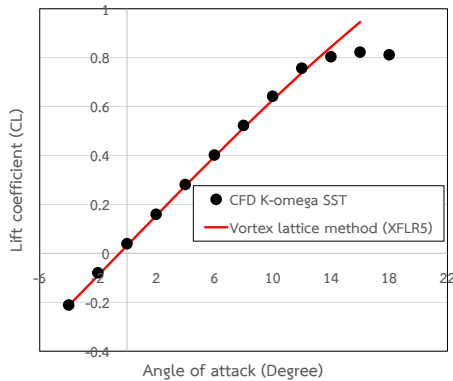
สำหรับค่า Turbulent Intensity และค่าอัตราส่วนความหนืด (Viscosity Ratio) ที่เงื่อนไขการไหลเข้าของอากาศ (Inflow) จะกำหนดตั้งค่าเป็น 0.05 % และ 2 ตามลำดับ โดยค่าเหล่านี้ ถูกกำหนดในเงื่อนไขของคุณสมบัติอากาศในชั้นบรรยากาศมาตรฐานที่ได้จากแหล่งข้อมูลอ้างอิง [4],[5] และในส่วนที่ผิวของโมเดล ถูกกำหนดค่าแบบความเร็วอากาศเป็นศูนย์ (No-Slip Condition) และอุณหภูมิผิวคงที่ (Isothermal 288 K)

2) ผลลัพธ์การวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงทางดิ่งประเภททางดิ่ง

2.1) ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient, CL)

รูปที่ 16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะที่ได้จากโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์และโปรแกรม XFLR5 [17] จากรูปนี้พบว่า ผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากการคำนวณทั้ง 2 วิธีมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันเกือบตลอดทุกมุมปะทะโดยมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นที่มุมปะทะสูงๆใกล้มุมปะทะวิกฤติ ซึ่งผลลัพธ์ของการคำนวณทั้งสองวิธีมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีการแยกตัวของกระแสอากาศทำให้การคำนวณโดยใช้วิธีวอร์เทกซ์แลตทิซ [21] ที่มีสมมติฐานหลักการคำนวณบนพื้นฐานของการไหลแบบไร้ความหนืดไม่สามารถคำนวณการไหลในย่านนี้ได้

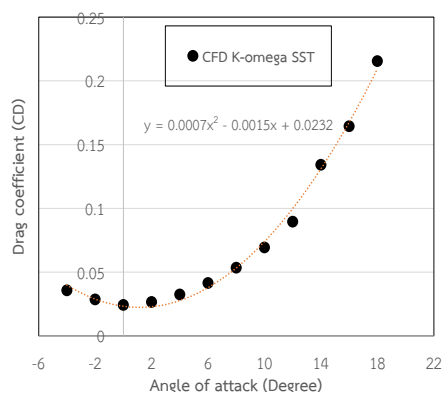
เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในกราฟ พบว่า ที่มุมปะทะ -1 องศา สัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงยกที่ออกแบบไว้ หรือ Design Lift coefficient (Design CL = 0.65) ในเงื่อนไขการบินเดินทางที่ความเร็ว 16 m/s มีมุมปะทะในการบินที่ 8-10 องศา สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด เกิดขึ้นที่มุมปะทะ 16 องศา โดยมีค่าประมาณ 0.82 ซึ่งเป็นมุมปะทะที่ทำให้อากาศยานเริ่มมีอาการสั่นเนื่องจากการแยกตัวของกระแสอากาศบนผิวปีก



รูปที่ 16 ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะ

2.2) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient, CD)

รูปที่ 17 เป็นผลลัพธ์ของสัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับมุมปะทะที่คำนวณได้จากโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล จากรูปนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมปะทะ โดยมีเส้นโปรไฟล์เป็นรูปพาราโบลาอย่างชัดเจน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำสุดเกิดที่มุมปะทะ 0 องศา ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของโปรไฟล์รูปแบบพาราโบลา และจุดนี้มีสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.0232 ในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเป็นศูนย์ (Zero-lift drag coefficient, C_{D0}) มีค่าเท่ากับ 0.02442 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการประมาณค่าเริ่มต้นอากาศพลศาสตร์ในตารางที่ 5 จะพบว่ามีความแตกต่างกันไม่เป็นนัยสำคัญ โดยมีค่าประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างในตารางที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าเริ่มต้นของค่า C_{D0} โดยอ้างอิงจากข้อมูลทางสถิติของอากาศยานแบบปีกบินมีความแม่นยำและเชื่อถือได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณสมรรถนะบินทนนานของอากาศยานไว้คนขับ



รูปที่ 17 ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับมุมปะทะ

ตารางที่ 9 ตารางการเปรียบเทียบค่า Zero-lift drag coefficient

Parameters	Initial estimation	CFD	% Dif.
C_{D0}	0.025	0.0242	3.3

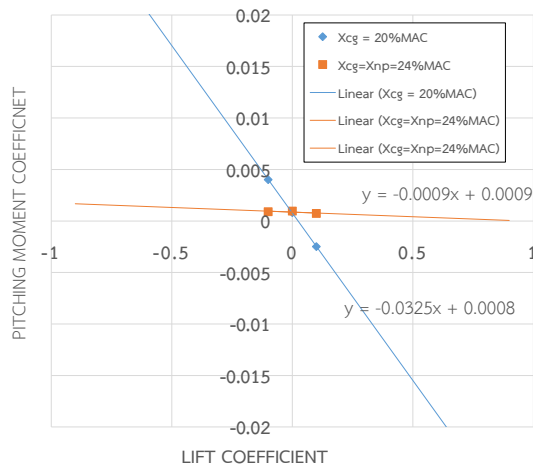
2.3) การวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัว (Longitudinal Static Stability)

การวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัว สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าอนุพันธ์ของโมเมนต์รอบจุดศูนย์ถ่วงของอากาศยานเทียบกับมุมปะทะ โดยอากาศยานจะมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวต้องอยู่ในเงื่อนไข $\frac{\partial C_m}{\partial \alpha} < 0$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของอากาศยานมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวคอร์ดเฉลี่ย ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวในเบื้องต้นการวิเคราะห์หาจุดสะเทินของอากาศยาน และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบจุดศูนย์ถ่วงเทียบกับมุมปะทะมีแสดงในรูปที่ 18

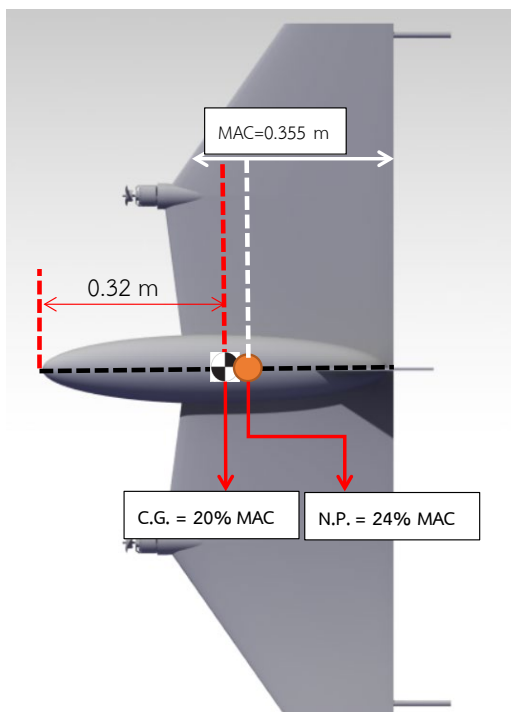
จากรูปนี้ พบว่า จุดสะเทิน (Neutral point) มีตำแหน่งอยู่ที่ 24 เปอร์เซ็นต์ของความยาวคอร์ดเฉลี่ย โดยสามารถสังเกตได้จากกราฟโมเมนต์รอบจุดนี้ของอากาศยานมีค่าความชันเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งเมื่อเทียบกับกราฟโมเมนต์รอบจุดศูนย์ถ่วงของอากาศยานที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวคอร์ดเฉลี่ย จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น โดยกราฟมีค่าความชันเท่ากับ -0.0325 rad^{-1} นอกจากนี้จากรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่าจุดสะเทินอยู่หลังจุดศูนย์ถ่วง ซึ่งมีระยะ Static Margin ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ของความยาวคอร์ดเฉลี่ย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์โมเมนต์หวั้บรอบจุดศูนย์ถ่วง มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวของอากาศยานไว้คนขับ

นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ความสามารถการทริม (Trim ability) ของอากาศยาน โดยการปรับพื้นบังคับควบคุม (Elevons) ขึ้นเพื่อทริมในมุมต่างๆ ประกอบด้วย 1.5-4.5 องศา จากการคำนวณพบว่า การปรับทริมของพื้นบังคับควบคุมที่ 4.5 องศา ทำให้อากาศยานมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเป็น 0.65 ซึ่งเป็นสภาวะการบินตรงระดับที่กำหนดไว้ในความต้องการ

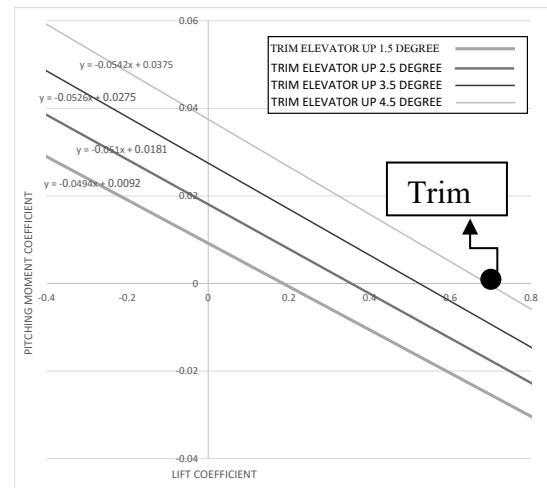
ตั้งแต่ต้น ตามรูปที่ 20 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ออกแบบไว้ ในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดในสภาวะการtrimมีค่า 0.78 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า อากาศยานไร้คนขับทางตั้งต้นแบบมีความสามารถในการtrimในสภาวะการบินตรงระดับได้



รูปที่ 18 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวตั้งประเภททางตั้ง



รูปที่ 19 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของอากาศยานไร้คนขับ

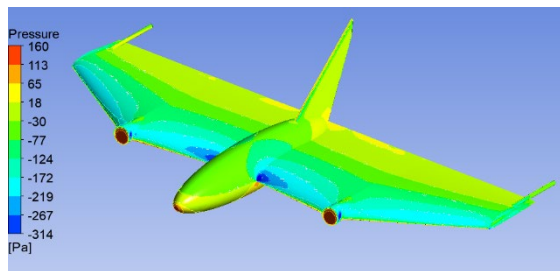


รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์โมเมนต์เทียบกับสัมประสิทธิ์แรงยกเมื่อมีการปรับtrimแพนหางขึ้นลง (Elevons) ที่มุม 1.5, 2.5, 3.5 และ 4.5 องศา

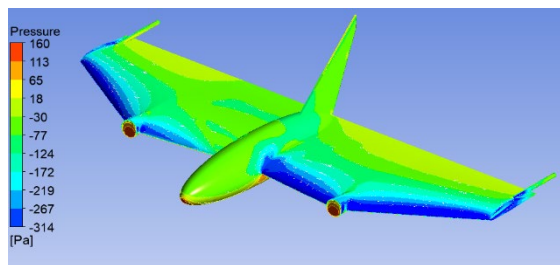
2.4) การวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์เชิงคุณภาพของการจำลองรูปแบบการกระจายความดันและการจำลองการไหลของกระแสอากาศ (Pressure Contour and Flow Visualization)

รูปที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันบนพื้นผิวของอากาศยานในรูปแบบของระดับสี ในสภาวะการบินตรงระดับที่มุมปะทะ 8 และ 14 องศา โดยผลลัพธ์ตัวเลขความดันที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD คือ Pressure Difference, $P - P_{atm}$ ซึ่งก็คือความแตกต่างระหว่างความดันที่ผิวของอากาศยานและความดันบรรยากาศรอบข้างในสภาวะการบินที่กำหนด จากรูปแสดงให้เห็นที่มาของการเกิดแรงยก โดยการสังเกตระดับสีของความแตกต่างการกระจายความดันที่ผิวปีกด้านบนและผิวปีกด้านล่าง ซึ่งการกระจายความดันของผิวปีกด้านล่างจะมีค่าที่สูงกว่าผิวปีกด้านบนจึงส่งผลให้เกิดแรงยก นอกจากนี้ เมื่อสังเกตระดับสีบริเวณผิวปีกด้านบนในสภาวะการบินตรงระดับที่มุมปะทะสูง คือ 14 องศา (ดังรูป 21(ข)) จะพบว่าบริเวณผลต่างความดันที่มีค่าติดลบมีพื้นที่มากกว่าสภาวะการบินตรงระดับที่ 8 องศาอย่างชัดเจน (ดังรูปที่ 21(ก)) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงยกของ 2 สภาวะการบินตรงระดับได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ การกระจายความดันในรูปแบบการแบ่งระดับสี ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงที่มาของความแตกต่างของแรงดันในส่วนประกอบต่าง ๆ ของอากาศ

ยานที่ส่งผลต่อสมรรถนะอากาศยานของอากาศยานทั้งลำ ยกตัวอย่างเช่น แรงต้านที่เกิดขึ้นที่แทนวาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งมีลักษณะรูปทรงมู่ทุ้งรูปที่ 21 โดยสามารถสังเกตได้จากความดันสูงอย่างมีนัยสำคัญของการกระจายความดันบนพื้นที่บริเวณแทนวาระ ความแตกต่างระหว่างความดันนี้จะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดแรงต้าน ซึ่งแรงต้านนี้ถูกเรียกว่า แรงต้านเนื่องจากความดัน หรือ Form Drags



(ก)

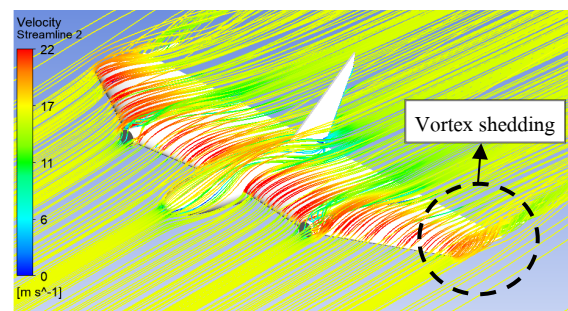


(ข)

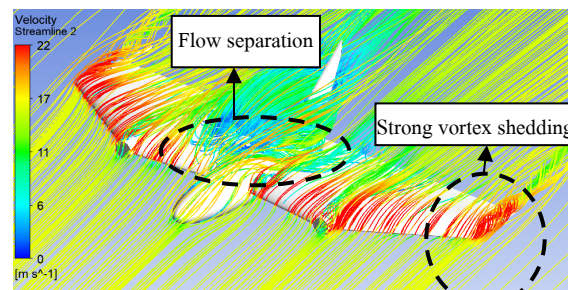
รูปที่ 21 การกระจายความดันบนพื้นผิวของอากาศยานไร้คนขับที่สภาวะการบิน 2 รูปแบบ (ก) มุมปะทะ 8 องศา และ (ข) มุมปะทะ 14 องศา

รูปที่ 22 แสดงการจำลองไหลของกระแสอากาศผ่านแนวกางปีกของอากาศยานในสภาวะการบินตรงระดับระดับที่มุมปะทะ 8 และ 14 องศา จาก รูปที่ 22(ก) แสดงให้เห็นถึงกระแสอากาศที่ไหลราบเรียบเกาะผิวปีกด้านบนและวอร์เทกซ์ที่เกิดขึ้นที่ปลายปีกของอากาศยานโดยวอร์เทกซ์นี้เป็นตัวแปรสำคัญของแรงต้านเหนี่ยวนำ (Induced Drag) ในขณะที่ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลของกระแสอากาศผ่านปีกอากาศยานในเงื่อนไขการบินในมุมปะทะที่สูงขึ้นใกล้มุมปะทะวิกฤตที่ 14 องศา ดังรูปที่ 22(ข) จากรูปนี้จะพบว่ากระแสอากาศเกิดการไหลแยกตัวไม่เกาะกับผิวปีกและเกิดการไหลย้อนกลับ ม้วนตัวของกระแสอากาศตรงบริเวณผิวโคนปีกด้านบนอย่างเห็น ได้ชัด ซึ่งรูปแบบ

การไหลแยกตัวของกระแสอากาศจะเป็นสาเหตุหลักของสภาวะร่วงหล่นของอากาศยาน โดยลักษณะพฤติกรรมของอาการสะตอลจะเริ่มจากพื้นที่โคนปีกไปยังปลายปีก นอกจากนี้ ที่มุมปะทะสูงขึ้นจะพบว่า วอร์เทกซ์ที่ปลายปีกจะมีกำลังค่อนข้างสูง (Strong Vortex) เมื่อเปรียบเทียบกับมุมปะทะที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน



(ก)



(ข)

รูปที่ 22 การจำลองการไหลของกระแสอากาศผ่านผิวปีกของอากาศยานไร้คนขับที่ที่สภาวะการบิน 2 รูปแบบ (ก) มุมปะทะ 8 องศา และ (ข) มุมปะทะ 14 องศา

3. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เสนอกระบวนการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง ที่มีความง่าย ไม่ซับซ้อน และมีวิธีการแบบตรงๆ ในระเบียบวิธีการออกแบบเชิงหลักการอย่างเป็นขั้นตอนตามแผนผังกระบวนการดังรูปที่ 1 ซึ่งกระบวนการนี้มีหัวใจสำคัญคือกระบวนการสร้างกราฟขอบเขตสมรรถนะอากาศยานสำหรับเลือกจุดที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอากาศยานไร้คนขับขึ้น-ลงแนวดิ่งประเภทหางตั้ง โดยการรวมกราฟสมการขอบเขตสมรรถนะของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนและปีกตรึงเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายในการสร้าง

พื้นที่ที่เป็นไปได้ในการออกแบบอากาศยานแบบปีกหมุนและปีกตรึง ตามลำดับ

ซึ่งผลลัพธ์จากระเบียบวิธีการออกแบบเชิงหลักการแสดงให้เห็นถึงความง่ายและความรวดเร็วในการเลือกจุดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำหนดขนาดรูปร่างอากาศยานไร้คนขับ และกำลังขับของระบบขับเคลื่อนอากาศยานโดยใช้การคำนวณแบบวนซ้ำเพียงจำนวน 4 รอบ ซึ่งสามารถได้ขนาดและรูปร่างของอากาศยานไร้คนขับที่ตอบโจทย์ความต้องการของภารกิจได้ โดยปราศจากความซับซ้อนของกระบวนการออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการหาคู่ที่เหมาะสมโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์อย่างละเอียดโดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เข้ากับระเบียบวิธีการออกแบบเชิงหลักการ ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความเชื่อถือได้ของผลลัพธ์กระบวนการออกแบบ โดยการเปรียบเทียบเปรียบเทียบกับค่าประมาณค่าเริ่มต้นอากาศพลศาสตร์โดยเฉพาะค่า C_{D0} ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบจะพบว่ามีค่าความแตกต่างกันไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าเริ่มต้นของค่า C_{D0} โดยอ้างอิงจากข้อมูลทางสถิติของอากาศยานแบบปีกบินมีความแม่นยำและเชื่อถือได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณสมรรถนะบินทนนานของอากาศยานไร้คนขับ นอกจากนี้กระบวนการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์เชิงลึกทั้งในรูปแบบเชิงปริมาณและคุณภาพยังสามารถแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการออกแบบอากาศยานไร้คนขับที่สามารถบินปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพในเบื้องต้นรวมถึงสามารถทำการกิจได้ตรงกับความต้องการได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. L. Forshaw and V. J. Lappas, "Architecture and systems design of a reusable Martian twin rotor tailsitter," *Acta Astronautica*, vol. 80, pp. 166–180, 2012, doi: 10.1016/j.actaastro.2012.05.008.
- [2] R. H. Stone, "The T-wing tail-sitter unmanned air vehicle: from design concept to research flight vehicle," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 218, no. 6, pp. 417–433, 2004, doi: 10.1243/0954410042794920.
- [3] K. C. Wong, J. A. Guerrero, D. Lara and R. Lozano, "Attitude stabilization in hover flight of a mini tail-sitter UAV with variable pitch propeller," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '07)*, San Diego, CA, USA, 2007, pp. 2642–2647, doi: 10.1109/IROS.2007.4399278.
- [4] M. Aksugur and G. Inalhan, "Design methodology of a hybrid propulsion driven electric powered miniature tailsitter unmanned aerial vehicle," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 57, no. 1–4, pp. 505–529, 2010, doi: 10.1007/s10846-009-9368-0.
- [5] C. D. Wagter, D. Dokter, G. D. Croon and B. Remes, "Multilifting-device UAV autonomous flight at any transition percentage," in *Proc. European Guidance, Navigation, and Control Conference (EuroGNC '13)*, Delft, The Netherlands, 2013.
- [6] D. Zhang, Z. Chen and J. Lv, "Lift System Design of Tail-Sitter Unmanned Aerial Vehicle," *Intelligent Control and Automation*, Vol. 3 No. 4, pp. 285–290, 2012, doi: 10.4236/ica.2012.34033.
- [7] R. H. Stone, "Configuration design of a canard configured tail sitter unmanned air vehicle using multidisciplinary optimization," Ph.D. thesis, Dept. Aerodynamics Eng. , Univ. Sydney, 1999.
- [8] B. Wang, Hou, Z., Liu, Z., Chen, Q., & Zhu, X. (2016). Preliminary Design of a Small Unmanned Battery Powered Tailsitter. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016.
- [9] L. Sawatdipon, C. Thipyopas, V. Sripawadkul, and T. Chayanon, "A preliminary design by using optimization for tail-sitter VTOL UAV," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 4, pp. 600–611, 2020.
- [10] Raymer D, "Sizing from a Conceptual Sketch Aircraft," in *Design: A Conceptual Approach*, 5th ed.

- Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012, ch 3–6, pp. 11–113.
- [11] G. Landolfo, “Aerodynamic and Structural Design of a small Nonplanar Wing UAV,” M.S. Thesis, Dept Aerospace Eng., Univ. Dayton, Dayton, OH, USA, 2008.
- [12] W. Johnson, “Vertical Flight I,” in *Helicopter theory*. New York, NY, USA: Dover Publications; 1980, ch 2–7, pp. 28–340.
- [13] A. M. Kamal and A. Ramirez-Serrano, “Design methodology for hybrid (VTOL + Fixed Wing) unmanned aerial vehicles,” *Aeronautics and Aerospace Open Access Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 165–176, 2018, doi: 10.15406/aoaj.2018.02.00047
- [14] X. Lyu, H. Gu, Y. Wang, Z. Li, S. Shen and F. Zhang, “Design and implementation of a quadrotor tail-sitter vtol uav,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Bayfront Ave, Singapore, 2017, pp. 3924–3930 doi: 10.1109/ICRA.2017.7989452.
- [15] LiPo 16,000 6S 22.2v Battery Pack, MaxAmps, Date Mon. [online] Available: <https://www.maxamps.com/lipo-16000-6s-22-2v-battery-pack>, (accessed: Aug. 20, 2020).
- [16] MH82, MH45, MH46 and S5010, UIUC Airfoil Coordinates Database, Aug. 2020, [Online] Available: https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html.
- [17] A. Deperrois. XFLR5 Analysis of foils and wings operating at low Reynolds numbers. Guidelines for QFLR5 v0.03, 2009. Accessed: Sep. 15, 2020 [Online]. Available: https://engineering.purdue.edu/~aerodyn/AAE333/FALL10/HOMEWORKS/HW13/XFLR5_v6.01_Beta_Win32%28%29/Release/Guidelines.pdf
- [18] R. Martínez-Val, and E. Schoep, “Flying wing versus conventional transport airplane: the 300-seat case,” in *Proc. 22nd Congress of International Council of the Aeronautical Sciences*, Harrogate, United Kingdom, CD-ROM, pp. 113.1–113.12, 2000.
- [19] M. V. Cook, “Static Equilibrium and Trim,” in *Flight Dynamics Principles*, Burlington, MA, USA: Elsevier, 1997, ch 3, pp. 32–57.
- [20] A. N. Stender, “Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight,” Ph.D. dissertation, ETH Zurich, Citizen of Zumholz, Switzerland, 2008.
- [21] P. Konstadinopoulos, D. F. Thrasher, D. T. Mook, A. H. Nayfeh and L. Watson, “A vortex-lattice method for general, unsteady aerodynamics,” *AIAA Journal*, vol. 22, no. 1, 1985, doi: 10.2514/3.45078.
- [22] F. R. Menter, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 269–289, 1994, doi: 10.2514/3.12149.

อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อความหยาบผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ โดยใช้ วิธีการออกแบบส่วนผสมและพื้นผิวตอบสนอง

Optimal Composition on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites Using Mixture Design and Response Surface Methodology

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

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

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

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

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

Received: Sep 24, 2021; Revised: Dec 02, 2021; Accepted: Dec 08, 2021

บทคัดย่อ

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM) ถูกนำมาใช้เพื่อการออกแบบและการทำนายสูตรการผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ จากผลการทดลอง พบว่า สัดส่วนการผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและขี้เลื่อยไม้ยางพารามีผลต่อสมบัติทั้งหมดของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour plot) และเทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟ (Overlay plot) แสดงผลการทำนายที่เหมาะสมของสมการถดถอยของการตอบสนองทั้งหมด พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) และทิลคัม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคู่ เท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือเท่ากับ 93.60% และเพื่อยืนยันความถูกต้องของการทดลองและค่าการตอบสนอง ผลการทดลองมีการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทำนายและการทดลองจริง ผลการทดลอง พบว่า มีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองจริงของผลการตอบสนอง โดยการทำนายมีความผิดพลาด 1.25% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด คือ 1.24 จากการทดสอบการบวมน้ำ ตามลำดับ

คำสำคัญ: การออกแบบส่วนผสม, ขี้เลื่อยไม้ยางพารา, ทิลคัม, ความหยาบผิว, การดูดซับน้ำ

Abstract

Mixture design and response surface methodology (RSM) were used to design and predict the optimal formulation of wood-plastic composites. The results show that the recycled high density polyethylene (rHDPE) and rubberwood sawdust (RWS) significantly affected on all of the properties for composite materials. Additionally, the contour plot and overlay plot showed the optimal prediction of regression model for all of the responses. The optimal formulation was 55.0

wt% rHDPE, 35.0 wt% RWS, and 6.0 wt% TC, and the constant of MAPE and WAX were 3.0 wt% and 1.0 wt% with desirability of 93.60%. To confirm the validity of the experimental and the response values, the comparison of the responses from the prediction and the actual experiment was investigated. The experimental results were found to be in a good agreement between the predicted and observed results from RSM within a 1.25% error with highest standard deviation of 1.24 from thickness swelling testing, respectively.

Keywords: Mixture design, Rubberwood sawdust, Talcum, Surface roughness, Water absorption

1 บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิชาการและอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมและกำลังเติบโตในอุตสาหกรรมของเล่น เฟอร์นิเจอร์ และการก่อสร้าง [1] WPCs สามารถผลิตได้โดยการนำพลาสติก เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) ผสมกับเส้นใยธรรมชาติ เรียกว่า วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นอกจากนี้ สามารถใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ใน WPCs เพื่อช่วยในการผสม เพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และความร้อน ให้ดียิ่งขึ้น [2],[3]

กระบวนการขึ้นรูป WPCs สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การอัดรีด (Extrusion) การอัดร้อน (Hot press) และการฉีด (Injection) เป็นต้น [4] WPCs สามารถใช้งานได้หลากหลายลักษณะงาน เช่น งานด้านโครงสร้าง และงานตกแต่งอาคารสถานที่ ดังนั้น WPCs จึงต้องมีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อแรงเสียดทาน ทนต่อการสึกหรอ และทนต่อสภาพแวดล้อม [5] ความต้องการของ WPCs ในปัจจุบันมีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ มีความทนทาน ด้านทานเชื้อราสูง ดูดซับน้ำน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ [6],[7] WPCs จัดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีความสนใจใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้โดยใช้เส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ทั่วไปเป็นส่วนผสม และสามารถนำพืชหรือวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต อาทิเช่น ขี้เลื่อยไม้ เพื่อใช้ในการเสริมแรงใน WPCs [8]

พลาสติก (Plastics) เป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น [9] โดยทั่วไปพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

ด้วยกัน คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermoset) ซึ่งพลาสติกที่ได้รับความสนใจและมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรม คือ พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ ทนความร้อนสูง สามารถนำไปขึ้นรูปและใช้งานในลักษณะต่างๆ ได้ดี เช่น บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ พลาสติกเหล่านี้ยังมีความสมบัติเชิงกลเหนียว ทนต่อแรงดึง และทนต่อแรงกระแทกได้ดี และสามารถรีไซเคิลได้ (Recycled) [10],[11] ดังนั้น พลาสติกรีไซเคิลจึงมีความเหมาะสมในการนำมาวิจัยและประยุกต์ใช้งานเพื่อทดแทนหรือลดการใช้พลาสติกบริสุทธิ์ สามารถลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ ลดภาระการกำจัดขยะ (Landfills) ของชุมชนและเทศบาล และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่พลาสติกรีไซเคิล [12]

วัสดุเสริมแรงที่นำมาใช้ในการผสมกับพลาสติก คือ ขี้เลื่อยไม้ ซึ่งไม้ในธรรมชาติจะมีปริมาณลดลงเป็นอย่างมากเนื่องจากความต้องการทางสังคม เศรษฐกิจ และอุตสาหกรรม ส่งผลทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตนั้นมีจำนวนเพิ่มขึ้นเช่นกัน [13],[14] โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ที่ใหญ่ที่สุดในโลก และในพื้นที่ภาคใต้ของไทยไม้ยางพาราเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเฟอร์นิเจอร์ ไม้อัด และไม้ปาร์ติเคิล ซึ่งในกระบวนการผลิตดังกล่าวจะมีของเสียที่อยู่ในรูปของขี้เลื่อยไม้หรือผงไม้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูป ทำให้ในปัจจุบันมีการนำมาใช้ประโยชน์โดยการนำไปผลิตเป็นไม้แผ่นชนิดต่างๆ เช่น แผ่นใยไม้อัดแข็ง (Hardboard) และแผ่นเอ็มดีเอฟ (Medium Density Fiber Board; MDF) เป็นต้น [15]

สารเติมแต่งที่ถูกเติมเข้าไปใน WPCs ด้วยปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณพลาสติกและไม้ เพื่อเป็นการปรับเปลี่ยนสมบัติให้เหมาะสมในการผลิตและการใช้งานของ WPCs โดยปกติสารเติมแต่งนี้จะเข้าไปกระจายอยู่ในเนื้อของวัสดุ โดยทางกายภาพแล้วจะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญของ WPCs [16] ซึ่งสารเติมแต่งจะมีลักษณะเฉพาะที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของ WPCs ทำให้วัสดุมีการไหลตัวที่ดี มีการยึดเกาะที่ดี มีการต้านทานความร้อนและมีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ สารเติมแต่งบางประเภทที่เมื่อเติมเข้าไปใน WPCs แล้วทำให้มีผลต่อสมบัติเชิงกล กายภาพ และการดูดซับน้ำ เพิ่มมากขึ้น เช่น ทัลคัม (Talcum) เป็นต้น [14],[17]

เนื่องจาก WPCs มีส่วนประกอบหลัก คือ พลาสติกและไม้ ดังนั้น เมื่อมีการใช้งานในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดความไม่แน่นอนในการนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขสถานที่โล่งแจ้งหรือบริเวณที่มีความชื้นสูง ทำให้มีข้อจำกัดต่อการใช้งาน และเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อ WPCs คือ อุณหภูมิ ความชื้น และเวลา ส่งผลให้ WPCs มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุ [18],[19] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของ WPCs ที่มีความเหมาะสม ซึ่งวัสดุผสมมีส่วนผสมหลัก คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ขี้เลื่อยไม้ยางพารา ทัลคัม และสารเติมแต่งเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และช่วยในการผสม คือ สารกั่วควบ และสารหล่อลื่น โดยทำการออกแบบการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบของ D-Optimal ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมในออกแบบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการทดลอง โดยการกำหนดผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 100% อีกทั้งสามารถลดสภาวะในการทดลองได้อีกด้วย [11],[20] จากนั้น ทำการทดสอบความหยาบผิว (R_a และ R_z) การดูดซับน้ำ และการบวมน้ำ หลังการอิมมิดีจาก การดูดซับน้ำระยะเวลา 3 เดือน เนื่องจาก ปัจจัยของส่วนผสมและระยะเวลาในการแช่น้ำส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมสภาพบริเวณพื้นผิวของ WPCs ดังนั้น การวัดความหยาบผิวจึงเป็นวิธีการสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของ WPCs ที่มีส่วนผสมและสภาวะที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่มีความชื้นสูงได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังเป็นการสนับสนุนการใช้วัสดุรีไซเคิลและวัสดุที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้งานจากวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต เพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ ลดขยะที่เกิดขึ้นในสังคม และลดการเผาไหม้ที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม

2 วัสดุและวิธีการดำเนินงาน

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อหาสูตรการผสมที่เหมาะสมของ WPCs คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (Recycled high density polyethylene; rHDPE) ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood sawdust; RWS) และ ทัลคัม (Talcum; TC) โดยกำหนดสารควบคู่ (Polyethylene grafted maleic anhydride; MAPE) และสารหล่อลื่น (Paraffin wax; WAX) เป็นค่าคงที่ [11],[20] ซึ่งมีช่วงอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1 ก่อนการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh (< 180 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการอบด้วยอุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [11],[14] เพื่อลดความชื้นในขี้เลื่อยไม้ จากนั้น ทำการชั่งเก็บไว้เพื่อรอการผสมในขั้นตอนต่อไป

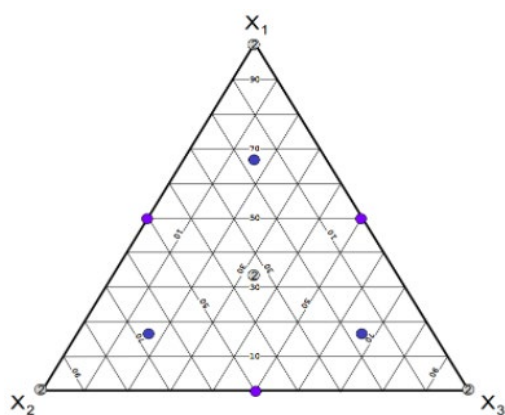
ตารางที่ 1 ช่วงของอัตราส่วนผสมในการทดลอง

Compositions	Ratios (wt%)
rHDPE (X_1)	$45.0 \leq X_1 \leq 55.0$ [5],[13]
RWS (X_2)	$35.0 \leq X_2 \leq 45.0$ [10],[14]
TC (X_3)	$5.0 \leq X_3 \leq 10.0$ [14]
MAPE (X_4)	3.0 [10],[11],[20]
WAX (X_5)	1.0 [10],[11],[20]

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบของ D-Optimal ซึ่งเป็นการออกแบบโดยการกำหนดช่วงอัตราส่วนผสมของการ

ทดลองและรวมอัตราส่วนทั้งหมด 100% โดยน้ำหนัก (wt%) [10],[11] ซึ่งมุมทั้ง 3 ของสามเหลี่ยม ประกอบด้วย พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) ซีลี้อยไม้ยางพารา (X_2) และทลั้ม (X_3) แสดงดังรูปที่ 1 โดยกำหนด สารควบ (X_4) และสารหล่อลื่น (X_5) เป็นค่าคงที่ [11],[20] ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA), Distributed by John Wiley & Sons, Inc. มีการออกแบบการทดลองทั้งหมด 16 สูตร (Run) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ซีลี้อยไม้ยางพาราและทลั้ม ในส่วนของสารควบและสารหล่อลื่นถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) เพื่อวิเคราะห์ค่าปัจจัยหลักปัจจัยร่วม และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เพื่อทำนายผลการทดลองและหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ WPCs



รูปที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และตำแหน่งของอัตราส่วนผสม
ปรับปรุงภาพจาก [21]

2.3 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

การขึ้นรูปตัวอย่างการทดสอบ WPCs แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 คือ การขึ้นรูปเม็ด WPCs โดยการนำส่วนผสมทั้งหมดลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น SHJ-36 จากบริษัท เอ็นแมช จำกัด (นนทบุรี ประเทศไทย) มีการควบคุมอุณหภูมิ

หลอมเหลว 7 ช่วง ระหว่าง 170–200°C ความเร็วรอบของเกลียวหนอน คือ 50 รอบ/นาที จากนั้น ทำการตัดเม็ด WPCs ให้มีขนาด 2–3 มม. เพื่อเตรียมการกดอัด

ขั้นตอนที่ 2 คือ การผลิตแผ่น WPCs โดยการนำเม็ด WPCs เลงไปลงในเครื่องอัดร้อน (Compression molding machine) ซึ่งมีขนาดแม่พิมพ์ คือ 15 ซม. × 25 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2 มีการควบคุมอุณหภูมิหลอมเหลว 190°C เป็นเวลา 20 นาที ประกอบด้วย การอุ่นแม่พิมพ์ (Pre-heating) เป็นเวลา 5 นาที กดอัด (Compress) เป็นเวลา 10 นาที และหล่อเย็นด้วยอากาศ (Air cooling) เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้น ทำการตัดแผ่น WPCs ตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละประเภท



รูปที่ 2 การเตรียมเม็ด WPCs ในแม่พิมพ์ก่อนการกดอัด

2.4 การทดสอบความหยาบผิว

การวัดความหยาบผิวเป็นการทดลองตามมาตรฐาน โดยทำการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Average roughness; Ra) และความหยาบขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness ten-point mean; Rz) ด้วยเครื่องทดสอบความหยาบผิว (Surface Roughness Tester) รุ่น SRT-6200 จากบริษัท นิโอเน็กซ์ จำกัด ประเทศไทย โดยมีค่า Cut-off length ในการวัดความหยาบผิว คือ 0.8 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยทำการทดสอบก่อนและหลังการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 3 เดือน ตั้งแต่ วันที่ 1 เมษายน–30 มิถุนายน 2564 ซึ่งเป็นเวลาการอิมตัวของ WPCs ที่ได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้ [14],[20] โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบ คือ 30 มม. × 30 มม. × 4.8 มม. ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกรอบเพื่อลดความชื้นด้วยอุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชม.ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าผลการทดลองเพื่อการสรุปผล



รูปที่ 3 ชิ้นงานตัวอย่างและการทดสอบความหนาผิว

ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 3 เดือน ก่อนการแช่น้ำมีการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทันทีด้วยเครื่องชั่งและวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล หลังจากชิ้นงานถูกแช่ครบระยะเวลา 3 เดือน ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ชั่งน้ำหนักด้วยกระดาศยที่ชั่ง และถูกชั่งน้ำหนักและวัดความหนาทันที เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักและความหนาหลังจากการดูดซับน้ำ

2.5 การทดสอบการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption; WA) และการบวมน้ำ (Thickness swelling; TS) เป็นการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 570-88 ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างมีขนาด 30 มม. × 30 มม. × 4.8 มม. แสดงดังรูปที่ 4 ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อลดความชื้นในชิ้นงาน จากนั้น ทำการแช่ชิ้นงาน



รูปที่ 4 ชิ้นงานตัวอย่างและการทดสอบการดูดซับน้ำ

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) และค่าผลการตอบสนอง

Run	Mixture Components fractions (wt%)					Before WA		After WA		WA	TS
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)	(%)	(%)
1	50.9	35.1	10.0	3.0	1.0	1.14	3.41	2.52	7.16	5.10	2.22
2	53.1	37.9	5.0	3.0	1.0	1.06	3.20	2.39	7.36	4.96	2.19
3	49.8	39.5	6.7	3.0	1.0	1.36	4.08	3.16	9.87	6.43	3.59
4	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	0.99	2.98	2.10	6.36	4.78	1.89
5*	50.9	35.1	10.0	3.0	1.0	1.10	3.29	2.42	7.55	5.12	2.30
6	50.3	37.9	7.8	3.0	1.0	1.11	3.35	2.49	7.78	5.34	2.37
7	45.0	45.0	6.0	3.0	1.0	1.42	4.29	3.12	11.75	8.71	5.85
8*	45.0	45.0	6.0	3.0	1.0	1.41	4.22	3.10	10.68	8.69	5.80
9*	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	0.98	2.84	2.12	5.61	4.87	2.02
10*	49.8	39.5	6.7	3.0	1.0	1.18	3.52	2.70	8.42	5.56	2.71
11	47.8	43.2	5.0	3.0	1.0	1.28	3.84	2.98	9.34	7.01	4.19
12	45.0	41.0	10.0	3.0	1.0	1.33	4.03	2.84	9.02	6.89	4.03
13*	45.0	41.0	10.0	3.0	1.0	1.32	4.01	3.00	9.36	6.88	4.06
14	47.6	38.4	10.0	3.0	1.0	1.27	3.85	2.79	8.52	5.33	2.40
15	52.9	35.0	8.1	3.0	1.0	1.07	3.24	2.35	7.34	4.95	2.06
16	50.3	40.7	5.0	3.0	1.0	1.13	3.45	2.70	8.57	6.67	3.81

หมายเหตุ: * คือ Lack-of-fit ของการทดลอง

3 ผลการทดลองและอภิปรายผล

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ซึ่งมีตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบ ประกอบด้วย พอลิเอสเตอร์ที่มีความหนาแน่นสูง ขี้เลื่อยไม้ยางพารา และฟิล์ม สามารถออกแบบสูตรในการทดลองได้ 16 สูตร (Run) เช่นเดียวกันกับค่าผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าความหยาบผิว (Ra และ Rz) ก่อนและหลังการดูดซับน้ำ และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (WA) และการบวมน้ำ (TS) ในระยะเวลา 3 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 2

3.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของรูปแบบจำลอง

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากค่าทางสถิติ ประกอบด้วย ค่า Sequential model sum of squares มีนัยสำคัญ ค่า Adjusted coefficient of determination (Adj-R^2) และ ค่า Predicted coefficient of determination (Pred-R^2) มีค่าสูง และค่า Lack-of-fit ไม่มีนัยสำคัญ ตามลำดับ [10],[11],[20] จากการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า สมบัติความหยาบผิว (Ra และ Rz) ก่อนและหลังการดูดซับน้ำมีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองแบบเชิงเส้นตรง (Linear Model) แต่สมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำของวัสดุมีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Model) โดยจากการเปรียบเทียบผลทาง

สถิติ พบว่า รูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า Adj-R^2 และค่า Pred-R^2 สูงกว่ารูปแบบจำลองอื่นๆ ที่เปรียบเทียบกันในแต่ละค่าการตอบสนอง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) พบว่า รูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า $P\text{-value}$ ของ Lack-of-fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ซึ่งกล่าวได้ว่า รูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมมูลกับข้อมูล [22]

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 3 เห็นได้ว่า ค่า R^2 ของทุกการตอบสนอง อยู่ในช่วง 0.8305–0.9552 หรือ 83.05%–95.52% กล่าวคือ แบบจำลองการถดถอยนี้สามารถอธิบายความสามารถในการทำนายได้ประมาณ 83.05%–95.52% ซึ่งมากกว่า 75.00% นั้นหมายความว่า แบบจำลองการถดถอยมีความสัมพันธ์ที่กระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง เช่นเดียวกันกับค่า Adj-R^2 อยู่ในช่วง 0.8045–0.9328 หรือ 80.45%–93.28% ของแต่ละรูปแบบจำลองมีค่าที่สูงใกล้เคียงกันกับค่า R^2 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับการทดลอง ในส่วนของค่า Pred-R^2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.7825–0.8987 หรือ 78.25%–89.87% แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบจำลองการถดถอยนั้นสามารถทำนายค่าตอบสนองของข้อมูลใหม่ได้ดี นอกจากนี้พบว่า ค่า Coefficients of Variation (C.V.) ของการตอบสนองทั้งหมดมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่า การทดสอบสมบัติต่างๆ ของ WPCs มีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหรือสร้างรูปแบบจำลองได้ [20],[21]

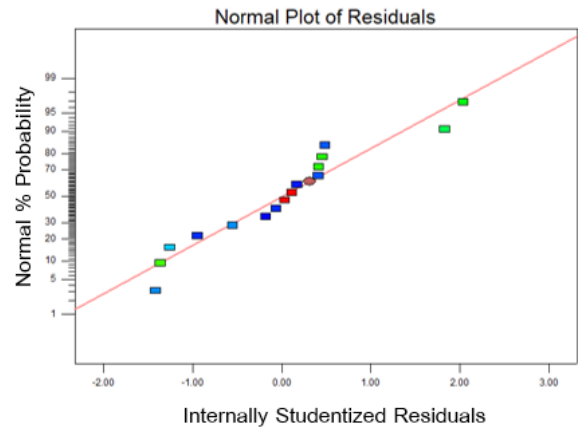
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของแต่ละการตอบสนอง

Response	Fitted model	Sequential P-value	Lack-of-fit P-value	R^2	Adj-R^2	Pred-R^2	C.V. (%)
Ra Before WA	Linear	<0.0001*	0.6385	0.8778	0.8590	0.8476	4.56
Rz Before WA	Linear	<0.0001*	0.7763	0.8897	0.8727	0.8618	4.46
Ra After WA	Linear	<0.0001*	0.5659	0.8305	0.8045	0.7825	5.74
Rz After WA	Linear	<0.0001*	0.5822	0.8694	0.8493	0.8059	3.30
WA	Quadratic	0.0319*	0.2388	0.9552	0.9328	0.8987	5.54
TS	Quadratic	0.0424*	0.2307	0.9526	0.9290	0.8946	3.79

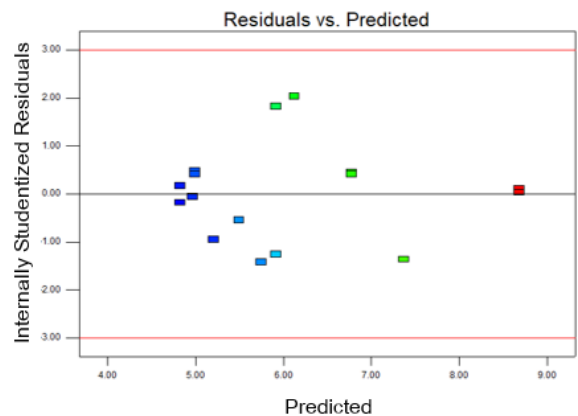
หมายเหตุ: * ค่า $P\text{-value}$ น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

3.2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง

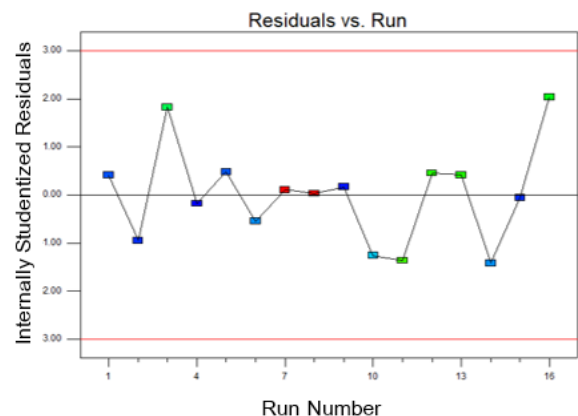
การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืนยันรูปแบบจำลองที่เหมาะสมของผลตอบสนอง [10],[11] แสดงดังรูปที่ 5 ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลองพิจารณาจากค่าการแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (Normal Plot of Residuals) ค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted) และค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) ตามลำดับ ตัวอย่างการวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า จากรูปที่ 5(ก) การแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (Normal Plot of Residuals) ของ Ra ก่อนการดูดซับน้ำ พบว่า ไม่มีค่าที่ผิดปกติของเศษเหลือเกิดขึ้นในกราฟ ตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดและล้อมรอบเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการแจกแจงเป็นแบบปกติ [20] สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าการทำนายของผลการตอบสนองได้นอกจากนี้ จากรูปที่ 5(ข) กราฟอธิบายถึงค่าเศษเหลือต่อค่าการทำนายที่เกิดขึ้นกับการทดลอง (Residuals vs. Predicted) พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวเป็นแบบอิสระ มีการกระจายล้อมรอบเส้นตรงกึ่งกลางที่เท่าๆ กันของกราฟ และไม่มีข้อมูลออกจากเส้นควบคุมของค่าสูงสุดและต่ำสุด สรุปได้ว่า ค่าเศษเหลือไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน ข้อมูลจากการทดลองมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ [10] ในส่วนของ รูปที่ 5(ค) กราฟแสดงถึงค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) จะเห็นได้ว่า ค่าเศษเหลืออยู่ภายใต้การควบคุม ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ นอกจากนี้ ยังมีการกระจายตัวที่ไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มเกิน 5 จุดติดต่อกัน หรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ [11] จากการพิจารณาความเพียงพอของรูปแบบจำลองการถดถอยทั้ง 3 กราฟ สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลจากผลการทดลองมีความเพียงพอและมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวใช้ในการทำนายรูปแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง: (ก)

การแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (ข) ค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ค) ค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง

3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อความหยาบผิว (Ra และ Rz) ก่อนการดูดซับน้ำ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 พบว่า สมบัติ Ra และ Rz ก่อนการดูดซับ

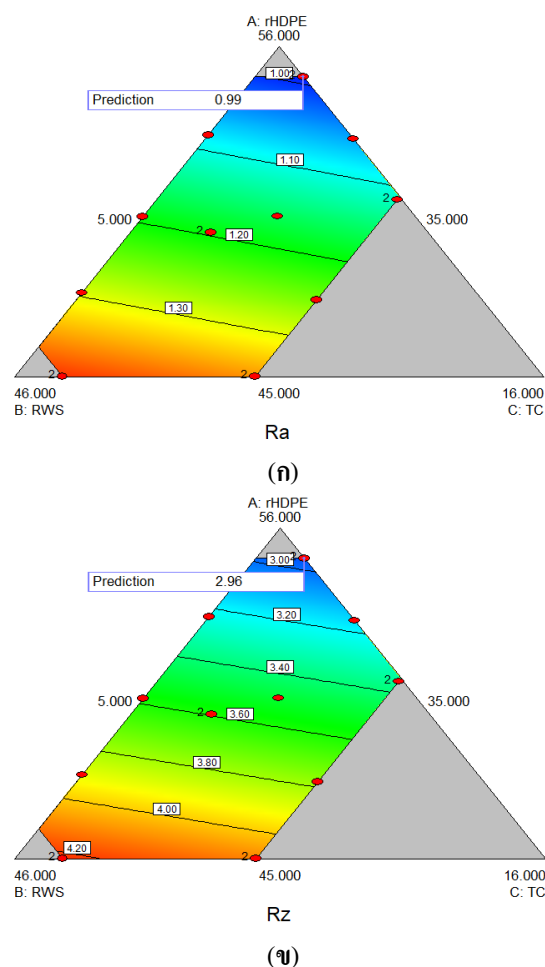
น้ำมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ แบบเชิงเส้นตรง ซึ่งแบบจำลองทั้ง 2 นั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองเหล่านั้นมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ Ra และ Rz และตัวแปรต่างๆ ของการทดลองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ (1) และ (2):

$$Ra \text{ Before WA } (Y) = -0.06X_1 + 0.03X_2 + 0.02X_3 \quad (1)$$

$$Rz \text{ Before WA } (Y) = -0.12X_1 + 0.11X_2 + 0.08X_3 \quad (2)$$

สมการถดถอยนี้ แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของซีเลื่อยไม้ยางพารา (X_2) และทลัคม (X_3) สรุปได้ว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลมีผลต่อการลดลงของสมบัติ Ra และ Rz นอกจากนี้ สมการถดถอยของสมบัติทั้ง 2 การทดลองสามารถสร้างกราฟโครงข่าย (Contour plot) และหาสูตรผสมที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติโดยวิธีการ RSM ซึ่งกราฟโครงข่ายของสมบัติ Ra และ Rz แสดงดังรูปที่ 6 (ก)–(ข) ตามลำดับ จากกราฟทั้ง 2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนการผสมมีผลต่อสมบัติ Ra และ Rz อย่างชัดเจน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของ WPCs คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ซีเลื่อยไม้ยางพารา และทลัคม ซึ่งเป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากอัตราส่วนผสมของวัสดุดังกล่าวมีผลต่อปัจจัยในการผลิต WPCs [3, 10, 20] นอกจากนี้ สูตรการผสมที่เหมาะสมของสมบัติ Ra ก่อนการดูดซับน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีเลื่อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) และทลัคม (6.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง Ra คือ $0.99 \mu\text{m}$ ที่ความน่าเชื่อถือ 0.974 สำหรับสูตรการผสมที่ดีที่สุดของสมบัติ Rz ก่อนการดูดซับน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีเลื่อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) และทลัคม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคู่ เท่ากับ 3.0 wt% และ สารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% เช่นเดียวกันกับสมบัติ Ra ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง Rz คือ $2.96 \mu\text{m}$ ที่ความน่าเชื่อถือ 0.920 แสดงดังตารางที่ 6 ตามลำดับ สังเกตได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของทั้ง 2 การทดลองมีค่าเท่ากัน ผลการวิจัยนี้อธิบายถึงความ

ถูกต้องและแม่นยำในการทดลอง และการสร้างแบบจำลองการถดถอยเพื่อทำนายอัตราส่วนผสม [14]



รูปที่ 6 กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่อสมบัติความหยาบผิวก่อนการดูดซับน้ำ:

(ก) Ra และ (ข) Rz

3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อความหยาบผิว (Ra และ Rz) หลังการดูดซับน้ำ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า สมบัติ Ra และ Rz หลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 3 เดือน มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง เช่นเดียวกันกับค่าความหยาบผิวก่อนการดูดซับน้ำ ซึ่งรูปแบบจำลองทั้ง 2 นั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองเหล่านี้มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ Ra และ Rz และตัวแปรต่างๆ ของการทดลอง

เพื่อทำนายอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ (3) และ (4):

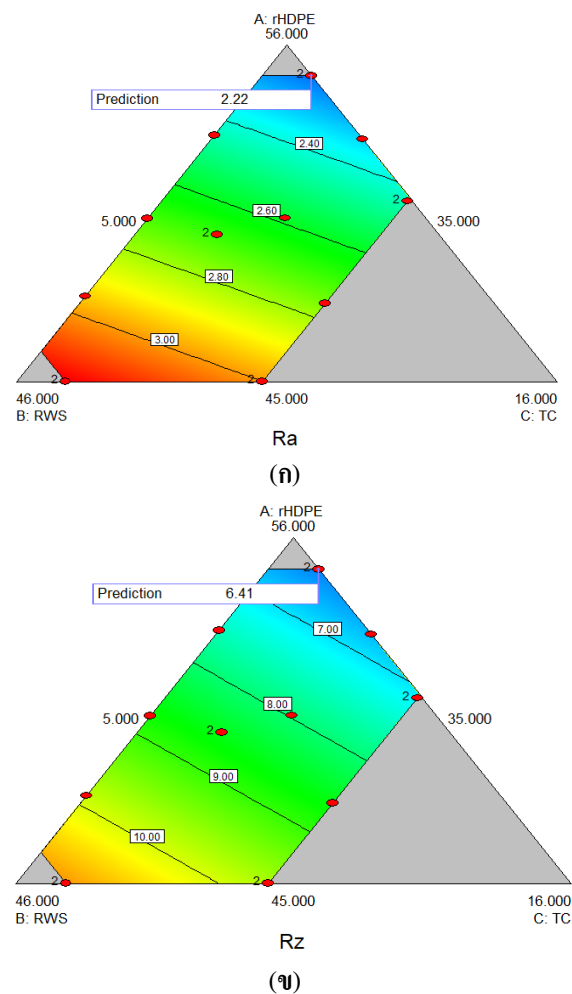
$$Ra \text{ After WA } (Y) = -0.02X_1 + 0.08X_2 + 0.04X_3 \quad (3)$$

$$Rz \text{ After WA } (Y) = -0.11X_1 + 0.34X_2 + 0.06X_3 \quad (4)$$

จากสมการถดถอยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของขี้เลื่อยไม้ยางพารา (X_2) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) และทลคัม (X_3) สรุปได้ว่า ขี้เลื่อยไม้ยางพารามีผลต่อสมบัติ Ra และ Rz เมื่อผ่านการดูดซับน้ำเป็นระยะเวลา 3 เดือน เหตุผลเนื่องมาจาก ธรรมชาติการชอบน้ำของไม้ (Hydrophilic) เมื่อสัมผัสความชื้นสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการพองตัวซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติความหยาบผิวของ WPCs [1],[6],[13] นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour plot) แสดงการทำนายผลตอบสนองที่เหมาะสมของสมการถดถอย แสดงดังรูปที่ 7 โดยมุมทั้ง 3 ของกราฟประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ขี้เลื่อยไม้ยางพารา และทลคัม ตามลำดับ จากการวิเคราะห์กราฟโครงข่ายของสมบัติ Ra รูปที่ 7(ก)-(ข) พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนการผสมมีผลต่อสมบัติของ Ra และ Rz หลังการดูดซับน้ำอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนขี้เลื่อยไม้ยางพารา จาก 35.0–45.0 wt% ใน WPCs นอกจากการมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติความหยาบผิวแล้ว โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มขึ้นของขี้เลื่อยไม้ยางพารายังช่วยในการเพิ่มสมบัติเชิงกลและทางความร้อนให้แก่ WPCs อีกด้วย [2],[8]

นอกจากนี้ สูตรผสมที่เหมาะสมของความหยาบผิวหลังการดูดซับน้ำที่เหมาะสมของสมบัติ Ra คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.4 wt%) ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) และทลคัม (6.6 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลองของสมบัติ Ra คือ 2.22 μm ที่ความน่าเชื่อถือ 0.889 สำหรับสูตรการผสมที่เหมาะสมของสมบัติ Rz คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (35.6 wt%) และทลคัม (5.4 wt%) เมื่อสารควบคู่ เท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt%

ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง Rz คือ 6.41 μm ที่ความน่าเชื่อถือ 0.871 แสดงดังตารางที่ 6 ตามลำดับ สังเกตได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของทั้ง 2 การทดลองมีค่าใกล้เคียง ผลการวิจัยนี้อธิบายถึงสภาวะที่ต่างกันของการทดลอง รวมถึงอัตราส่วนการผสมที่ต่างกันของแต่ละปัจจัย [11],[20]



รูปที่ 7 กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่อสมบัติความหยาบผิวหลังการดูดซับน้ำ:

(ก) Ra และ (ข) Rz

3.5 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซับน้ำ (WA) และการบวมน้ำ (TS)

จากผลการทดลองทำการวิเคราะห์เชิงสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งเป็นระยะการอิมตัวของ WPCs [14] แสดงดังตารางที่ 4 และทำการ

ลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model) เพื่อตัดปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลต่อการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า สมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้ง ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าความหยাবผิวที่มีรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองการตอบสนองการดูดซับน้ำและการบวมน้ำมีการวิเคราะห์แบบจำลอง (Model) และรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง โดยมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) ซึ่งสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองทั้ง 2 มีนัยสำคัญ [23] นอกจากนี้ รูปแบบจำลองยังอธิบายถึงการมีปัจจัยร่วมของอัตราส่วนผสมในการทดลองพบว่า ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ คือ ปัจจัยร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและจีลีโอไมยางพารา (X_1X_2) เท่านั้น เนื่องจาก อัตราส่วนผสมของทั้ง 2 ปัจจัยเป็นส่วนผสมหลักของ WPCs นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ทำให้การดูดซับน้ำและการบวมน้ำลดลง เนื่องจากโดยทั่วไปพลาสติกมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้ WPCs มีความคงทน มีอายุการใช้งานได้นาน ไม่เสียรูปง่ายจากการสัมผัสความชื้นเหมาะสมกับงานประเภทโครงสร้างที่มีการสัมผัสความชื้นสูง [9]

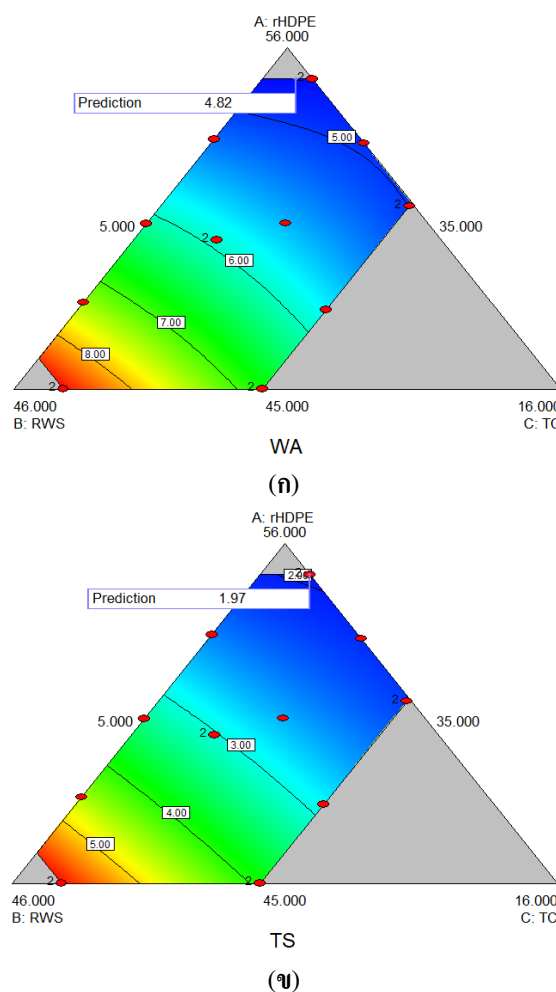
จากรูปแบบจำลองสามารถสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ และตัวแปรต่างๆ ของการตอบสนองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ (5) และ (6) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของจีลีโอไมยางพารา (X_2) มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) และทลัคม (X_3) สรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมของจีลีโอไมยางพารามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ [8],[12]

$$WA(Y) = -0.52X_1 + 1.22X_2 - 1.05X_3 - 0.04X_1X_2 \quad (5)$$

$$TS(Y) = 0.41X_1 + 1.20X_2 - 0.28X_3 - 0.04X_1X_2 \quad (6)$$

นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour plot) แสดงผลการทำนายที่ดีที่สุดของสมการถดถอยสำหรับทั้ง 2 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 8(ก)-(ข) สูตรการผสมที่เหมาะสมของการดูดซับน้ำและการบวมน้ำสามารถทำนายได้จากวิธี RMS แสดงดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของการดูด

ซับน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) จีลีโอไมยางพารา (36.0 wt%) และทลัคม (5.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 4.82% ที่ความน่าเชื่อถือ 0.989 หรือ 98.90% สำหรับสูตรการผสมที่เหมาะสมของการบวมน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) จีลีโอไมยางพารา (35.0 wt%) และทลัคม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคุมเท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 1.97% ที่ความน่าเชื่อถือ 0.979 หรือ 97.90% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า สูตรการผสมของทั้ง 2 มีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติดังกล่าวมาจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล คือ 55.0 wt% เท่ากัน และส่วนผสมของจีลีโอไมยางพารา คือ 36.0 wt% และ 35.0 wt% ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน สำหรับสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ ตามลำดับ [14]



รูปที่ 8 กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบอัตราส่วนการผสมต่อการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ: (ก) WA และ (ข) TS

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของรูปแบบจำลองของแต่ละการตอบสนอง

Source	<i>P-value</i>					
	Ra Before	Rz Before	Ra After	Rz After	WA	TS
	WA	WA	WA	WA		
Model	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
Linear Mixture	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
$X_1 X_2$	-	-	-	-	0.0100*	0.0115*
$X_1 X_3$	-	-	-	-	0.6910	0.9065
$X_2 X_3$	-	-	-	-	0.8632	0.6870

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

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model) ของแต่ละการตอบสนอง

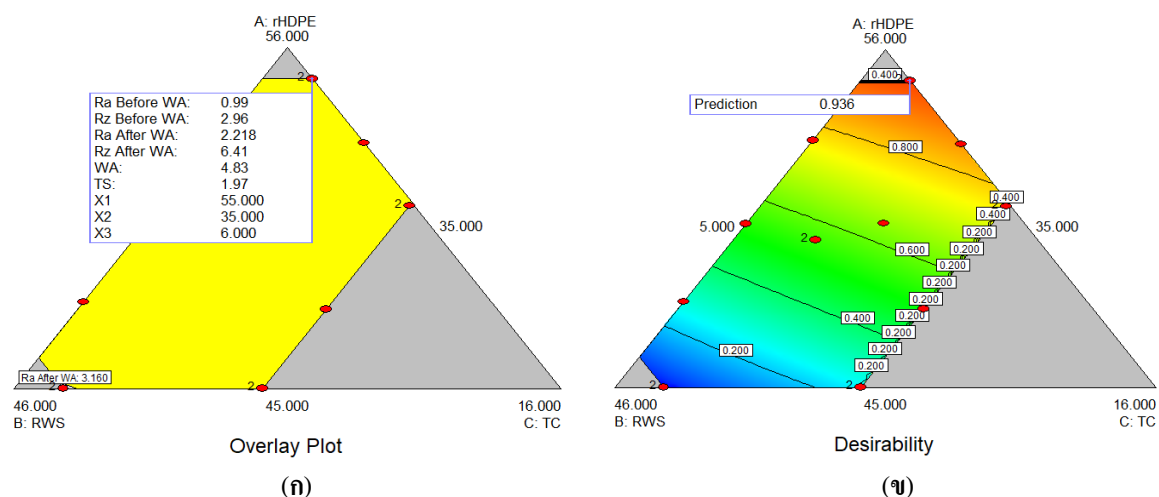
Source	<i>P-value</i>					
	Ra Before	Rz Before	Ra After	Rz After	WA	TS
	WA	WA	WA	WA		
Model	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
Linear Mixture	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
$X_1 X_2$	-	-	-	-	0.0042*	0.0057*

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

3.6 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ

สูตรการผสมที่เหมาะสมของการตอบสนองโดยมีการวิเคราะห์ร่วมกันของทุกสมบัติ ประกอบด้วย ความหนาผิวก่อนและหลังการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำและการบวม น้ำ สามารถหาได้โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน (Overlay plot) ของกราฟเส้นโครงข่ายผลตอบสนองแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 9(ก) โดยมีการกำหนดเงื่อนไขของการทดลองทุกตัวมีค่าที่ต่ำที่สุด (Minimize) กล่าวคือ เป้าหมายของการตอบสนองนี้ต้องการประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของ WPCs ดังนั้น ควรมีค่าความหนาผิวและการดูดซับน้ำและการบวมต่ำที่สุด โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ คือ

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลีเยอไม้อย่างพารา (35.0 wt%) ทัลคัม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคู่เท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือ (Desirability) คือ 0.936 หรือ 93.60% ดังแสดงในรูปที่ 9(ข) นอกจากนี้ เพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง รูปแบบจำลอง ค่าผลการตอบสนอง และผลการวิเคราะห์ข้อมูล สูตรการผสมที่ได้จากการทำนายถูกขึ้นรูปและทดสอบอีกครั้งเพื่อหาค่าการทดลองจริง (Observed) แสดงดังตารางที่ 7 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยการทำนายมีความผิดพลาด 1.25% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด คือ 1.24 จากการทดสอบการบวมน้ำ ตามลำดับ



รูปที่ 9 กราฟโครงข่ายแสดงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ: (ก) เทคนิคการทับซ้อนกัน (Overlay plot) และ (ข) กราฟความน่าเชื่อถือ (Desirability) ของการทำนาย

ตารางที่ 6 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และค่าความน่าเชื่อถือ

Properties	Mixture components fractions (wt%)					Predicted responses	Desirability
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		
Ra Before WA (μm)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	0.99	0.974
Rz Before WA (μm)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	2.96	0.920
Ra After WA (μm)	54.4	35.0	6.6	3.0	1.0	2.22	0.889
Rz After WA (μm)	55.0	35.6	5.4	3.0	1.0	6.41	0.871
WA (%)	55.0	36.0	5.0	3.0	1.0	4.82	0.989
TS (%)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	1.97	0.979

ตารางที่ 7 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และการทดลองจริง

Properties	Mixture components fractions (wt%)					Predicted responses	Observed
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		
Ra Before WA (μm)						0.99	1.01 (0.34)*
Rz Before WA (μm)						2.96	2.94 (0.08)
Ra After WA (μm)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	2.22	2.24 (0.61)
Rz After WA (μm)						6.41	6.40 (0.26)
WA (%)						4.82	4.87 (0.75)
TS (%)						1.97	1.95 (1.24)

หมายเหตุ: * ค่าในวงเล็บ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง

4 สรุป

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ถูกวิเคราะห์และประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมและเพื่อหาสูตรการผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของ WPCs ในสถานะของงานที่มีการสัมผัสความชื้นสูง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า สัดส่วนการผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและซีลี้อยู่ไม่ยางพารามีผลต่อสมบัติทั้งหมดของ WPCs อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยสัดส่วนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลมีผลต่อความหนาแน่นผิวก่อนและหลังการดูดซับน้ำ และสัดส่วนของซีลี้อยู่ไม่ยางพารามีผลต่อการดูดซับน้ำและการบวมตัวของ WPCs นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour Plot) แสดงผลการทำนายที่เหมาะสมของสมการถดถอยของแต่ละการตอบสนอง ผลการวิเคราะห์แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์และปริมาณส่วนผสมของปัจจัยต่างๆ ในสถานะที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานของแต่ละสมบัติ นอกจากนี้ การใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงข่ายของผลตอบสนองแต่ละตัว ซึ่งกำหนดเงื่อนไขของการทดลองทุกตัวมีค่าที่ต่ำที่สุด (Minimize) พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของการตอบสนอง คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลี้อยู่ไม่ยางพารา (35.0 wt%) ทดลัม (6.0 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และ สารหล่อลื่น (1.0 wt%) ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือ (Desirability) คือ 0.936 หรือ 93.60% และเพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบการทดลองและค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย สูตรการผสมที่เหมาะสมจากการทำนาย (Predicted) มีการขึ้นรูปและทดสอบเพื่อหาค่าการทดลองจริง (Observed) พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายมีความผิดพลาด 1.25% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด คือ 1.24 จากการทดสอบการบวมตัว ตามลำดับ

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] A. Zolfaghari, A. H. Behraves and P. Shahi, "Comparison of Mechanical Properties of Wood–Plastic Composites Reinforced with Continuous and Noncontinuous Glass Fibers," *Journal of Thermoplastic Composites Material*, vol. 28, no. 6, pp. 791–805, 2015, doi: 10.1177/0892705713503676.
- [3] N. Ayrlimis, 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.
- [4] G. Sui, M. A. Fuqua, C. A. Ulven and W. H. Zhong, "A Plant Fiber Reinforced Polymer Composite Prepared by a Twin-Screw Extruder," *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 3, pp. 1246–1251, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.03.065
- [5] D. Akesson, T. Fuchs, M. Stoss, A. Root, E. Stanvall, M. Skrifvars, "Recycling of Wood Fiber-Reinforced HDPE by Multiple Reprocessing," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, no. 35, pp. 1–8, 2016, . doi: 10.1002/app.43877.
- [6] E. O. Olakanmi, E. A. Ogunesan, E. Vunain, R. A. Lafia-Araga, M. Doyoyo and R. Meijboom, "Mechanism of Fiber/Matrix Bond and Properties of Wood Polymer Composites Produced From Alkaline-Treated Daniella oliveri Wood Flour," *Journal of Polymer Composites*, vol. 37, no.9, pp. 2657–2672, 2016, doi: 10.1002/pc.23460.

- [7] K. Chaochanchaikul, V. Rosarpitak and N. Sombatsompop, "Photodegradation Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering," *Express Polymer Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 146–160, 2013, doi: 10.3144/expresspolymlett.2013.14.
- [8] B. Kord, A. Varshoei and V. Chamany, "Influence of Chemical Foaming Agent on the Physical, Mechanical, and Morphological Properties of HDPE/Wood Flour/Nanoclay Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 30, no. 13, pp. 1115–1124, 2011, doi: 10.1177/0731684411417200.
- [9] I. Michalska Pozoga, R. Tomkowski, T. Rydzkowski and V. K. Thakur, "Towards the Usage of Image Analysis Technique to Measure Particles Size and Composition in Wood-Polymer Composites," *Industrial Crops and Products*, vol. 92, pp. 149–156, 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.08.005.
- [10] C. Homkhiew, T. Ratanawilai and W. Thongruang, "The Optimal Formulation of Recycled Polypropylene/Rubberwood Flour Composites From Experiments with Mixture Design," *Composites Part B-Engineering*, vol. 56: pp. 350–357, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.041.
- [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] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] L. Soccalingame, A. Bourmaud, D. Perrin, J. C. Benezet and A. Bergeret, "Reprocessing of Wood Flour Reinforced Polypropylene Composites: Impact of Particle Size and Coupling Agent on Composite and Particle Properties," *Polymer Degradation Stability*, vol. 113, pp. 72–85, 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.020.
- [16] R. Z. Huang, C. T. Mei, X. W. Xu, T. Karki, S. Lee and Q. L. Wu, "Effect of Hybrid Talc-Basalt Fillers in the Shell Layer on Thermal and Mechanical Performance of Co-Extruded Wood Plastic Composites," *Materials*, vol. 8, no.12, 8510–8523, 2015, doi: 10.3390/ma8125473.
- [17] R. Z. Huang, B. J. Kim, S. Lee, Z. Yang, Q. L. Wu, "Co-Extruded Wood-Plastic Composites with Talc-Filled Shells: Morphology, Mechanical, and Thermal Expansion Performance," *BioResources*, vol. 8, no. 2: pp. 2283–2299, 2013.
- [18] H. Essabir, R. Boujmal, M. O. Bensalah, D. Rodrigue, R. Bouhfid and A. E. Qaiss, "Mechanical and Thermal Properties of Hybrid Composites: Oil-Palm Fiber/Clay Reinforced High Density Polyethylene," *Mechanics of Materials*, vol. 98, pp. 36–43, 2016, doi: 10.1016/j.mechmat.2016.04.008.

- [19] C. Homkhiewa, T. Ratanawilaia and W. Thongruangb, "Effects of Natural Weathering on the Properties of Recycled Polypropylene Composites Reinforced with Rubberwood Flour," *Industrial Crops and Products*, vol. 56, pp. 52–59, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.02.034
- [20] 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*, 2019, doi: 10.1177/0892705719889988.
- [21] Mixture Design, Design-Expert v11, 2012. [Online]. Available: <https://www.statease.com/docs/v11/tutorials/mixture-designs/>
- [22] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, "Optimal Proportions of Composites from Polypropylene and Rubberwood Flour after Water Immersion Using Experimental Design," *KKU Research Journal*, vol. 19, pp. 780–793, 2014.
- [23] N. Ayrilmis, 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.

การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยในอากาศของเครื่องฟอกอากาศ เชิงพาณิชย์สำหรับใช้ภายในอาคารที่พักอาศัย

Evaluation of the Filtration Efficiency of Aerosol Particles of the Commercial Air Purifiers for indoor use

วิสูตร อาสนวิจิตร^{1*}, พานิช อินต๊ะ¹, วิสาขน์ภัสร์ รัตนจันทร์¹ และ พัชรนันท์ หารษาภิรมย์โชค²

¹หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ล้านนา ป่าป๋อง ดอยสะเก็ด เชียงใหม่ 50220

²คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Visut Asanavijit^{1*}, Panich Intra¹, Wisanapat Rattanachan¹ and Pattanun Hansapiromchoke²

¹Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Lanna, Papong, Doi Saket, Chiangmai, 50220, Thailand

²Faculty of Education, Kasetsart University, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

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

Received: Aug 12, 2021; Revised: Nov 27, 2021; Accepted: Dec 25, 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความฉบับนี้คือเพื่อประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยในอากาศของเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์สำหรับใช้ภายในอาคารที่พักอาศัยที่มีขนาดและหลักการที่แตกต่างกันจำนวน 5 เครื่อง โดยแบ่งเป็นเครื่องฟอกหลักการไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าหรือไอออนจำนวน 4 เครื่อง และเครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรองจำนวน 1 เครื่อง ในการศึกษาได้ทดสอบประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกทั้ง 5 เครื่องตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 กับเครื่องกำเนิดอนุภาคละอองลอยภายในห้องทดสอบขนาด $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3\text{ m}$ ใช้เครื่องวัดฝุ่นแบบเรียลไทม์วัดค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคฝุ่นภายในห้องทดสอบในช่วงเวลา 120 นาที จากการทดลองพบว่าค่าการลดลงของความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคฝุ่นแปรผันตรงกับระยะเวลาการทดสอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาการทดสอบที่นานขึ้นทำให้อากาศภายในห้องที่ยังคงมีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยอยู่หมุนเวียนผ่านเข้าไปในเครื่องฟอกซ้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศของเครื่องฟอกคงที่ในช่วงระยะเวลาของการทดสอบ โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นสูงสุดในกรณีที่มีการตกตะกอนของฝุ่นตามธรรมชาติของเครื่องฟอก A, B, C, D และ E เท่ากับ 61.30, 65.63, 81.73, 77.39 และ 72.75 % ที่ 120 นาที ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นสูงสุดในกรณีที่ไม่วางการตกตะกอนตัวของฝุ่นตามธรรมชาติของเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E เท่ากับ 13.19, 22.91, 59.02, 49.03 และ 38.88 % ที่ 120 นาที ตามลำดับ และในการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่า CADR ของ A, B, C, D และ E มีค่าประมาณ 4.47, 7.58, 24.36, 17.82 และ 13.7 ft^3/h ตามลำดับ

คำสำคัญ: ละอองลอย, ฝุ่นละอองไม่เกิน 2.5 ไมครอน, ฝุ่นละอองไม่เกิน 10 ไมครอน, เครื่องฟอกอากาศ

Abstract

The aim of this paper is to evaluation of the filtration efficiency of aerosol particles of the commercial air purifiers for indoor use purifiers with different sizes and principles e.g., 4 electrostatic air purifiers and 1 HEPA filter air purifier. In this study, the filtration efficiency of aerosol particles of five commercial indoor air purifiers were tested by the ANSI/AHAM AC-1-2015 standard test method with the aerosol particle generators inside the $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3\text{ m}$ test chamber. The real-time particle counter was used for measuring the number and mass concentrations of aerosol particles inside the test chamber within testing time of 120 min It was found from the experiment that the decrease in the mass concentration of the aerosol particles is proportional to the increase in testing time. Due to the longer testing time, room air that still retains suspended aerosol particles recirculates through the air purifier at a constant air volumetric flow rate of the purifier for the duration of the testing time. The maximum particle filtration efficiency in the case of combining particle natural decay of the A, B, C, D and E purifiers is about 61.30, 65.63, 81.73, 77.39 and 72.755 % at 120 min respectively, and the maximum particle filtration efficiency in the case of excluding particle natural decay of the A, B, C, D and E purifiers is about 13.19, 22.91, 59.02, 49.03 and 38.88 % at 120 min respectively. Finally, in this experiment, it was shown that the CADR values of A, B, C, D and E purifiers were about 4.47, 7.58, 24.36, 17.82 and 13.7 ft^3/h , respectively.

Keyword: Aerosol, PM2.5, PM10, Air Purifier

1. บทนำ

การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลกด้วยยอดผู้ติดเชื้อถึง 42,916,332 ราย และเสียชีวิต 1,154,301 ราย สำหรับประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อ 3,731 ราย และเสียชีวิต 59 ราย ข้อมูล ณ วันที่ 26 ตุลาคม 2563 [1] อีกทั้งในช่วงมีการการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ได้เกิดปัญหาหมอกควันมีค่าฝุ่น PM2.5 เกินค่ามาตรฐานทั้งในกรุงเทพและหลายจังหวัดในภาคเหนือ ทำให้มีค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI (Air Quality Index) ของประเทศไทยสูงเป็นอันดับต้น ๆ ของโลกต่อเนื่องการหลายวัน [2] สารมลพิษที่สำคัญคืออนุภาคฝุ่นละอองลอยขนาดเล็ก (particulate matter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 ไมครอน หรือที่เรียกว่า PM 2.5 ฝุ่นละอองลอยขนาดเล็กคือการรวมกันของโมเลกุล (molecular) หรือกลุ่มโมเลกุลของสารหรือสารประกอบต่างๆ รวมไปถึงสารมลพิษชีวภาพที่อาจจะเป็นเชื้อรา ไวรัส หรือแบคทีเรีย ที่ลอยอยู่ร่วมกับฝุ่นละอองในอากาศที่เราหายใจเข้าไป เนื่อง PM2.5 จะมีการตกตะกอนค่อนข้างช้าถึงช้ามาก (ระดับชั่วโมง ถึง วัน) จนในบางครั้งถือว่าเป็นประเภทลอยในอากาศอย่างถาวร จึงสามารถแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิด

หรือบรรยากาศเข้าสู่ที่พักอาศัย สำนักงาน โรงพยาบาล รวมไปถึงสถานศึกษา [3]

ฝุ่นละอองลอยขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนจะเป็นตัวก่อปัญหาแก่สุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชากรเนื่องจากสามารถผ่านระบบทางเดินหายใจเข้าไปได้ลึกลงไปถึงจนถึงระดับถุงลมปอด ซึ่งจะสามารถสะสมได้ตลอดไปไม่สามารถขับออกจากร่างกาย การหายใจปกติอนุภาคขนาดเล็กจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมครอน จะเข้าไปอยู่ในทางเดินหายใจบริเวณกล่องเสียง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 ไมครอน สามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณถุงลมปอดไปจนถึงระดับเซลล์ในร่างกายได้สารเคมีหรือแก๊สบางชนิดที่ผ่านเข้ามาในระบบทางเดินหายใจร่วมกับอนุภาคเหล่านี้จะถูกกลืนรวมกับเนื้อเยื่อเมือกของเนื้อเยื่อบริเวณนั้นๆ หรือเยื่อเมือกของถุงลมปอดแล้วไหลผ่านเข้าไปสู่ระบบไหลเวียนโลหิต ทำให้เกิดการเสียหายต่อเนื้อเยื่อบริเวณต่างๆ ของร่างกาย อนุภาคบางตัวอาจมีสารเคมีที่เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) หรือสารก่อกลายพันธุ์ (mutagen) รวมอยู่ด้วย เช่น อนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ดีเซลและปิโตรเลียม ซึ่งผลกระทบต่อสุขภาพของมลพิษทางอากาศจาก PM 10 และ PM 2.5

มาจากองค์ประกอบทางเคมีต่างชนิดปนเปื้อนอยู่ สารเคมีบางตัวมีคุณสมบัติออกซิแดนท์จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น สารโลหะที่มีคาร์บอน กรดเกลือ สารมลพิษอินทรีย์ รวมไปถึงสารมลพิษชีวภาพที่อาจจะเป็นเชื้อราไวรัส หรือแบคทีเรีย โดยการหายใจเอา PM 10 และ PM 2.5 เข้าไปจะกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงระบบภูมิคุ้มกันของระบบหายใจ ทำให้เกิดการอักเสบหรือโรคภูมิแพ้ เช่น ไอ เจ็บคอ การหายใจผิดปกติ ตลอดจนทำให้โรคหัวใจกำเริบได้ ส่งผลให้การตายจากโรคทางเดินหายใจมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น [4]–[6]

ซึ่งการศึกษาวิจัยถึงการตอบสนองของเซลล์เยื่อผิวของทางเดินหายใจจากการกระตุ้นด้วยสารก่อภูมิแพ้โดยอุนิซ วิจิเขตคานวน และคณะ [7] จากการศึกษาของท่านพบว่าการกักตัวของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก (PM 2.5) ในถุงลมปอดจะก่อให้เกิดอันตรายต่อเม็ดเลือดขาว เพราะเม็ดเลือดขาวจะกินอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กเข้าไปเพื่อจะทำลายโดยกลไกทางชีวเคมี สามารถทำให้เกิดการอักเสบของถุงลมปอด เม็ดเลือดขาวจะถูกกระตุ้นและจะหลั่งสารเร่งกระบวนการอักเสบออกมาสู่กระแสเลือดไปที่ตับ ไชกระดูกและเกิดการกระตุ้น และส่งเสริมการตกตะกอนของเลือดที่เป็นสาเหตุของอุบัติการณ์ของโรคหัวใจล้มเหลว ซึ่งจากผลการวิจัยจากต่างประเทศรายงานถึงกลไกการกระตุ้นการหลั่งสารกระตุ้นการอักเสบ โดยอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจะสามารถเร่งให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระและทำให้เกิดภาวะความเครียดออกซิเดชั่น ทำให้เกิดการทำลายเม็ดเลือดขาวในปอด ส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างฉับพลันต่อปอดทำให้ปอดอักเสบ ทั้งนี้ในบุคคลที่มีสุขภาพแข็งแรงและปกติกลไกการป้องกันในร่างกายจะช่วยป้องกันความเสียหายได้ แต่บุคคลที่มีปัญหาทางเดินหายใจ เช่น ผู้ที่เป็นโรคหอบหืด ผู้ที่เป็นโรคภูมิแพ้เรื้อรังหรือมีการอักเสบทางเดินหายใจ หรือผู้ที่หายใจเอาสารมลพิษในอากาศ เช่น ควันบุหรี่ หรือสูดไอโซน ความสามารถในการป้องกันตนเองอาจจะไม่มีประสิทธิภาพ จึงจำทำให้เสี่ยงต่อการที่ปอดจะเสียหายและเป็นอันตรายจากสารมลพิษอากาศได้ นอกจากนี้ ข้อมูลเกี่ยวกับฝุ่น PM2.5 ในอากาศมีส่วนทำให้เชื้อไวรัสโควิด-19 แพร่หรือระบาดได้ดีขึ้นได้นำเสนอโดย Srivastava [8]

พบว่าฝุ่น PM2.5 ที่มีเชื้อไวรัสโควิด-19 ที่เกิดจากการจามและไอเป็นตัวกลางสำคัญในการแพร่กระจายของไวรัสเข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินหายใจ ทำให้เชื้อไวรัสโควิด-19 แพร่หรือระบาดได้ดีขึ้น จากรายงานการวิจัยพบว่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในประเทศจีนที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จะมีจำนวนผู้ติดเชื้อไวรัสโควิด-19 รายวันในประเทศจีนเพิ่มขึ้น 2.24% จากรายงานวิจัย [8] ไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่จะมีขนาดอนุภาคหลากหลายอยู่ระหว่าง 60–140 นาโนเมตร มีการปะปนอยู่ในละอองฝอยที่เกิดจากการไอ จาม ดังนั้นหากพิจารณาผลกระทบทางสุขภาพจากอนุภาคละอองลอยขนาดในช่วง 15–700 นาโนเมตร

จากการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 และปัญหาฝุ่น PM2.5 ดังกล่าว ทำให้เครื่องฟอกอากาศภายในอาคารจึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับสถานที่ทำงาน โรงพยาบาล โดยเฉพาะห้องปลอดความเป็นพิษ และที่พักรักษา โดยเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารจะช่วยในการขจัดปัญหาเรื่องเชื้อโรค โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย ควันบุหรี่ ฝุ่นและกลิ่นต่างๆ สามารถกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็ก 0.01 ไมครอน ที่ปะปนอยู่ในอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของโรคเชื้อหุ้มสมองอักเสบ โรคปอดอักเสบ และโรคทางเดินหายใจอื่นๆ เช่น โรคภูมิแพ้ โรคหอบหืด ตามที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ในปัจจุบันเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารมีทั้งแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานภายในที่พักรักษาและอุตสาหกรรม โดยแบบที่เหมาะสมกับพักรักษาเป็นแบบแผ่นกรองและการใช้ไฟฟ้าสถิตเป็นระบบที่ไส้กรองสามารถถอดเปลี่ยนหรือล้างทำความสะอาดได้บ่อยครั้งตามที่ต้องการ จึงไม่เป็นที่สะสมของสิ่งสกปรกและเชื้อโรค และยังช่วยประหยัดวัสดุสิ้นเปลืองและช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนแบบที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมเป็นเครื่องฟอกอากาศระบบเปลี่ยนไส้กรอง ซึ่งมีไส้กรองหลายชั้นหลายแบบ ตั้งแต่ไส้กรองหยาบ (Pre-filter) ไส้กรองปานกลาง (Medium filter) ไส้กรองละเอียด (HEPA filter) และไส้กรองกลิ่น (Carbon filter) มีเครื่องขนาดเล็กและใหญ่ให้เลือกใช้ให้เหมาะกับงานแต่ละประเภท ในการกรองกลิ่น ฝุ่น ไอสารระเหย และอื่นๆ

แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศภายในอาคารที่มีจำหน่ายในประเทศส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคในการกรองฝุ่นด้วยแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง (High-efficiency particulate air) หรือ HEPA Filter ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นที่สูงถึง 99.97 % ที่อนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองเหล่านี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่อปีที่สูง โดยเฉลี่ย 3,000–6,000 บาท ต่อปี สำหรับการเปลี่ยนแผ่นกรองปีละ 1–2 ครั้ง [9] อีกทั้ง เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองนี้ยังทำให้เกิดขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติดเชื้อหากใช้ในโรงพยาบาลที่มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งขยะแผ่นกรองเหล่านี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และต้องกำจัดด้วยวิธีการเผา ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศตามมา สำหรับโรงพยาบาลและสำนักงานขนาดใหญ่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและบริการจากตัวแทนจำหน่ายในราคาค่อนข้างสูง เช่น ค่าใช้จ่ายสำหรับการล้างและทำความสะอาดตัวกรอง หรือค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนตัวกรองอากาศใหม่ จึงทำให้มีการใช้งานในจำนวนที่จำกัดทำให้ไม่สามารถขยายให้มีการใช้งานในส่วนสำนักงานพื้นที่ทำงานหรือศูนย์ประชุมขนาดใหญ่ได้มากขึ้น สำหรับเทคนิคการกรองด้วยสนามไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าปัจจุบันยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่และกำลังเป็นที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับการนำมาใช้ในบ้านและในอาคาร เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคสูงเทียบเท่าแผ่นกรองแบบ HEPA สามารถกำจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรียได้ด้วยสนามไฟฟ้าสถิต มีขนาดเล็กกะทัดรัดกว่าเครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรองเมื่อเทียบกับขนาดของการบำบัดอากาศต่อพื้นที่ใช้งาน จึงช่วยประหยัดวัสดุสิ้นเปลืองและช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและไม่ก่อให้เกิดขยะจากแผ่นกรองเสื่อมสภาพหรือขยะติดเชื้อ แต่เครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิตยังมีราคาค่อนข้างสูงอยู่ในหลักหลายหมื่นบาทเมื่อเทียบกับหลักการการกรองด้วยแผ่นกรอง HEPA อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศภายในอาคารที่ใช้เทคนิคต่างๆ เหล่านี้มีลักษณะโครงสร้าง เทคนิค วิธีการ การทำงาน ลักษณะการใช้งาน ขนาดที่เหมาะสมกับห้องและราคาต่อขนาดห้องแตกต่างกันออกไป อีกทั้งผู้ใช้ยังไม่สามารถทราบถึง

ประสิทธิภาพการบำบัดหรือการกรองอนุภาคฝุ่นละอองของเครื่องฟอกแต่ละขนาดของเครื่องหรือแต่ละแบบว่ามีความเหมาะสมกับขนาดห้องที่ใช้และการใช้งานอย่างไรในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยในอากาศของเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์สำหรับใช้ภายในอาคารที่พักอาศัยที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าหรือไอออนโดยมีขนาดมิติของเครื่องต่างกัน โดยเปรียบเทียบกับเครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรองอากาศ HEPA ทั่วไปทดสอบในพื้นที่ใช้งานขนาดเดียวกัน จำนวน 5 เครื่อง โดยแบ่งเป็นเครื่องฟอกหลักการไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าหรือไอออนจำนวน 4 เครื่อง และเครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรองจำนวน 1 เครื่อง เพื่อเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับผู้บริโภคในการเลือกซื้อเครื่องฟอกอากาศแบบหลักการไฟฟ้าสถิตและแบบแผ่นกรองให้เหมาะสมกับการใช้งานภายในอาคาร

2. หลักการของเครื่องฟอกอากาศ

2.1. เครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรอง

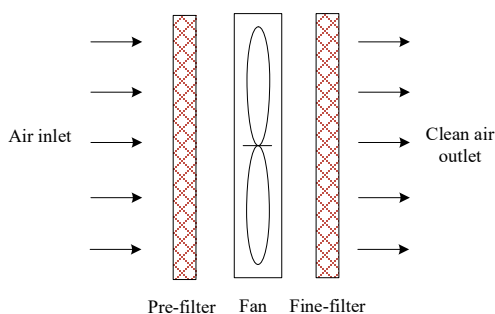
รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบและหลักการของเครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรอง เครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรองจะประกอบด้วยแผ่นกรองหยาบ (Pre-filter) แผ่นกรองละเอียด (Fine filter) และพัดลมสำหรับดึงอากาศ โดยพัดลมจะดึงอากาศผ่านแผ่นกรองหยาบเพื่อกรองอนุภาคขนาดใหญ่ก่อนจากนั้นอากาศทั้งหมดจะผ่านแผ่นกรองละเอียดเพื่อกรองอนุภาคขนาดเล็ก โดยการกรองอนุภาคแผ่นกรองเส้นใยไฟเบอร์ (Fibrous filter) จะพิจารณาการดักกรองอนุภาคด้วยเส้นใยเดี่ยว (Single fiber) ซึ่งประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว (Single-fiber efficiency) จะถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่กระทบเส้นใยต่อจำนวนอนุภาคที่จะกระทบหากเส้นกระแส (Streamlines) ไม่ถูกเบี่ยงเบนไปรอบเส้นใย ถ้ารัศมีของเส้นใย R_f กำจัดทุกอนุภาคที่อยู่ภายในชั้นความหนา Y แสดงดังรูปที่ 2 โดยประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว η จะถูกนิยามดังสมการที่ (1) ที่ได้จาก [4],[10]

$$\eta = \frac{Y}{R_f} \quad (1)$$

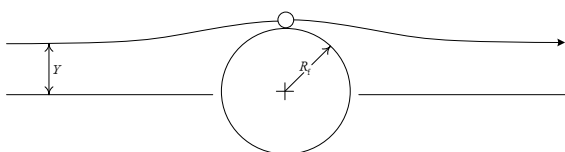
ประสิทธิภาพโดยรวมหรือประสิทธิภาพรวม E ของแผ่นกรองที่ประกอบด้วยหลายเส้นใยในแผ่นสามารถอธิบายตามความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยวได้ดังสมการที่ (2) ที่ได้มาจาก [4],[10]

$$E = 1 - \exp \left[\frac{-4\eta\alpha L}{\pi d_f(1-\alpha)} \right] \quad (2)$$

เมื่อ α คือความแข็งหรือความหนาแน่นของตัวกรอง (1-ความพรุน (Porosity)) L คือความลึกหรือความหนาของตัวกรองและ d_f คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยปกติแล้วเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกเบี่ยงเบนจากเส้นกระแสเนื่องจากหลายกลไกผลที่ตามมาคืออนุภาคจะชนกับพื้นผิวของเส้นใยและจะเกาะติดหรือสะสมอยู่บนเส้นใย โดยกลไกสำคัญที่ทำให้อนุภาคเกาะติดหรือสะสมตัวอยู่บนเส้นใยคือกลไกการแพร่ (Diffusion) กลไกการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย (Inertial impaction) กลไกการสกัดกั้น (Interception) กลไกการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravitational settling) และกลไกการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) ซึ่งประสิทธิภาพการสะสมตัวของอนุภาคบนแผ่นกรองจะขึ้นอยู่กับ ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่น รูปร่าง ประจุไฟฟ้า ความเร็วของการไหล และคุณสมบัติทางกลของทางไฟฟ้าของตัวกรอง ตัวกรองโดยปกติทั่วไปที่ใช้จะประกอบด้วย ใยแก้ว (Fiber glass) หรือ พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)



รูปที่ 1 หลักการของเครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรอง



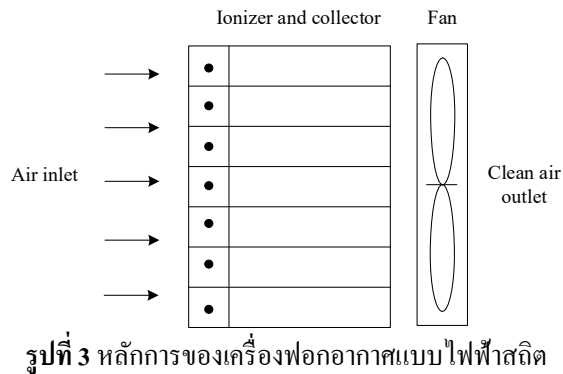
รูปที่ 2 การดักกรองอนุภาคด้วยเส้นใยเดี่ยว

2.2.เครื่องฟอกอากาศแบบไฟฟ้าสถิต

เครื่องฟอกอากาศแบบไฟฟ้าสถิตใช้กระบวนการการกรองอนุภาคแขวนลอยออกจากการไหลของอากาศโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า รูปที่ 3 แสดงหลักการของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้าจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด (Discharge electrode) และ คอลเลกชันอิเล็กโทรด (Collection electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรดโดยใช้คอลเลกชันอิเล็กโทรดเป็นกราวด์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์คอโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) ขึ้นโดยรอบๆ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด ไอออน (Ion) และอิเล็กตรอน (Electron) จะถูกสร้างขึ้นบริเวณที่เกิดคอโรนาดีสชาร์จและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรดกับคอลเลกชันอิเล็กโทรด เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคแขวนลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างจะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน ไอออนก็จะเกาะติดกับอนุภาคที่ไหลเข้ามาหรือที่เรียกว่าการอัดประจุอนุภาคเป็นผลทำให้อนุภาคที่มีประจุถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยแรงไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงकुलอมบีไปตกบนคอลเลกชันอิเล็กโทรดและถูกสะสมตัวอยู่บนคอลเลกชันอิเล็กโทรด โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากคอลเลกชันอิเล็กโทรดโดยการล้างทำความสะอาด โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต η สามารถประมาณค่าได้จากสมการ Deutsch-Anderson ดังสมการที่ (3) ที่ได้มาจาก [11]

$$\eta = 1 - \exp \left(-\frac{2\pi d L Z_p E}{Q} \right) \quad (3)$$

โดยมีรายละเอียดของการนำมาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคดังนี้ เมื่อ L คือความยาวของอิเล็กโทรดของชุดกรองอนุภาค d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดของชุดกรองอนุภาค Z_p คือความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค E คือสนามไฟฟ้า Q คืออัตราการไหลของชุดกรองอนุภาค



3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยในอากาศของเครื่องฟอกอากาศภายในอาคารเชิงพาณิชย์ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีขนาดและหลักการทำงานแตกต่างกันจำนวน 5 เครื่อง โดยแบ่งเป็นเครื่องฟอกหลักการไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าหรือไอออนจำนวน 4 เครื่อง และเครื่องฟอกอากาศแบบแผ่นกรองจำนวน 1 เครื่อง โดยแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการฟอกอากาศสำหรับพื้นที่ใช้งานตั้งแต่ 1–279 ตารางเมตร และมีเทคโนโลยีที่แตกต่างกันถึง 3 รูปแบบ ประกอบด้วยเทคโนโลยีโคโรนาดีชาร์จ (Corona Discharge) ที่จะทำการปล่อยประจุไอออนลบเสมือนช่วงฟ้าผ่าเพื่อจับเชื้อโรค และสิ่งที่เป็นพิษในอากาศได้ เทคโนโลยีฆ่าเชื้อในอากาศและบนพื้นผิว ที่มีระบบปล่อยประจุไอออนลบ (Photo Catalytic Ionization) และเทคโนโลยีแผ่นกรอง 3 ชั้นคือ แผ่นกรองอากาศขั้นต้น (Pre-Filters) เป็นกลุ่มแผ่นกรองอากาศขั้นต้น มีหน้าที่ดักจับฝุ่นขนาดใหญ่ก่อนจะผ่านเข้าสู่แผ่นกรองชั้นถัดไป แผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูงกรองอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน (HEPA) และแผ่นกรองดูดซับ สารเคมี และกลิ่นไม่พึงประสงค์ (Carbon) โดยมีขนาดของระบบกำลังไฟฟ้าใช้งานที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.03–66 วัตต์ เพื่อนำมาทดสอบถึงประสิทธิภาพการบำบัดหรือการกรองอนุภาคฝุ่นละอองของเครื่องฟอกแต่ละแบบว่ามีความเหมาะสมกับขนาดห้องและการใช้งานอย่างไร โดยทดสอบกับพื้นที่ใช้งานขนาดเท่ากัน รูปที่ 4(ก) แสดง

แผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศของเครื่องฟอกอากาศ ในการทดสอบการกรองอากาศของเครื่องฟอกอากาศทำการทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) ของบริษัท TSI (TSI Incorporated, Minnesota, USA) โมเดล 3076 สร้างอนุภาค Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) ในการทดสอบ รูปที่ 5 แสดงกราฟการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ของอนุภาคละอองลอย DEHS ที่วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (Scanning mobility particle sizer) จากรูปอนุภาคละอองลอย DEHS มีการกระจายขนาดในช่วงขนาด 0.015–1 μm มีค่าความเข้มข้นเชิงมวล (Mass concentration) ของอนุภาคละอองลอยประมาณ 330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และมีความเข้มข้นเชิงจำนวน (Number concentration) ของละอองลอยประมาณ 7,000 particles/cm³ ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบเครื่องฟอกทั้งหมดภายในห้องจำลองขนาดมิติ 6m × 6m × 3m หรือประมาณ 36 ตารางเมตร เป็นห้องที่มีขนาดมิติใกล้เคียงกับห้องนอนหรือห้องพักผ่อนภายในบ้าน [12] ซึ่งสอดคล้องตามกฎหมายกระทรวงฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543) ออกความตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 หมวด 2 ส่วนที่ 2 ข้อ 20 และข้อ 22 ว่าด้วยเรื่องห้องนอนในอาคารได้ระบุไว้ว่า ห้องนอนควรกว้างไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร ความสูงไม่น้อยกว่า 2.6 เมตร มีพื้นที่ภายในห้องไม่น้อยกว่า 8 ตารางเมตร เพื่อให้ได้ข้อมูลประสิทธิภาพของการใช้งานจริงของแต่ละเครื่อง โดยวิธีการทดสอบได้อ้างอิงตามวิธีการมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 [10] ในการทดสอบนี้ได้สร้างละอองลอยภายในห้องและมีการวัดความเข้มข้นละอองลอยที่ความสูงประมาณ 0.7 เมตร ด้วยเครื่องวัดฝุ่น DustTrak DRX Aerosol Monitor ของบริษัท TSI โมเดล 8533 ที่อัตราการไหลการเก็บตัวอย่าง 1.0 L/min โดยทำเป็นเวลา 120 นาทีโดยไม่มีการเปิดเครื่องฟอกอากาศ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติใช้งานของเครื่องฟอกอากาศที่ทดสอบทั้ง 5 เครื่อง

คุณสมบัติใช้งาน	เครื่องฟอกอากาศที่ทดสอบ				
	A	B	C	D	E
เทคโนโลยี	โคโรน่าดิซชาร์จ	Photo Catalytic Ionization	แผ่นกรอง Filter Pre, HEPA ,Carbon	Photo Catalytic Ionization	Photo Catalytic Ionization
ระบบปล่อยประจุ	ประจุไอออนลบ	ประจุไอออนลบ	ไม่มี	ประจุไอออนลบ	ประจุไอออนลบ
ระบบแจ้งซ่อมบำรุง	มี	มี	มี	มี	มี
ระบบกำจัดกลิ่น	มี	มี	ไม่มี	มี	มี
ผลิตอากาศบริสุทธิ์	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	550 ลบ.ม./ ชั่วโมง	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
ระบบไฟฟ้าใช้งาน	220V, 50Hz	220V, 50Hz	220V, 50Hz	220V, 50Hz	220V, 50Hz
กำลังไฟฟ้าใช้งาน	<0.03 วัตต์	30 วัตต์	66 วัตต์	30 วัตต์	30 วัตต์
ขนาดเครื่อง (ก × ข × ส)	5.6×6.4×2.4 cm ³	11.6 ×12.8×4.8 cm ³	26.6×26.6×73.5 cm ³	16.5×17.8×16.5 cm ³	22.9×30.5×30.5 cm ³
พื้นที่ใช้งาน	1 ตรม.	30 ตรม.	60 ตรม.	139 ตรม.	279 ตรม.

เพื่อวัดความเข้มข้นอนุภาคละอองลอยขณะที่ยังไม่มีเครื่องฟอกอากาศเพื่อเก็บข้อมูลการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่นตามธรรมชาติ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบโดยสร้างอนุภาคตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่าเดิมโดยทำการเปิดเครื่องบำบัดและทำการวัดความเข้มข้นอนุภาคละอองลอยทุก 1 นาทีและหาค่าเฉลี่ยทุก 10 นาทีเป็นเวลา 120 นาทีเพื่อเก็บข้อมูลการตกตะกอนตัวของอนุภาคฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศและนำข้อมูลการวัดความเข้มข้นละอองลอยที่ได้จากการวัดในขณะที่เครื่องดับแบบปิด (การตกตะกอนตัวของอนุภาคฝุ่นตามธรรมชาติ) และเปิด (การตกตะกอนตัวของอนุภาคฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศ) หาค่าประสิทธิภาพการกรองหรือการตกตะกอนอนุภาคของเครื่องเทียบกับเวลาการบำบัดและทำการทดลองซ้ำ 3 การทดลองต่อเครื่อง รูปที่ 4(ข) แสดงรูปถ่ายขณะทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดอากาศ โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกที่ไม่รวมการตกตะกอนตัวของฝุ่นตามธรรมชาติ η_r คำนวณได้ดังสมการที่ (4) ที่ได้มาจาก [13]

$$\eta_r = \left(1 - \frac{c_t}{c_n}\right) \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ c_t คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคของการตกตะกอนตัวของอนุภาคฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศ และ c_n คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคของการตกตะกอนตัวของอนุภาคฝุ่นตามธรรมชาติ และค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกที่รวมการตกตะกอนตัวของฝุ่นตามธรรมชาติ η_n สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5) ที่ได้มาจาก [13]

$$\eta_n = \left(1 - \frac{c_0}{c_i}\right) \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ c_0 คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคของการตกตะกอนของอนุภาคฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศที่เวลาที่ 0 นาทีและ c_i คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคของการตกตะกอนตัวของอนุภาคฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศที่เวลาที่ i นาที สำหรับสมรรถนะของเครื่องฟอกอากาศสามารถประเมินได้ด้วยค่า CADR (Clean Air Delivery Rate) ตามมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 ค่า CADR คืออัตราการส่งอากาศสะอาดคำนวณจากขนาดของห้องทดสอบ (Test Chamber) การตกตะกอนตัวของฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศและการตกตะกอนตัวของฝุ่นตามธรรมชาติ ในห้องทดสอบ (natural decay) โดยค่า

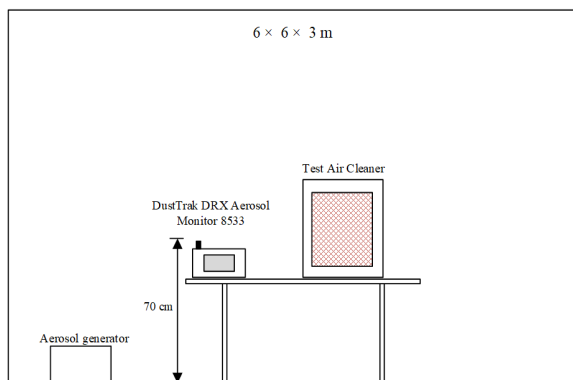
CADR ของเครื่องฟอกอากาศคำนวณได้ดังสมการที่ (6) ที่ได้จาก [14],[15]

$$CADR = V(k_t - k_n) \quad (6)$$

เมื่อ V คือขนาดของห้องทดสอบ (ft^3) k_t คือการตกตะกอนตัวของฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศและ k_n คือการตกตะกอนตัวของฝุ่นตามธรรมชาติ โดยค่าการตกตะกอนตัวของฝุ่นขณะเปิดเครื่องฟอกอากาศและการตกตะกอนของฝุ่นตามธรรมชาติคำนวณได้ดังสมการที่ (7) ที่ได้จาก [14],[15]

$$k = \frac{(\sum_1^n t_i \ln C_{t_i}) - \frac{(\sum_1^n t_i)(\sum_1^n \ln C_{t_i})}{n}}{\sum_1^n t_i^2 - \frac{(\sum_1^n t_i)^2}{n}} \quad (7)$$

เมื่อ C_t คือความเข้มข้นของฝุ่นที่เวลา t และ n คือจำนวนของจุดข้อมูลที่ใช้ในการถดถอย (Regression) ซึ่งค่า k คือค่าคงที่การตกตะกอนมีหน่วยเป็น min^{-1} และ t คือเวลามีหน่วยเป็นนาฬิกา

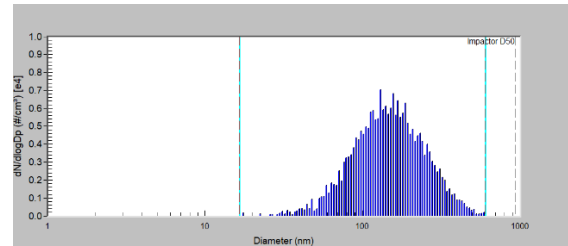


(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) ไดอะแกรมทดสอบ และ (ข) ภาพถ่ายทดสอบ



รูปที่ 5 การกระจายขนาดของอนุภาค DEHS.

ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศในการศึกษา

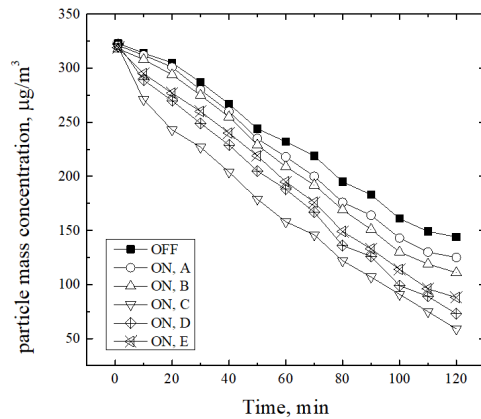
ตัวแปร	ช่วงการวิเคราะห์
ชนิดของอนุภาค	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
ความเข้มข้นของอนุภาค	320–330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ขนาดอนุภาค	<1.0 μm
ความชื้นสัมพัทธ์ทดสอบ	50–70 %RH
ทดสอบความดันบรรยากาศ	1 atm
อุณหภูมิในขณะทดสอบ	25°C

จากตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศ โดยแสดงของตัวแปรและช่วงการวิเคราะห์ที่ทดสอบ ในการทดสอบนี้จะอนุภาคชนิด Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาค ในช่วง 320–330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 1.0 ไมโครเมตร จะควบคุมอุณหภูมิในขณะทดสอบที่ 25°C ความดันบรรยากาศขณะทดสอบที่ 1 atm และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องขณะทดสอบ 50–70 %RH

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

รูปที่ 6 แสดงการลดลงของปริมาณฝุ่นรวมภายในห้องทดสอบในขณะที่เปิดเครื่องฟอกอากาศในช่วงเวลา 1–120 นาที จากรูปจะเห็นความแตกต่างระหว่างการปิด/เปิดเครื่องฟอก ในกรณีที่ปิดเครื่องฟอกค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นนาที่ที่ 1 เท่ากับ 323 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีอนุภาคฝุ่นมีการลดลงตามธรรมชาติเหลือ 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ การลดลงหรือการตกตะกอนของฝุ่นโดยธรรมชาติเกิดจากกลไกการแพร่กระจายของอนุภาค (Particle diffusion) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 μm และการแพร่กระจายกับการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วง (Gravitational settling) ของ

อนุภาคสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.1\ \mu\text{m}$ โดยเมื่อเปิดเครื่องฟอกจะเห็นค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นมีการลดลงอย่างต่อเนื่องหมายความว่าเครื่องฟอกสามารถลดความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นภายในห้องจำลองได้



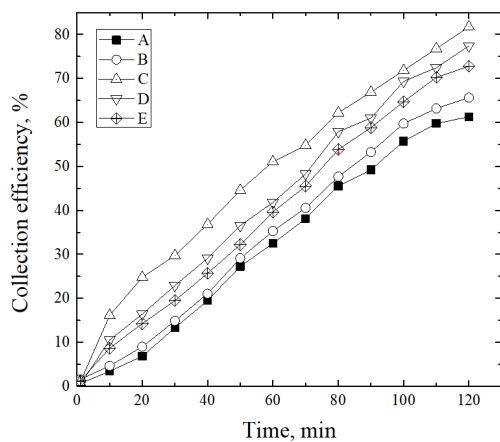
รูปที่ 6 การลดลงของปริมาณฝุ่นรวมภายในห้องทดสอบ

จากรูปที่ 3 เมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศ A ค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ $321\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีฝุ่นรวมลดลงเหลือ $125\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศ B ค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ $318\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีฝุ่นรวมลดลงเหลือ $111\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศ C ค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ $320\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีฝุ่นรวมลดลงเหลือ $59\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศ D ค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ $322\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีฝุ่นรวมลดลงเหลือ $73\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศ E ค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นรวมนาที่ที่ 1 เท่ากับ $319\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีฝุ่นรวมลดลงเหลือ $88\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ จากผลการทดสอบพบว่าค่าการลดลงของความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคฝุ่นแปรผันตรงกับระยะเวลาการทดสอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาการทดสอบที่นานขึ้นทำให้อากาศภายในห้องที่ยังคงมีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยอยู่หมุนเวียนผ่านเข้าไปในเครื่องฟอกซ้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศของเครื่องฟอกคงที่ในช่วงระยะเวลาของการทดสอบ ซึ่งการหมุนเวียนอากาศนี้ทำให้อากาศที่ยังมีอนุภาคแขวนลอยค้างอยู่ถูกดักกรองด้วยตัวกรองเส้นใยหรือตัวกรองไฟฟ้าสถิตและทำให้ความเข้มข้น

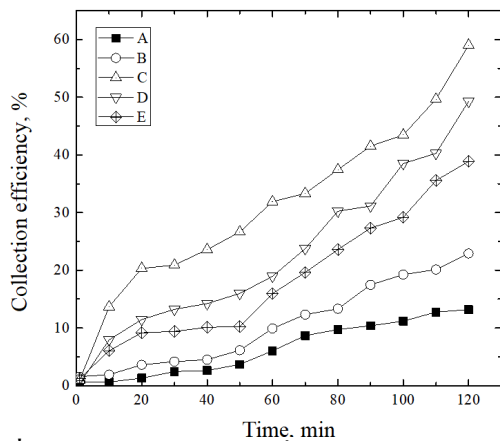
เชิงมวลของอนุภาคฝุ่นภายในห้องลดลงต่อเนื่องซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tintachart et al. [13] ที่ได้รายงานว่าการลดลงของความเข้มข้นของอนุภาคแปรผันตรงกับระยะเวลาในการใช้งานของเครื่องฟอกอากาศเช่นกัน

ในขณะที่ได้ปิดและเปิดเครื่องฟอกในช่วงเวลา 1-120 นาทีของอนุภาคฝุ่นในขณะปิดและเปิดเครื่องฟอกที่เวลาต่างๆ รูปที่ 7-8 แสดงประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกที่รวมและไม่รวมการตกตะกอนตัวของฝุ่นตามธรรมชาติ ในกรณีที่รวมการตกตะกอนของฝุ่นตามธรรมชาติจะให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกสูงสุดเท่ากับ 61.30, 65.63, 81.73, 77.39 และ 72.75 % ที่ 120 นาทีสำหรับเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E ตามลำดับ ในกรณีที่ไม่วรวมการตกตะกอนตัวของฝุ่นตามธรรมชาติจะให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกสูงสุดเท่ากับ 13.19, 22.91, 59.02, 49.03 และ 38.88 % ที่ 120 นาทีสำหรับเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคฝุ่นในอากาศของเครื่องทดสอบกำหนดให้ต้องไม่ต่ำกว่า 99 % จึงจะยอมรับตามมาตรฐานนี้ รูปที่ 9 อัตราการปล่อยอากาศสะอาด (CADR) ของเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E จากรูปพบว่าค่า CADR สำหรับของเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E มีค่าเท่ากับ 4.47, 7.58, 24.36, 17.82 และ $13.7\ \text{ft}^3/\text{h}$ ตามลำดับ และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของค่า CADR สำหรับของเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E จากการทดลองเท่ากับ 0.146, 0.126, 0.510, 0.388 และ 0.439 ตามลำดับ จากค่า CADR แสดงให้เห็นว่าค่า CADR มีความสัมพันธ์กับขนาดและอัตราการปล่อยอากาศของเครื่องฟอกอากาศ (ft^3/h) เครื่องฟอกอากาศที่มีอัตราการปล่อยอากาศออกจากเครื่องสูงก็จะมีค่า CADR สูงและมีค่าประสิทธิภาพการกรองที่สูงขึ้นตาม ในการเลือกใช้เครื่องฟอกอากาศจำเป็นต้องพิจารณาขนาดห้องที่ใช้งานต้องเหมาะสมกับขนาดห้องที่กำหนดตามคุณสมบัติของเครื่องฟอกอากาศปกติกำหนดเป็น ตารางเมตร เมื่อเทียบกับเครื่องฟอกอากาศที่มีขนาดตารางเมตรเท่ากันควรเลือกเครื่องที่มีค่า CADR สูงที่สุดและมีเอกสารรับรองว่าผ่านการทดสอบมาตรฐานที่มี

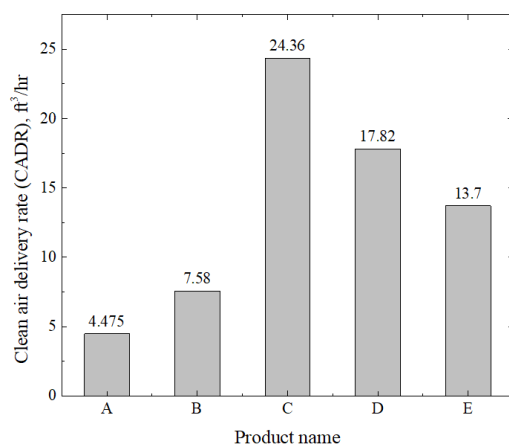
ความน่าเชื่อถือ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้งานได้ตรงตามความเหมาะสมของพื้นที่ใช้งาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการกรองที่รวมผลการตกตะกอนของฝุ่นตามธรรมชาติของเครื่องในช่วงเวลา 1–120 นาที



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการกรองที่ไม่รวมการตกตะกอนของฝุ่นตามธรรมชาติของเครื่องในช่วงเวลา 1–120 นาที



รูปที่ 9 อัตราการปล่อยอากาศสะอาดของเครื่องฟอก

5. สรุปผล

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยในอากาศของเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์สำหรับใช้ภายในอาคารที่พักอาศัยที่มีขนาดและหลักการที่แตกต่างกันจำนวน 5 เครื่อง ได้แก่ เครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E เพื่อเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับผู้บริโภคในการเลือกซื้อหรือเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคฝุ่นของเครื่องฟอกทั้ง 5 เครื่องตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 กับเครื่องกำเนิดอนุภาคละอองลอยภายในห้องทดสอบขนาด $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3\text{ m}$ ในการทดสอบใช้เครื่องกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์สร้างอนุภาค Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) ที่มีการกระจายขนาดในช่วงขนาด $0.015\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ ที่ค่าความเข้มข้นเชิงมวล ของอนุภาคละอองลอยประมาณ $330\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ และมีความเข้มข้นเชิงจำนวนของละอองลอยประมาณ $7,000\text{ particles}/\text{cm}^3$ เครื่องวัดฝุ่นได้ถูกใช้วัดค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคฝุ่นภายในห้องทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่าค่าการลดลงของความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคฝุ่นแปรผันตรงกับระยะเวลาการทดสอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาการทดสอบที่นานขึ้นทำให้อากาศภายในห้องที่ยังคงมีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยอยู่หมุนเวียนผ่านเข้าไปในเครื่องฟอกซ้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศของเครื่องฟอกคงที่ในช่วงระยะเวลาของการทดสอบ โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นในกรณีนี้ที่รวมการตกตะกอนของฝุ่นตามธรรมชาติจะให้ของเครื่องฟอกสูงสุดเท่ากับ 61.30, 65.63, 81.73, 77.39 และ 72.75 % ที่ 120 นาที สำหรับเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกรองอนุภาคฝุ่นในกรณีที่ไม่รวมการตกตะกอนของฝุ่นตามธรรมชาติของเครื่องฟอกสูงสุดเท่ากับ 13.19, 22.91, 59.02, 49.03 และ 38.88 % ที่ 120 นาที เครื่องฟอก A, B, C, D และ E ตามลำดับ ในการทดสอบนี้พบว่าค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E มีค่าเท่ากับ 4.47, 7.58, 24.36, 17.82 และ 13.7 ft^3/h ตามลำดับ และมีความเป็นเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard

Deviation) ของค่า CADR สำหรับของเครื่องฟอกอากาศ A, B, C, D และ E จากการทดลองเท่ากับ 0.146, 0.126, 0.510, 0.388 และ 0.439 ตามลำดับ

ดังนั้น ในการเลือกใช้เครื่องฟอกอากาศจำเป็นต้องพิจารณาเลือกขนาดเครื่องฟอกอากาศให้เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ใช้งานที่ได้กำหนดตามคุณสมบัติของเครื่องฟอกอากาศนั้นๆ ปกติกำหนดเป็นตารางเมตร ข้อพิจารณาเมื่อเทียบกับเครื่องฟอกอากาศที่มีขนาดพื้นที่ใช้งานตารางเมตรเท่ากัน ควรเลือกเครื่องฟอกอากาศที่มีค่า CADR (Clean Air Delivery Rate) สูงที่สุดและมีเอกสารรับรองว่าผ่านการทดสอบมาตรฐานที่น่าเชื่อถือ เช่น มาตรฐาน ANSI/AHAM AC-1-2015 และอื่นๆ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ ได้รับการสนับสนุนจากเงินจากโครงการการจัดการเมืองเชิงระบบในภาวะฉุกเฉินเพื่อรับผลกระทบของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) ภายใต้การสนับสนุนของหน่วยบริหารและจัดการทุนวิจัยและนวัตกรรมด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) และขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] *COVID-19 situation report*, Department of Disease Control, Oct. 24, 2020. [Online]. Available: <https://covid19.ddc.moph.go.th/>
- [2] D. Thepnuan, N. Yabueng, S. Chantara, T. prapamontol and Y. I. Tsai, "Simultaneous Determination of Carcinogenic PAHs and Levoglucosan Bound to PM2.5 for Assessment of Health Risk and Pollution Sources during a Smoke Haze Period," *Chemosphere*, vol. 257, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127154.
- [3] P. Intra, *Electrostatic aerosol measurement and control technology*, Chula Press, Bangkok, Thailand, 2019.
- [4] WC. Hinds, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1999.
- [5] A. Fushimi, S. Hasegawa, K. Takahashi, Y. Fujitani, K. Tanabe and S. Kobayashi, "Atmospheric Fate of Nuclei-mode Particles Estimated from the Number Concentrations and Chemical Composition of Particles Measured at Roadside and Background Sites," *Atmospheric Environment*, vol.42, no.5, pp.949–959, 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.019.
- [6] P. Intra and T. Siri-achawawath, "Development of an Online Particulate Monitoring System for Measurement of the Mass and Number Concentrations and Size Distributions of Ambient PM10, PM2.5 and sub-400 nm Particles," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol.41, no.6, pp.1339–1347, 2019.
- [7] U. Vinitketkumnun, T. Chewonarin and N. Chunram, "Oxidative damage to DNA from alveolar lung cell lines by air-borne particulate matter PM 2.5 & PM 10 extractable from Chiang Mai and Lumpun," The Thailand Research Fund, Bangkok, Thailand, final Rep. 2007.
- [8] A. Srivastava, "COVID-19 and Air pollution and Meteorology-an Intricate Relationship: A Review," *Chemosphere*, vol.263, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128297.
- [9] When do I need to replace the air filter, Khaosod Online, Jan. 3, 2020 [Online] Available: https://www.khaosod.co.th/pr-news/news_3313589,
- [10] K. Willeke and P.A. Baron, *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1993.
- [11] H. J. White, "Particle charging in electrostatic precipitation," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 2, pp. 1186–1191, 1951, doi: 10.1109/T-AIEE.1951.5060545.

-
- [12] Ministerial regulations Issue 55. (2000). *Building Control Act 1979*. Available: [https:// download.asa.or.th/03media/04law/cba/mr/mr43-55-upd68.pdf](https://download.asa.or.th/03media/04law/cba/mr/mr43-55-upd68.pdf)
- [13] K. Tintachart, W. Norkaew, A. Yawootti and P. Intra, "Modification and Field Testing of an Indoor Electrostatic Air Purifier," *Journal of KMUTNB*, vol. 27, no.1, pp. 31–46, 2017.
- [14] Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners, ANSI/AHAM AC-1-2006, Association of Home Appliance Manufacturers Washington, D.C., USA, 2006.
- [15] H. Kim, B. Han, C. G. Woo, Y. Kim, G. Lim and W. G. Shin, "Air Cleaning Performance of a Novel Electrostatic Air Purifier Using an Activated Carbon Fiber Filter for Passenger Cars," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5867–5874, 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2745499.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความปีที่ 38 ฉบับที่ 1 - 4

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีในโอกาสต่อไป

ศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
ศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์
รศ.ดร.แหลมทอง เหล่าคงถาวร
รศ.ดร.ชลิตา อุ่ตะเกา
รศ.ดร.รณชัย ดิยะรัตนาศัย
รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา
รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์
รศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์ธนเดช
รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
รศ.ดร.ชุมพล ยวงโย
รศ.ดร.อาจันต์ น่วมสำราญ
รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชยงยิ่งเจริญ
ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์
ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์
ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว
ผศ.ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์
ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์
ผศ.ดร.วุฒิชัย ขาติพัฒนานันท์
ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข
ผศ.ดร.จรัส พิทักษ์ศฤงคาร
ผศ.ดร.จารุวิเศษ ปราบณศักดิ์
ผศ.ดร.นภศุล วงษ์วานิช
ผศ.ดร.ชตชนก อัทธพงศ์
ผศ.ดร.จรัสวรรณ โกยวานิช
ผศ.ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา
ผศ.ดร.อัมภวิทย์ สุจริตพงศ์
ผศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม
ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข
ดร.ช่อธรรม ศรีนิล

ผศ.ดร.วุฒิพงศ์ เมืองน้อย
ผศ.ดร.พิชญ์ สุธีวรรณ
ผศ.ดร. วศิน เกียรติโกล
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สรวิชัย เยาวสุวรรณไชย
บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ภาสุระ อังกุลานนท์
ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน
คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.บุญชัย วัจจะตรากุล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และการบิน-อวกาศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ภูตินันท์ เอื้อวงศ์สุวรรณ
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ประสิทธิ์ ทิมพุด
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร.เด่นชัย วรเศวต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เลื่อน
รศ.ดร.นราภรณ์ เกาประเสริฐ
ผศ.ดร.วรวิทย์ หวังวัชรกุล
ผศ.ดร.รมิตายุ อยู่สุข
ผศ.ดร.สุวิกรมณ์ วิชกุล
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.อมรฤทธิ์ พุทธิพัฒน์ขจร
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.ศิริพงศ์ อติพันธ์
ผศ.ดร.ชินภัทร ทิพย์โสภาส
ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์
รศ.ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล
ผศ.ร้อยเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาการวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.ชลอธร ธรรมแท้
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สำนักวิชาการวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รศ.ดร.วชรภูมิ เบญจโอฟาร
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สำนักวิชาการวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์
ผศ.ดร. กิตติชัย อธิกุลรัตน์
ผศ.ดร.จิรวรรณ คล้อยภัยันต์
ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.วรณี มังคละศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศ.ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล
บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.ปรเมศวร์ เหลือเทพ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผศ.ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์
ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ดร.ลัดดา ตันวานิชกุล
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.กอบปร ศรีนาวัน
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร.อำนาจ เรืองวารี
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
และโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว
รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.มานพ แก้วโมราเจริญ
ผศ.ดร.เกรียงไกร อรุณทยานนท์
ผศ.ดร.นพดล กรประเสริฐ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผศ.ดร.บรรหาญ ลีลา
ผศ.ดร.ฤกษ์วัลย์ จันทรส
ดร.สัญญา ยัมศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.สายสุนีย์ พุทธาคูณเจริญ
ผศ.ดร.นที สุริยานนท์
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ผศ.ดร.วาโย ช่างเจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความสำหรับวารสารลาดกระบัง

การเตรียมต้นฉบับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารลาดกระบังได้แบ่งประเภทของบทความเป็น 2 ประเภท ได้แก่ บทความทางวิชาการ และบทความวิจัย และได้ให้คำนิยามดังนี้

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ ได้แก่ มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

ผู้แต่งบทความควรเขียนบทความอยู่ระหว่าง 8-14 หน้ากระดาษขนาด A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวารสารลาดกระบัง ทั้งนี้บทความต้นฉบับต้องได้รับการอนุมัติยืนยันจากผู้แต่งร่วมทุกคน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาหรือตีพิมพ์ในวารสารวิชาการอื่น ๆ ให้ผู้แต่งส่ง (1) บทความพร้อมกับ (2) จดหมายนำ (Cover Letter) ที่ระบุ

- ขอบเขต ของบทความว่าสอดคล้องกับขอบเขตของวารสารในหัวข้อใด
- ความสำคัญของหัวข้อบทความหรือปัญหางานจริง
- 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) เป็นคอลัมน์เดียว 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 สำหรับผู้รับผิดชอบประสานงาน (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 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.
- [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. Juetten 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 ที่มีการอ้างเลข 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 ควรมีการอ้างอิงภายใน เนื้อหาของภาคผนวก เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ง่าย ผู้แต่งสามารถแบ่ง ภาคผนวกออกเป็นหลาย ๆ ส่วนได้ เช่น ภาคผนวก 1 แสดงถึงการรวบรวม ข้อมูลจากการสำรวจ ภาคผนวก 2 แสดง การรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงาน ภาครัฐและเอกชน เป็นต้น

2.9 ตารางและรูป และสมการ

การแทรกตารางและรูป และสมการ ต้องมีความคมชัดไม่น้อยกว่า 300 dpi ให้ แทรกไว้ในเนื้อหาบทความ มีคำอธิบายประกอบสั้นๆ ที่สามารถสื่อความหมาย ได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ

กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่...” และมี คำอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง

กรณีที่เป็นรูปให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า“รูปที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้ได้ รูป กรณีมีรูปหลายรูปที่จะแสดงในครั้งเดียว ให้แบ่งรูปภาพด้วยตัวอักษร (ก), (ข), (ค) สำหรับบทความภาษาไทย และ ตัวอักษร (a), (b), (c) สำหรับบทความ ภาษาอังกฤษ

กรณีเป็นการแทรกสมการ ให้ระบุลำดับที่ของสมการไว้ทางด้านขวาของสมการ ภายในวงเล็บ เช่น (1) และการอ้างอิงในเนื้อหา ให้ใช้คำว่า สมการที่ (1)

3. เกณฑ์การพิจารณาบทความ

เกณฑ์การพิจารณาบทความสำหรับวารสารวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตนี้มีดังนี้ เนื้อหาของ บทความมีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ เนื้อหา มีความสมบูรณ์ และ

โครงสร้างภาษาที่ใช้มีความชัดเจน ถูกต้องตามหลักทางวิชาการ ทั้งสมมุติฐาน / วัตถุประสงค์ การนำเสนอมีความชัดเจนกระชับ และการจัดรูปแบบของบทความ การอภิปรายผล และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ

บทความจะต้องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชานั้นๆ อย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งกองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และสงวนสิทธิ์ในการตัดสินใจพิมพ์หรือไม่ก็ได้ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยส่งเป็นไฟล์งาน .pdf และ .doc เป็น Word 2010

4. วิธีการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารลาดกระบัง

บทความที่ส่ง เปิดรับทั้งจากบุคคลภายใน และภายนอกสถาบันฯ โดยบทความนั้น ต้องมีความยาวไม่เกิน 14 หน้า 2 คอลัมน์ ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 15 หน้า และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ผ่านทางเว็บไซต์ของวารสารลาดกระบังได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

ผู้ประสานงานและสถานที่ติดต่อ:

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

งานวิจัยและนวัตกรรม (ส่วนวารสารลาดกระบัง)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร 6 ชั้น (ตึก A) ชั้น 2 เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

หมายเลขติดต่อ :

โทรศัพท์(เบอร์กลาง) 02-329-8000 ต่อ 3465

โทรศัพท์สายตรง/โทรสาร : 02-327-8317

โทรศัพท์มือถือ 086-106-4414



เลขที่อ้างอิง.....

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

ประเภทบทความ ☐ บทความวิชาการ ☐ บทความวิจัย
Keywords (คำสำคัญ).....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย) และ (ภาษาอังกฤษ)
1..... 1.....
2..... 2.....
3..... 3.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

เบอร์โทรศัพท์..... E-mail.....

**ข้าพเจ้าได้แนบบทความที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ตามคำแนะนำรูปแบบการเขียนบทความมาพร้อมนี้
และรับรองว่า**

- ☐ ได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความครั้งนี้จากผู้ร่วมเขียนบทความแล้ว (ถ้ามี)
- ☐ ข้าพเจ้า และผู้ร่วมเขียนบทความ (ถ้ามี) จะรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี
- ☐ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความยังไม่เคยตีพิมพ์ หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งสามารถประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 2 ท่าน โดยระบุชื่อ-นามสกุล
ตำแหน่งทางวิชาการ, E-mail และเบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้)

1. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....
2. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....

ใบรับรอง

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
ตำแหน่ง.....สถานที่ทำงาน.....
ที่อยู่.....
โทรศัพท์.....มือถือ.....โทรสาร.....
e-mail : Line :
ขอรับรองว่า(นาย/นาง/นางสาว).....
เป็นนิสิต/นักศึกษามหาวิทยาลัย.....ปีการศึกษา.....
ระดับปริญญา.....ชั้นปีที่ จริง และได้พิจารณาบทความแล้วว่ามีความเหมาะสมที่จะ
ขอเสนอเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

***กรณีที่เป็นนิสิตนักศึกษา ต้องให้อาจารย์ที่ปรึกษากรอกใบรับรอง (วิทยานิพนธ์ / การศึกษาค้นคว้าอิสระ)

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) 329-8000 Ext. 3464, 3465

Fax: (662) 329-8317

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

Editorial Staff:

Miss.Chanunchida Nobnom

Liaise & Member Relationships

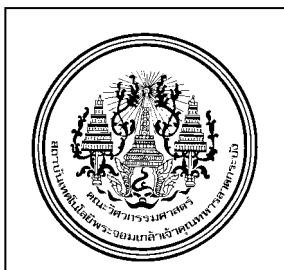
Create Original Artwork

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 38 Number 4

December 2021

Research Papers

1. Assessment on Speed Governor Performance of Turbine of Vajiralongkorn Hydropower Plant 1
S. Phothiyanon and M. Jaikuson
2. The Efficiency Enhancement of Warehouse Management using ABC and Forecasting Technique: A Case Study of Storage System 13
T. Saengsuwandee and S. Klongboonjit
3. Optimization of Nurse Scheduling Problem: A hospital case study 23
K. Thongsopa and U. Janjarassuk
4. PI Controller Design of Heat Control Systems using ATS and PSO 33
S. Chinsut
5. Regression Analysis Applying for Defection Rescreening of Microelectronics Product 42
N. Katemukda
6. Application of Building Information Modeling to Analyze Rebar Cutting Patterns with Minimum Waste 51
N. Wongwai W. Srisomboon and N. Phetthet
7. A Study of Factor on Turbidity Removal Efficiency for Sludge Recirculation Clarifier 67
W. Onnakkum
8. Post-Fire Flexural Strength of The Fly Ash Concrete Beams and Rapid Cooling Down 78
W. Wongprachum and C. Chaikaew
9. Financial Feasibility Study of Installing Solar Photovoltaic Rooftop for Residential Sector 87
T. Tantisattayakul
10. Calibration of Strength and Stiffness Parameters on Soil Model of Sand-Tyre Crumb Mixtures by FEM 99
P. Pongvithayapanu U. Pornpreedawan and D. Phusing
11. Impact of exponential smoothing forecasting technique on bullwhip effect index under a dual-supplier supply chain system 115
K. Sirikasemsuk W. Thangjai T. Kiatcharoenpol L. Treeranurat D. Luanwiset A. Sukmilin J. Kaewluan J. Ketkaew and K. Leerojanaprapa
12. Conceptual Design and Aerodynamic Analysis of Tail-Sitter VTOL UAV 130
N. Punprasert and W. Jiajan
13. Optimal Composition on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites Using Mixture Design and Response Surface Methodology 151
C. Srivabut C. Homkhiew and S. Rawangwong
14. Evaluation of the Filtration Efficiency of Aerosol Particles of the Commercial Air Purifiers for indoor use 166
V. Asanavijit P. Intra W. Rattanachan and P. Hansapiromchoke