



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 40 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2566

บทความวิจัย

1. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบายตะกอนท้องน้ำของฝายสันมน ฝายหยัก และฝายคีย์เปียโน พงศ์พันธุ์ กาญจนการณ สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ พลศิษฐ์ ศรีโพธิ์ ภาณุพงศ์ นิโบล และ รุ่งทิพย์ เหลือหลาย 1
2. มาตรการปรับตัวต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลโดยการเดิมทรายชายหาด ณ หาดบ้านเพ จังหวัดระยอง ภัทรกร นิธินรางกูร และ สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง 15
3. การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของการแตกร้างและการเกิดการกักตัวของสนิม โดยใช้แบบจำลอง เชิงตัวเลขสำหรับระบบเฟ้าระวางสะพาน พิชญะ ชัยรุ่งเรืองศรี ญัฐดนัย สันสมุทผลดง และ กวิน สายประเสริฐกิจ 24
4. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบสูบน้ำบำบัดน้ำด้วยวิธีการ DMAIC กรณีศึกษา โรงพยาบาลพ่อท่านคล้าย วาจาสิทธิ์ อำเภอฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช ชัยณรงค์ ศรีระบุตร สุชาติ จันทรมณีนัย อธิโรจน์ มะโน และ จริญญา ธรรมใจ 39
5. การทดสอบฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์แบบสองชั้นเพื่อกันความร้อน พีระธเนศ ซึ่งเกิดพงษ์ธัน ภูมิ เจือศิริภักดี และ สิทธิชัย รัชชโยธิน 53
6. พฤติกรรมโคงเตาะของคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉากที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น จักขดา อารังวุฒิ ศิตาญชลี ชายทวีป สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ชาญชัย เกาะปก ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี และ จีรศักดิ์ สุพรมวัน 65
7. การพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน ด้วย MIT App Inventor สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพ กระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บ กรณีศึกษาสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ เจนณรงค์ ใจเกลี้ยง และ จุฑามาศ ชุมลักษณ์ 76
8. การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ PM1, PM2.5 และ PM10 จากการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร รติมา ศรีวรพันธุ์ ญัฐศักดิ์ บุญมี ธนศ อรุณศรีโสภณ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย 94
9. การประเมินความรุนแรงภายใต้การปลดปล่อยต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ในพื้นที่ที่มีความแตกต่าง ของปริมาณโหลดและกำลังการผลิตสูง ชัยสิทธิ์ วันน้อย และ นฤมล วันน้อย 104
10. ประสิทธิภาพการรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลัง โดยเหล็กเส้น จักขดา อารังวุฒิ พิรุฬห์ลักษณ์ คำผาย สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี และ จีรศักดิ์ สุพรมวัน 117
11. การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมปาวด์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ศิวรี อ่อนเอื้อน และ สมเจตน์ พชรพันธ์ 128
12. การปรับปรุงกระบวนการลำเลียงดุมล้อรถจักรยานยนต์โดยเทคนิคโพคา-โยเกะ ภาควุมิ ใจชมภู ศิวศิษฐ์ ปิจมิตร์ สุวรรณ ศรียาบ นุชจรินทร์ สาลิกา และ ปรีดา จิวปัญญา 138

“วิศวกรรมลาดกระบ้ง”

วิศวกรรมลาดกระบ้งเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

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

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

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

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมี มาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมิใช่ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่นำเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

- | | |
|---------------------------|---|
| ชื่อเรื่อง | ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ |
| ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน | ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ |
| สถานที่ทำงาน | ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน |
| บทคัดย่อ | ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ |
| เนื้อความ | ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อตามลำดับ |
| | 1. บทนำ |
| | 2. ทฤษฎี |
| | 3. การทดลองและผลการทดลอง |
| | 4. สรุป |
| | 2.1 หลักการของ..... |
| | 2.2 หลักการใหม่..... |

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิงโดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

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

การส่งบทความ

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

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8301# 207

โทรสาร (662) 329-8301# 207

ที่ปรึกษา

คนบดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อุมา สืบญะเรือง

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร.พิณช ธนชัยโชคศิริกุล

กองบรรณาธิการเฉพาะด้าน (Transaction)

ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศรฐ์ พัฒนเดช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาทร ลาภเจริญสุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

ติดต่อประสานงาน

จัดทำต้นฉบับ Artwork

นายวิรัช จุลไกรวัลสุจริต

พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

นายทนงศักดิ์ ใจชื่นแสน

ออกแบบปก



วิศวกรรมลาดกระบัง

School of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒ สุจิตรจรร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบุรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย รั้วรุจา

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.ปิติเขต สุรักษา

ภาควิชาวิศวกรรมดนตรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร (เกษียณอายุ)

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ (เกษียณอายุ)

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

School of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 1 เมษายน 2565

เรื่อง แจ้งเพื่อทราบ

เรียน อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง” มีความประสงค์ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิศวกรรมลาดกระบัง ดังนี้

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

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.อูมา สีนุญเรือง)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบายตะกอนท้องน้ำของฝายสันมน ฝายหยัก และ ฝายคีย์เปียโน

Comparison of Bedload Drainage Efficiency of Ogee Weir, Labyrinth Weir and Piano Key Weir

พงศ์พันธุ์ กาญจนการุณ^{1,*}, สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ¹, พลศิษฐ์ ศรีโพธิ์¹, ภาณุพงศ์ นิโลบล¹ และ รุ่งทิพย์ เหลือหลาย¹
¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ทรายขาว พาน
เชียงราย 57120

Pongpan Kanjanakaroorn^{1,*}, Surachai Amnuaypornlert¹, Pollasit Siphon¹, Panupong Nilobol¹ and Rungthip Lueail¹
¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai,
Sai Khao, Phan, Chiang Rai, 57120, Thailand

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

Received: Nov 08, 2022; Revised: Dec 22, 2022; Accepted: Jan 27, 2023

บทคัดย่อ

การตกตะกอนทับถมบริเวณฝายด้านเหนือน้ำเกิดกับฝายส่วนใหญ่ที่มีลักษณะตั้งฉากกับทิศทางการไหล หนึ่งในแนวทางการลดปัญหาดังกล่าวคือการออกแบบรูปแบบฝายเพื่อให้ตะกอนสามารถระบายออกไปได้ง่ายภายใต้แรงกระทำของน้ำที่ไหลผ่านฝาย บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายตะกอนของฝายสันมน ฝายหยัก และฝายคีย์เปียโน แบบจำลองกายภาพถูกใช้ในการจำลองการไหลของตะกอนผ่านฝายในกรณีที่มีและไม่มีประตูระบายตะกอน ความเหมาะสมในการใช้งานฝายขึ้นอยู่กับลักษณะการทับถมของตะกอน รูปแบบการระบายตะกอนท้องน้ำ และอัตราส่วนปริมาตรการระบายตะกอนท้องน้ำ ผลการศึกษาพบว่า ฝายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการระบายตะกอนท้องน้ำกรณีไม่มีและไม่มีประตูระบายตะกอนคือฝายคีย์เปียโนและฝายหยัก ตามลำดับ รูปร่างของฝายคีย์เปียโนทำให้ตะกอนถูกพัดพาออกไปได้ง่ายด้วยแรงกระทำจากน้ำ ในขณะที่ฝายหยักจะสะสมตะกอนไว้ได้มากภายในตัวฝายทำให้ระบายตะกอนออกมาเมื่อเปิดบานระบาย การใช้งานฝายคีย์เปียโนเหมาะสมกับแม่น้ำที่ไม่มีประตูระบายตะกอน แต่สำหรับแม่น้ำที่สามารถติดตั้งประตูระบายตะกอนได้ควรเลือกใช้ฝายหยักเป็นหลัก

คำสำคัญ: การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ, ฝาย, การตกตะกอนทับถม, แบบจำลองกายภาพ

Abstract

The problem of sedimentation in upstream weirs occurs in most weirs that perpendicularly sited on flow direction. One of the solutions to reduce this problem is to design the weir in such a way that the sediment can easily flow away under the force of the water flowing over the weir. In this paper, a comparison of bedload drainage efficiency of Ogee weir, Labyrinth weir, and Piano Key weir is presented. The physical model was used to simulate bedload transport through the weir with and without sediment discharge gate. The suitability of using a weir depends on the sediment deposition characteristics of the bedload at the upstream weir, the typical of sediment discharge through the weir, and the volumetric ratio of the bedload discharge. The results of this study show that the Labyrinth weir and the Piano Key weir have the best efficiency in discharging sediment through a weir with and without a sediment

discharge gate respectively. The shape of the Piano Key weir allows the sediment to be easily flushed out by the force of the water. While the Labyrinth weir accumulate a lot of sediment inside the weir, the sediment can be discharge when the sediment discharge gate is opened. The Piano Key weir is suitable for rivers where no sediment discharge gate is installed. In rivers where a sediment discharge gate can be installed, the Labyrinth weir should mainly used.

Keywords: Sediment transport, Weir, Sediment deposition, Physical model

1. บทนำ

ลักษณะภูมิประเทศทางภาคเหนือของประเทศไทย ประกอบด้วยภูเขาสูงชันสลับซับซ้อนเป็นจำนวนมาก อีกทั้งมีปริมาณการตกของฝนค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้แม่น้ำส่วนใหญ่ในทางเหนือของประเทศไทยเกิดจากการไหลสะสมรวมกันของฝนจากภูเขา ในกระบวนการไหลรวมตัวของน้ำผิวดินจะพัดพาตะกอนลงมายังแม่น้ำเป็นจำนวนมากทำให้เกิดการทับถมของตะกอนในลำน้ำง่าย โดยเฉพาะบริเวณลำน้ำที่มีการสร้างฝายขวางกั้นลำน้ำไว้ จะมีตะกอนตกทับถมเป็นจำนวนมาก [1] นอกจากนี้ หนึ่งในปัจจัยที่ทำให้ตะกอนเกิดการทับถมบริเวณหน้าฝายคือลักษณะของตัวฝายที่นิยมใช้งานไม่เหมาะสมกับการระบายตะกอน โดยในปัจจุบันฝายที่นิยมก่อสร้างมีลักษณะเป็นฝายที่ตื้นตรง [2] เช่น ฝายสันมน ฝายสันคมประเภทต่างๆ ฝายเกเบียน ฯลฯ ซึ่งฝายเหล่านี้มีโครงสร้างที่ตื้นตรงด้านการไหลของน้ำ ส่งผลให้บริเวณด้านล่างของฐานฝายมีความเร็วการไหลที่ต่ำและเสี่ยงต่อการตกตะกอนได้ง่าย ถึงแม้ว่าฝายบางแห่งจะมีประตูระบายน้ำก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาการตกทับถมของตะกอนหน้าฝายได้ [3],[4] ในเวลาต่อมาประเทศไทยเริ่มนำฝายหยักมาใช้ในลำน้ำในภาคเหนือ เช่น ฝายท่าหมปุย จังหวัดลำพูน ซึ่งฝายหยักมีลักษณะเป็นแนวยาวและกว้าง สามารถระบายน้ำได้ในปริมาณมากโดยที่ไม่ทำให้ระดับน้ำเหนือฝายสูงจนการเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมสองฝั่งของตลิ่ง อีกทั้งลักษณะของฝายจะรวมตะกอนให้อยู่ในทางน้ำที่แคบและมีประตูระบายอยู่บริเวณส่วนยอดของฝายหยักซึ่งจะทำให้สามารถระบายตะกอนออกได้ดี แต่เมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลานานพบว่าบริเวณประตูระบายเกิดการชำรุดได้ง่ายโดยมีลักษณะการชำรุดแบบบานประตูหลุดออกจากร่องควบคุมการขึ้นลงในแนวดิ่ง อีกทั้งฝายดังกล่าวยังต้องการผู้ควบคุมการเปิดปิดบานระบายทำให้ไม่สามารถใช้งานกับลำน้ำขนาดเล็กได้ แต่ทั้งนี้ Herbst et al. [3] และ สุรพล ชุนหวัด

[5] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการระบายตะกอนผ่านฝายหยักเมื่อมีการปรับปรุงรูปร่างของฝาย พบว่าฝายที่มีการปรับปรุงรูปร่างให้มีความลาดชันเพิ่มสูงขึ้นไปยังด้านท้ายฝายจะทำให้สามารถระบายตะกอนออกไปโดยไม่ต้องใช้ประตูระบายน้ำ ลักษณะรูปร่างของฝายหยักที่ปรับปรุงนี้จะมีใกล้เคียงกับฝายคีย์เปียโน (Piano Key Weir) ซึ่งเป็นฝายที่ยังไม่มีใช้งานในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่จะถูกใช้สำหรับระบายน้ำผ่านทางระบายน้ำล้นซึ่งไม่จำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องของตะกอนที่ตกหน้าฝาย อย่างไรก็ตาม ฝายคีย์เปียโนได้เริ่มมีการนำไปใช้เป็นโครงสร้างควบคุมในแม่น้ำ ตัวอย่างเช่น ฝาย Van Phong ที่เวียดนาม เพื่อแก้ปัญหาเรื่องต่างๆ เช่น เศษวัสดุขวางทางน้ำ การควบคุมระดับน้ำเหนือฝายไม่ให้สูงจนเกินไปในช่วงน้ำท่วม การกัดเซาะด้านท้ายฝาย เป็นต้น โดยผลการวิจัยของ Nosedá et al. [6] และ Ribi et al. [7] ยังบ่งชี้ว่าฝายคีย์เปียโนสามารถระบายตะกอนที่ตกทับถมหน้าฝายออกไปได้เป็นอย่างดี แต่ทั้งนี้ยังไม่มีการศึกษาประสิทธิภาพที่ชัดเจนในการระบายตะกอนของฝายคีย์เปียโนเมื่อเทียบกับฝายหยักและฝายสันมนในกรณีฝายทั้งสองมีและไม่มีบานประตูระบาย ซึ่งทำให้ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนถึงความเหมาะสมในการใช้งานในแม่น้ำได้เมื่อเทียบกับฝายที่มีในปัจจุบันของประเทศไทย

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบายตะกอนทรายของฝายทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วยฝายสันมน ฝายหยัก และฝายคีย์เปียโน โดยพิจารณาลักษณะในการระบายตะกอนผ่านฝาย ปริมาณตะกอนที่ไหลผ่านฝาย และความเหมาะสมต่อการใช้งานในแม่น้ำกรณีที่มีและไม่มีประตูระบายตะกอน ผลที่ได้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ฝายที่ช่วยลดปัญหาการตกตะกอนทับถมในแม่น้ำและเป็นแนวคิดในการพัฒนารูปแบบฝายที่ดีขึ้นในอนาคตได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ทฤษฎีการออกแบบและการไหลของฝาย 3 ชนิด และทฤษฎีจำลองการไหลของตะกอน มีรายละเอียดดังนี้

2.1. ฝายสันมน (Ogee Weir)

ปราโมท พลพณะวารี [2] ได้ให้คำอธิบายเกี่ยวกับฝายสันมน (Ogee Weir) ว่าเป็นฝายที่พัฒนาโดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางชลศาสตร์ของฝายสันคมและปรับเปลี่ยนรูปร่างของฝายด้านท้ายให้เป็นรูปร่างโค้งคล้ายตัว S เพื่อให้การไหลผ่านฝายเป็นแบบ Free Over Flow ที่สมบูรณ์แบบที่สุด โดยในการศึกษานี้จะเลือกใช้ฝายสันมนรูปร่าง Vertical upstream face ซึ่งเป็นรูปร่างของฝายสันมนที่นิยมใช้กันมากในลำน้ำภาคเหนือ การคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านฝายสันมนแบบไม่มีบานระบายควบคุม แสดงได้ดังสมการที่ (1) คือ

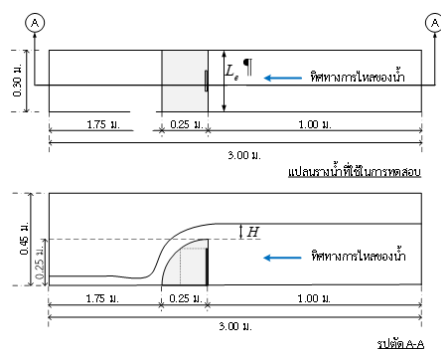
$$Q = C_{ogee} L_e H^{3/2} \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลผ่านฝาย, (ม.³/วินาที)

L_e คือ ความยาวประสิทธิผลของสันฝาย, (ม.)

H คือ ความลึกของน้ำเหนือสันฝายด้านเหนือน้ำแสดงการวัดได้ดังรูปที่ 1, (ม.)

C_{ogee} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านฝายสันมน



รูปที่ 1 ค่าต่างๆ ของอัตราการไหลของฝายสันมน

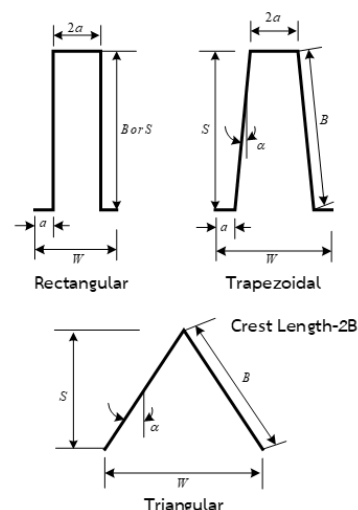
2.2. ฝายหยัก (Labyrinth Weir)

ฝายหยักเป็นส่วนหนึ่งของฝายสันยาว (Long Crested Weir) ถูกออกแบบมาเพื่อที่จะระบายน้ำจำนวนมากออกไป ในขณะที่ระดับน้ำด้านเหนือฝายไม่เพิ่มสูงมากจนเกินไป เมื่อเทียบกับฝายแบบอื่นๆ ฝายหยักมีองค์ประกอบที่สำคัญ

หลายอย่างในการออกแบบรูปทรงของฝายที่ให้น้ำในปริมาณที่ต้องการไหลผ่านไปได้ เช่น อัตราส่วนความสูงของน้ำเหนือฝายกับความสูงของตัวฝาย รูปร่างของฝายต่อความยาวสันฝาย เป็นต้น และถ้าหากต้องการที่จะระบายน้ำในปริมาณมากต้องกำหนดให้ขนาดความยาวของสันฝายยาวกว่าความกว้างของลำน้ำ ซึ่งมีการแบ่งรูปร่างการออกแบบฝายหยักเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ ฝายหยักทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular), ฝายทรงหยักสามเหลี่ยม (Triangular) และ ฝายหยักทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) แสดงได้ดังรูปที่ 2 ทั้งนี้สมการที่ (2) การไหลผ่านฝายหยัก คือ

$$Q = \frac{2}{3} C_{dl} L_e \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (2)$$

เมื่อ C_{dl} คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลของน้ำผ่านฝายหยัก



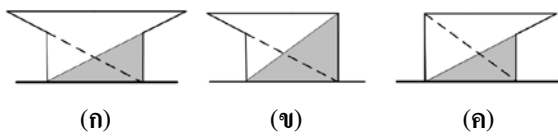
รูปที่ 2 ชนิดของฝายหยัก

2.3. ฝายคีย์เปียโน (Piano Key Weir)

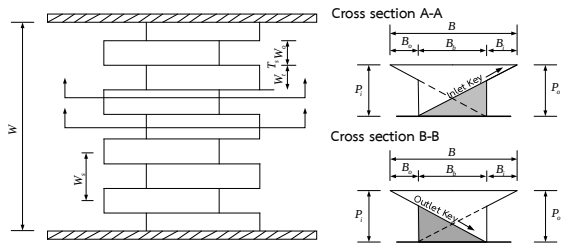
ฝายคีย์เปียโน (Piano Key Weir; PWK) เป็นโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่ใช้สำหรับระบายน้ำหลากหลายจากเขื่อนหรือประตูกั้นน้ำได้ [8] ฝายคีย์เปียโนเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาฝายหยักอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ.1998 เริ่มมีการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับรูปร่างของฝายในประเทศฝรั่งเศส และจากนั้นมีการปรับปรุงโดย Blanc and Lempérière [9] และ Lempérière and Ouamane [10] ฝายคีย์เปียโนตัวแรกถูกสร้างขึ้นที่เขื่อน Goulours ประเทศฝรั่งเศสในปี ค.ศ.2006 โดย

Electricité de France [11] จากนั้นจึงมีการนำไปใช้อย่างหลากหลายในเขื่อนต่างๆ และในลำน้ำ

โดยทั่วไป ฝายคีย์เปียโนสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ตามรูปทรงของฝายดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบด้วย PKW type A, B และ C ซึ่ง PKW ชนิด A จะมีส่วนยื่นออกมาทั้งด้านเหนือน้ำและท้าย ในขณะที่ชนิด B มีส่วนยื่นออกมาด้านเหนือน้ำเท่านั้นและชนิด C มีส่วนยื่นออกมาด้านท้ายเท่านั้น รูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรรูปร่างของฝายคีย์เปียโนชนิด A ทั้งนี้รูปแบบดังกล่าวยังสามารถประยุกต์ใช้กับชนิด B และ C ได้อีกด้วย



รูปที่ 3 ชนิดของฝายคีย์เปียโน (a) PKW Type A (b) PKW Type B (c) PKW Type C



รูปที่ 4 ตัวแปรรูปร่างของฝาย PKWs

Pralong et al. [12] ได้นำเสนอสมการไหลผ่านฝายคีย์เปียโน แสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$Q = \frac{2}{3} C_{PKWs} L_e \sqrt{2gH^{1.5}} \quad (3)$$

เมื่อ C_{PKWs} คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายคีย์เปียโน

2.4. การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของตะกอน

ในการวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองกายภาพของฝายซึ่งมีการย่ออัตราส่วนด้วยหลักการของแบบจำลองและความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ ทั้งนี้ หากมีการเลือกใช้ตะกอนทรายของจริงจะส่งผลกระทบต่อลักษณะการเคลื่อนที่เนื่องจากในขณะที่กำลังของอัตราการไหลและความเร็วในแบบจำลอง

กายภาพเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนกายภาพที่ลดลงไป แต่ความถ่วงจำเพาะของตะกอนทรายไม่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้การจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ตะกอนทรายจึงมีผลการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าความเป็นจริง

โดยทั่วไป การเคลื่อนที่ของตะกอนบริเวณท้องน้ำจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความเร็วของกระแสน้ำมากจนทำให้เกิดแรงเฉือนที่กระทำต่อบริเวณผิวของท้องน้ำมากกว่าแรงเฉือนที่ท้องน้ำสามารถรับได้ ตะกอนบริเวณท้องน้ำจะถูกกัดเซาะด้วยแรงของน้ำและเกิดการเคลื่อนที่หลุดออกไป พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของตะกอนจะสัมพันธ์กับปัจจัย 3 อย่างได้แก่

1) ธรรมชาติของของไหล เช่น ความหนืดและความหนาแน่นของไหล

2) ธรรมชาติของวัตถุที่ไม่มีความเชื่อมแน่น เช่น หน่วยน้ำหนักทางกายภาพ Effective Diameter (ในการวิจัยนี้เลือก D_{50})

3) ธรรมชาติของการไหลแบบสม่ำเสมอ เช่น ความลาดชันพลังงานของการไหลหรือความลาดชันของท้องน้ำ ค่าความลึกของน้ำตามแนวลำ

จากปัจจัยทั้งสามตัวสามารถเลือกตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์มิติได้คือ ความหนาแน่นของของไหลและของตะกอน (ρ และ ρ_s) ความหนืดของของไหล (μ) ขนาดประสิทธิผล (D_{50}) ความเร็วเฉือนที่ท้องน้ำ (V_*) ความลึกทางน้ำในแนวลำ (h) และหน่วยน้ำหนักของตะกอน (γ_s) และเมื่อใช้ ρ , V_* และ γ_s เป็นตัวแปรซ้ำ จะวิเคราะห์ได้ว่า

$$\Pi = \phi\{X_1, X_2, X_3, X_4\} = \phi\left\{\frac{V_* D_{50}}{\nu}, \frac{\rho V_*^2}{\gamma_s D_{50}}, \frac{h}{D_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}\right\} \quad (4)$$

ในการจำลองจะต้องพิจารณาการจำลองภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนตัวเลขของ X_1, X_2, X_3, X_4 ของแบบจำลองและของจริงเท่ากัน นั่นคือ

$$\lambda_{X_1} = \lambda_{X_2} = \lambda_{X_3} = \lambda_{X_4} = 1 \quad (5)$$

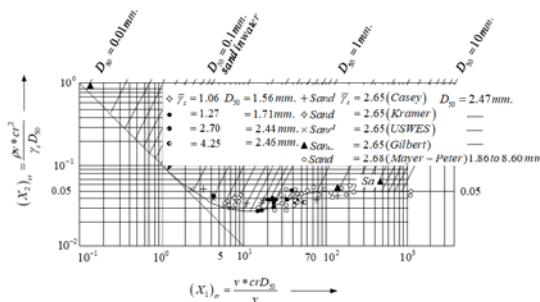
เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการ (4) เข้าไปในสมการที่ (5) จะได้เป็น

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{V_*} \lambda_{D_{50}} &= \lambda_V \\ \lambda_{V_*}^2 \lambda_{V_S}^{-1} \lambda_{D_{50}}^{-1} &= \lambda_\rho^{-1} \\ \lambda_h \lambda_{D_{50}}^{-1} &= 1 \\ \lambda_{\rho_S} &= \lambda_\rho \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

อย่างไรก็ตาม สำหรับการจำลองการไหลโดยที่ของไหลเป็นน้ำ ความแตกต่างความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีน้อยมากส่งผลให้อัตราส่วนที่เกี่ยวข้องกับความหนืดมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งทำให้วิเคราะห์สมการที่ (6) ได้ดังสมการที่ (7)

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{V_*} &= \lambda_{D_{50}}^{-1} \\ \lambda_{V_*} &= \sqrt{\lambda_{D_{50}} \lambda_{V_S}} \\ \lambda_h &= \lambda_{D_{50}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ค่าความเร็วเหนือที่ท้องน้ำวิกฤติสามารถหาได้จากแผนภาพของ Shield [13] (ดังแสดงในรูปที่ 5) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดประสิทธิภาพของตะกอนเป็นหลัก ค่าของอัตราส่วน λ_{V_S} ที่หาได้จะถูกนำไปบวกด้วย 1 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่เทียบเท่ากับความเร็วจำเพาะของน้ำ จากนั้นจะนำไปเทียบกับวัสดุทดแทนตะกอนจากตารางที่ 1



รูปที่ 5 แผนภาพของ Shield

ตารางที่ 1 วัสดุใช้จำลองแทนตะกอน [14]

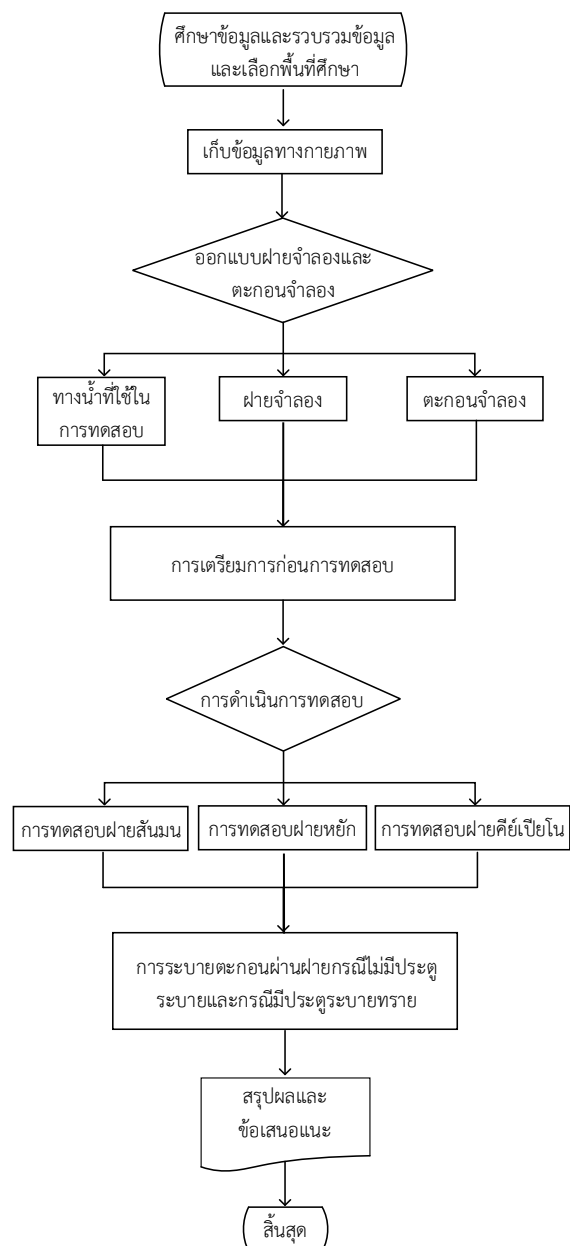
Material	$\bar{\gamma}_s/\gamma$
Anthracite	1.40-1.70
Bakelite	1.35-2.05
Coal	1.20-1.50
Lignite	1.10-1.40
Nylon	1.14
Perspex	1.19
Polystyrene	1.03-1.05
P.V.C.	1.35-1.38
Silicon	2.40

3. วิธีดำเนินการวิจัย

กรอบแนวความคิดการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 6 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1. ศึกษารวบรวมข้อมูลและเลือกพื้นที่ศึกษา

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของฝ่ายที่จะนำมาใช้ในการจำลอง โดยเลือกฝ่ายที่ประสบปัญหาของตะกอนตกทับถม โดยตัวแทนของฝ่ายสนับสนุนจะเลือกใช้ฝ่ายดินดำในแม่น้ำลาว จังหวัดเชียงราย รูปที่ 7 แสดงลักษณะของฝ่ายดินดำ



รูปที่ 6 กรอบแนวคิดของการศึกษา

และตำแหน่งของประตูระบาย ซึ่งจากการลงข้อมูลสัมภาษณ์ในพื้นที่พบว่า ฝ่ายดังกล่าวมีการตกทับถมของตะกอนเป็นอย่างมาก ต้องทำการขุดลอกทุก 2-3 ปี สำหรับฝ่ายห้วยจะเลือกใช้ฝ่ายทามพู จังหวัดลำพูน ซึ่งเป็นฝ่ายห้วยกึ่งแห้งแล้งที่มีการก่อสร้างอยู่ในภาคเหนือของประเทศไทย **รูปที่ 8** แสดงลักษณะของฝ่ายทามพู สำหรับฝ่ายศิโยนจะเลือกใช้รูปแบบฝ่ายชนิด C เนื่องจากไม่มีส่วนยื่นออกมาด้านเหนือน้ำ ซึ่งจะกระทบต่อการไหลของตะกอน การออกแบบสัดส่วนของฝ่ายศิโยนจะใช้ตามคำแนะนำของ Pralong et al. [12]



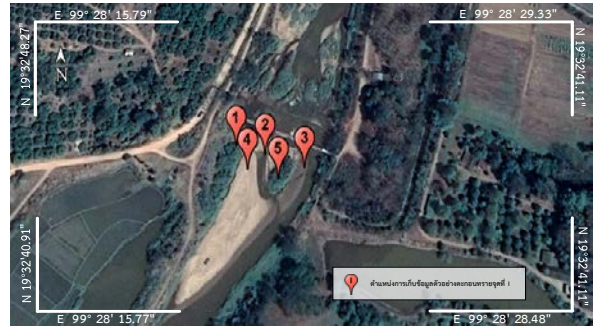
รูปที่ 7 ฝ่ายดินดำ แม่น้ำลาว จังหวัดเชียงราย



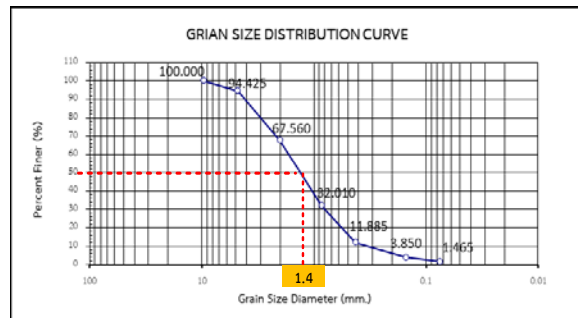
รูปที่ 8 ฝ่ายทามพู จังหวัดลำพูน

3.2.เก็บข้อมูลทางกายภาพ

ข้อมูลกายภาพที่ต้องทำการสำรวจประกอบด้วยรูปสันฐานของฝ่ายสันมนและฝ่ายห้วยตามหัวข้อ 3.1 และตัวอย่างตะกอนท้องน้ำที่ตกทับถมอยู่บริเวณหน้าฝ่ายดินดำ (ฝ่ายสันมน) โดยเลือกใช้ตะกอนดังกล่าวในการศึกษา **รูปที่ 9** แสดงตำแหน่งการเก็บตะกอนท้องน้ำหน้าฝ่ายดินดำ โดยมีตัวอย่างการวิเคราะห์ขนาดผลของตะกอนแสดงได้ดัง**รูปที่ 10** และผลการวิเคราะห์ขนาดประสิทธิภาพของตะกอนทั้งหมดแสดงได้ดัง**ตารางที่ 2** ซึ่งตะกอนทั้งหมดมีความถ่วงจำเพาะ 2.65



รูปที่ 9 ตำแหน่งการเก็บตะกอนท้องน้ำบริเวณฝ่ายดินดำ



รูปที่ 10 การวิเคราะห์ขนาดผลของตะกอนตำแหน่งที่ 2

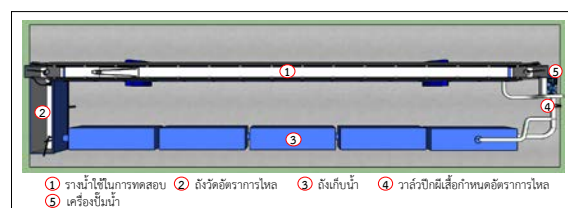
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ขนาดประสิทธิภาพของตะกอน

ตำแหน่งตะกอนทราย	1	2	3	4	5
D_{50} (มม.)	2.1	1.4	1.7	1.7	1.4

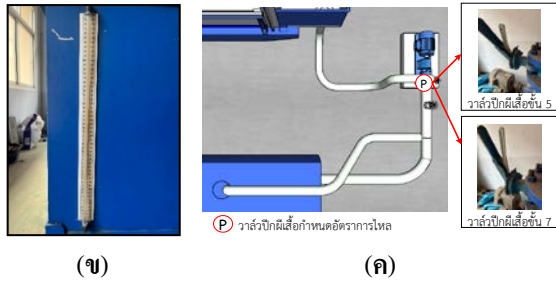
3.3.ออกแบบฝ่ายจำลองและตะกอนจำลอง

1) ทางน้ำที่ใช้ทดสอบ

การทดสอบจัดทำขึ้นในทางน้ำแบบหมุนเวียนแสดงได้ดัง**รูปที่ 11** โดยน้ำจะถูกสูบด้วยปั๊ม (ตำแหน่งที่ 4) ออกจากถังเก็บน้ำ (ตำแหน่งที่ 3) เข้าสู่ทางน้ำทดสอบ (ตำแหน่งที่ 1) ฝ่ายจะถูกติดตั้งในรางน้ำทดสอบบริเวณท้ายน้ำ น้ำที่ผ่านฝ่ายจะเข้าสู่ถังวัดอัตราการไหล (ตำแหน่งที่ 2) อัตราการไหลในทางน้ำทดสอบจะควบคุมโดยวาล์วปีกผีเสื้อ (ตำแหน่งที่ 5) น้ำที่ออกจากถังวัดปริมาณจะไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำหมุนเวียนไปใช้ต่อ



(ก)



รูปที่ 11 ทางน้ำที่ใช้ทดสอบ (ก) ทางน้ำทดสอบ (ข) สาย
ขางวัดปริมาตรน้ำ (ค) วาล์วปีกผีเสื้อ

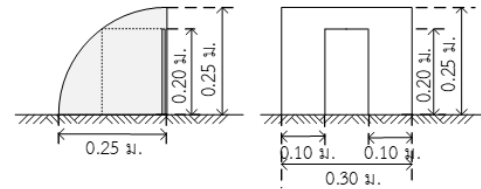
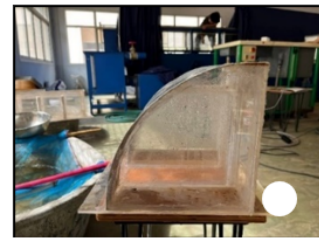
2) ฝ่ายจำลอง

ในการจำลองทางกายภาพ หากสามารถจำลองในแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ได้จะทำให้ได้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น แต่ขีดจำกัดของทางน้ำทดสอบและเครื่องจักรที่มีทำให้กำหนดอัตราส่วนในการจำลองได้ที่ 1:10 โดยรูปที่ 12-14 แสดงตัวอย่างฝ่ายสันมน ฝ่ายหัก และฝ่ายคี่เปียโนที่ใช้ในการทดสอบตามลำดับ การออกแบบความกว้างของตัวฝ่ายจะให้เท่ากับรางน้ำชลศาสตร์ซึ่งเท่ากับ 0.3 ม. และกำหนดให้ฝ่ายมีความสูงเท่ากันซึ่งเท่ากับ 0.25 ม. แต่ความยาวของตัวฝ่ายจะมีขนาดความยาวไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่าความยาวมาตรฐานของตัวฝ่ายที่ใช้โดยแบ่งได้ดังนี้

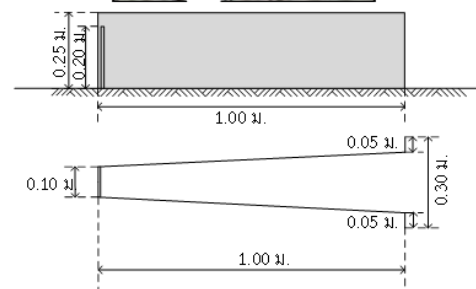
ฝ่ายสันมนทำจากแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา เท่ากับ 0.005 ม. และกำหนดให้มีขนาดกว้าง 0.30 ม. และสูง 0.25 ม. มีบานระบายตะกอนอยู่กึ่งกลางฝ่ายโดยมีส่วนบานประตูระบายกว้าง 0.10 ม. และความสูงของบานประตูเท่ากับ 0.20 ม.

ฝ่ายหักทำจากแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา เท่ากับ 0.005 ม. มีความกว้าง 0.30 ม. ความยาว 1.00 ม. และสูง 0.25 ม. ส่วนบานประตูระบายบริเวณกึ่งกลางด้านท้ายของยอดหักกว้าง 0.10 ม. และสูงของบานประตู เท่ากับ 0.20 ม.

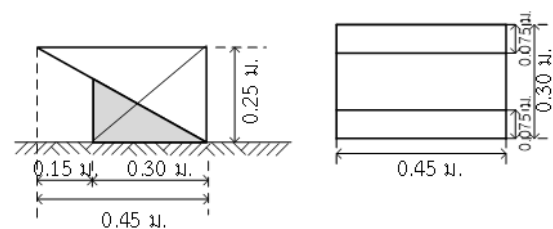
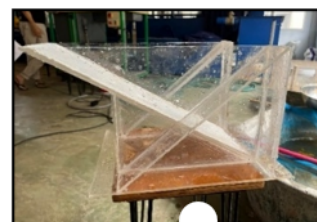
ฝ่ายคี่เปียโนใช้รูปแบบ C ในการศึกษา โดยกำหนดความสูงของฝ่ายไว้ที่ 0.25 ม. และทำการแปลงสัดส่วนที่เหลือด้วยอัตราส่วนการออกแบบฝ่ายที่แนะนำโดย Pralong et al. [12] ทั้งนี้ฝ่ายคี่เปียโนจะไม่มีประตูระบาย



รูปที่ 12 แบบจำลองฝ่ายสันมน



รูปที่ 13 แบบจำลองฝ่ายหัก



รูปที่ 14 แบบจำลองฝ่ายคี่เปียโน

3) ตะกอนจำลอง

ในการคำนวณขนาดของตะกอนจำลองที่ใช้ทดสอบ จะต้องทำการหาความกว้างของผิวน้ำ อัตราการไหล ความลึกของน้ำ ความลาดชันทางน้ำ และพื้นที่หน้าตัดลำน้ำที่สภาวะการไหลมากที่สุดเพื่อมาใช้ในการวิเคราะห์ ขนาดประสิทธิภาพที่จะเปลี่ยนจากตำแหน่งตะกอนทรายที่ตำแหน่ง 2-5 เป็นหลักเนื่องจากเป็นตะกอนทรายที่ตกอยู่ในทางน้ำ โดยมีค่า D_{50} เฉลี่ยที่ 1.55 มม. นำค่าดังกล่าวไปหาค่า $(X_1)_{cr}$ จากแผนภาพ Shield จากนั้นนำไปคำนวณหา λ_v , λ_h , λ_{D50} และ λ_{VS} โดยในการศึกษาได้ค่า $\lambda_{D50} = 2.28\lambda_{VS} = 0.084$ ซึ่งทำให้ได้ $D_{50} = 3.42$ มม. และ $\bar{y}_s/\gamma$ ของตะกอนจำลองเท่ากับ 1.223 ซึ่งทำให้เลือกวัสดุจำลองเป็นแร่ลิกไนต์ (Lignite)

3.4.การเตรียมการก่อนการทดสอบ

ก่อนดำเนินการทดสอบจะต้องทำการสอบเทียบอัตราการไหลผ่านฝายกับระดับน้ำ ติดตั้งระบบวัดอัตราการไหลที่บริเวณท้ายน้ำ ติดตั้งเครื่องบันทึกวิดีโอโดยตำแหน่งของเครื่องบันทึกวิดีโอและภาพของฝายแต่ละชนิดจะอยู่ในหัวข้อถัดไป ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝายที่ได้จากการสอบเทียบคือ ฝายสันมน $C_{ogee} = 1.12$, $L_e = 30$ ซม. ฝายหยัก $C_{dL} = 0.31$, $L_e = 220$ ซม. ฝายคี่เปียโน $C_{PKWS} = 0.41$, $L_e = 120$ ซม.

3.5.การดำเนินการทดสอบ

1) การทดสอบผ่านฝายสันมน

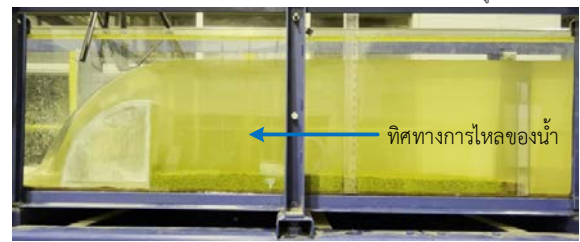
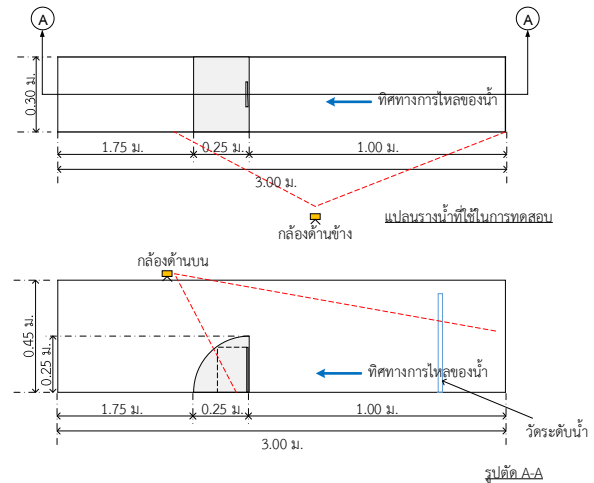
1.1) ดำเนินการติดตั้งฝายสันมนลงในทางน้ำทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 15

1.2) ใส่ตะกอนทรายจำลองลงในทางน้ำด้านเหนือฝาย โดยจะทำการทดสอบการทับถมตะกอนทรายเริ่มต้นที่ 4 ซม. (20% ของความสูงบานประตู) ความยาวการทับถมตามทางน้ำ 1.00 ม.

1.3) เริ่มทำการเปิดน้ำด้วยอัตราการไหลต่ำที่ไม่ทำให้ตะกอนเกิดการเคลื่อนตัวเปลี่ยนรูป รอจนกระทั่งระดับน้ำเริ่มล้นฝายลงที่จึงเปลี่ยนเป็นอัตราการไหลที่ต้องการ การบันทึกวิดีโอจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนนี้

1.4) ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจำลองที่ระดับการเปิดบานระบาย 0% อ่านค่าระดับน้ำด้าน

เหนือฝายเพื่อหาอัตราการไหลผ่านฝาย ดังรูปที่ 15 และหาอัตราการไหลรวมจากสายยางวัดปริมาตร การทดสอบจะเสร็จสิ้นเมื่อตะกอนท้องน้ำหยุดการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ออกไปจนหมด

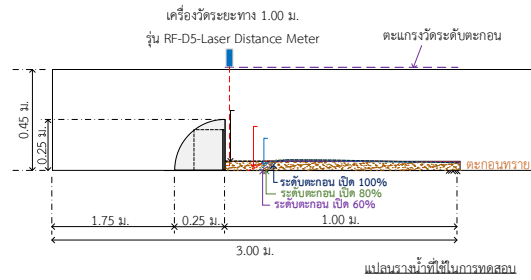


รูปการทดสอบจริง

รูปที่ 15 การติดตั้งฝายสันมน

1.5) เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นจะทำการระบายน้ำออกจากทางน้ำทดสอบโดยไม่ให้ตะกอนทรายเกิดการเคลื่อนที่ จากนั้นทำการวัดตำแหน่งและระดับตะกอนทรายที่ค้างในรางน้ำ โดยใช้เครื่องวัดระยะทางแบบเลเซอร์ Leica DISTO รุ่น RF-D5 รูปที่ 16 แสดงการวัดระดับของตะกอนทรายที่ค้างอยู่ในทางน้ำทดสอบ

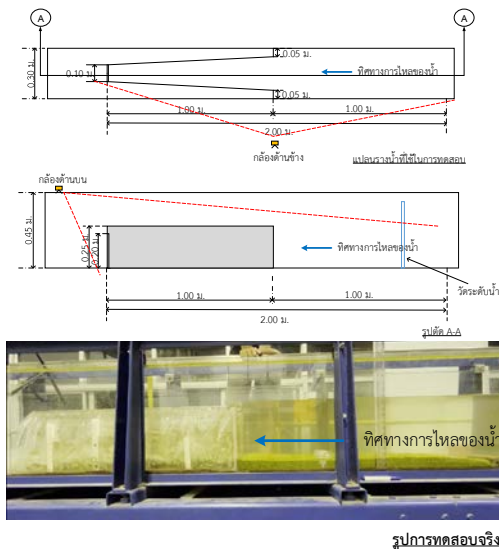
1.6) ทำการทดสอบซ้ำโดยปรับระดับการเปิดบานประตูเป็น 20%, 40%, 80% และ 100% ของความสูงบานประตู บันทึกปริมาตรและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตะกอนทรายของการปรับเปลี่ยน จากนั้นเพิ่มระดับการทับถมของตะกอนทรายเป็น 8 ซม. 12 ซม. และ 16 ซม. และทำการทดสอบเช่นเดิม บันทึกปริมาตรและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตะกอนทราย



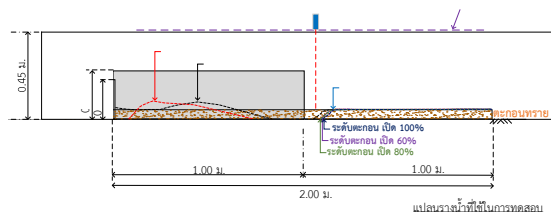
รูปที่ 16 การวัดตะกอนทรายในทางน้ำของฝายสันมน

2) การทดสอบฝายหยัก

การทดสอบฝายหยักจะดำเนินการเช่นเดียวกับฝายสันมนโดยลักษณะการติดตั้งฝายหยักลงในทางน้ำทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 17 และการวัดตะกอนทรายในทางน้ำหลังเสร็จสิ้นการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 การติดตั้งฝายหยัก

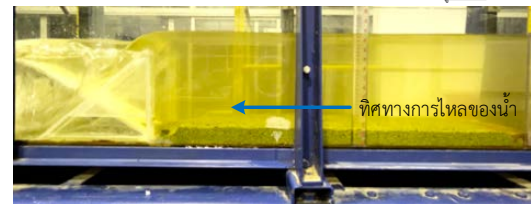
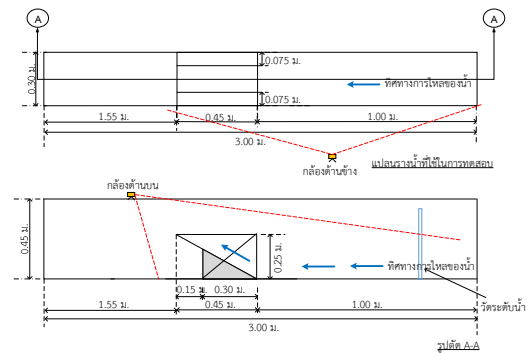


รูปที่ 18 การวัดตะกอนทรายในทางน้ำของฝายหยัก

3) การทดสอบฝายคีย์เปียโน

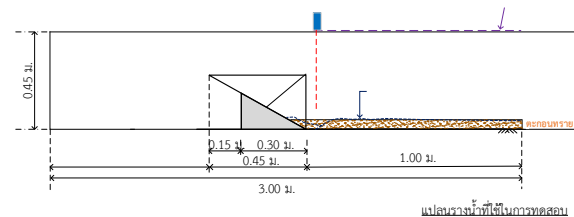
การทดสอบฝายคีย์เปียโนจะดำเนินการเช่นเดียวกับฝายสันมนแต่จะไม่มีทดสอบในส่วนของการเปิดบานประตูระบายน้ำ ลักษณะการติดตั้งฝายคีย์เปียโนลงในทาง

น้ำทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 19 และการวัดตะกอนทรายในทางน้ำหลังเสร็จสิ้นการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 20



รูปการทดสอบจริง

รูปที่ 19 การติดตั้งฝายคีย์เปียโน



รูปที่ 20 การวัดตะกอนทรายในทางน้ำของฝายคีย์เปียโน

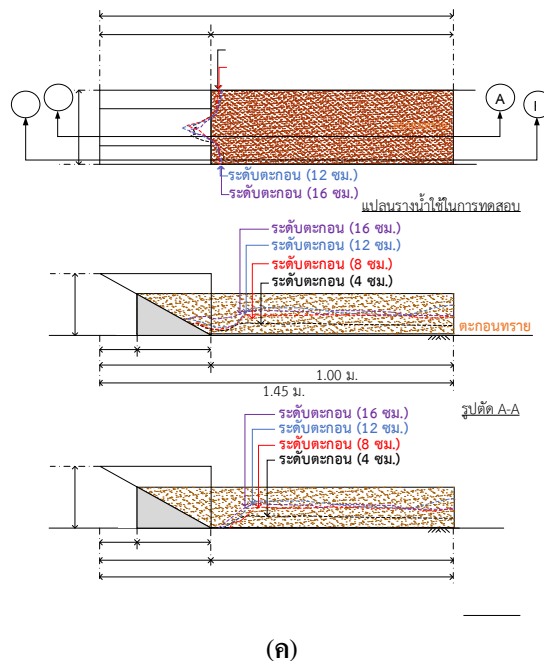
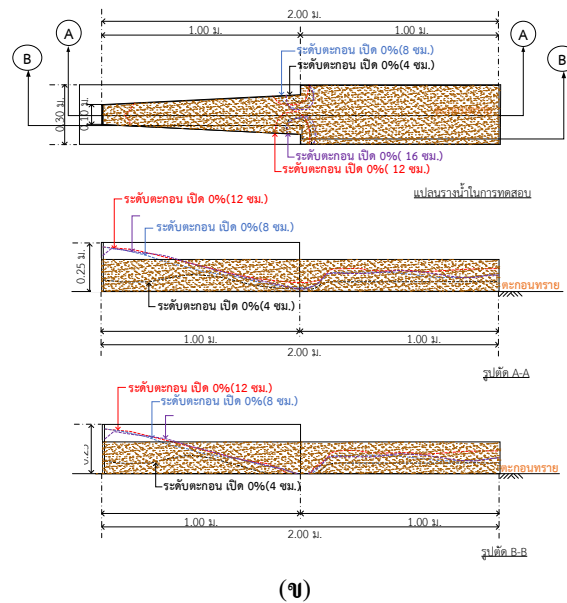
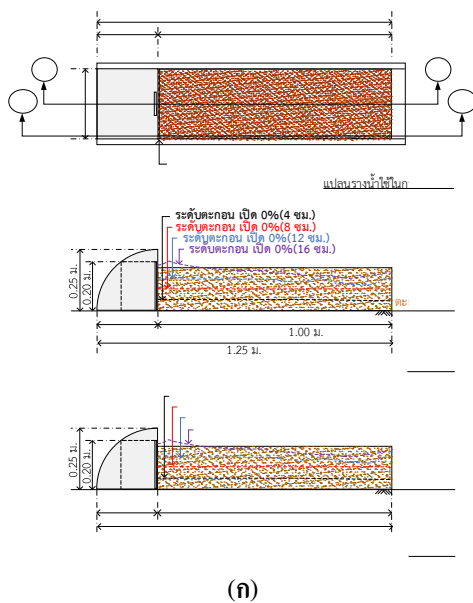
4. ผลการวิจัย

4.1.การระบายตะกอนผ่านฝายกรณีไม่มีประตูระบาย

ในกรณีที่ไม่มีประตูระบาย (การเปิดบานประตู 0%) การเปลี่ยนแปลงของหน้าตัดตามยาวของตะกอนทรายที่ตกทับถมในทางน้ำที่ระดับต่างๆ ของฝายสันมน ฝายหยัก และฝายคีย์เปียโนแสดงได้ดังรูปที่ 21 โดยจะเห็นว่าเมื่อไม่มีการเปิดประตูระบายทราย ตะกอนทรายจะถูกพัดพาไปตกตะกอนอยู่หน้าฝาย สำหรับฝายสันมนการพัดพาไปตกตะกอนหน้าฝายเกิดขึ้นได้ช้าและมีปริมาณที่ตกทับถมน้อยกว่าฝายหยักและฝายคีย์เปียโน สำหรับฝายหยักตะกอนทรายด้านหน้าฝายหยักจะถูกพัดพาไปทับถมสูงภายในฝายหยักจนเกือบถึงระดับสันฝายเนื่องจากภายในฝายหยักมีการบีบทางน้ำให้แคบลงส่งผลให้ความเร็วการ

ไหลเพิ่มสูงขึ้นพัดพาตะกอนเข้าไปในฝ่ายหักจนเมื่อน้ำไหลปะทะกับฝ่ายที่มีลักษณะตั้งตรงจึงทำให้ตะกอนเกิดการทับถมซ้อนทับกันขึ้น ผลการทับถมของทรายในฝ่ายหักทำให้เกิดรูปทรงคล้ายกับฝ่ายคีย์เปียโน สำหรับการทับถมของตะกอนทรายภายในฝ่ายคีย์เปียโนจะมีน้อยมากเมื่อเทียบกับระดับทับถมเดิม ตะกอนทรายหน้าฝ่ายคีย์เปียโนสามารถระบายออกไปตามทางลาดของฝ่ายออกสู่ทางด้านซ้ายน้ำได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การ

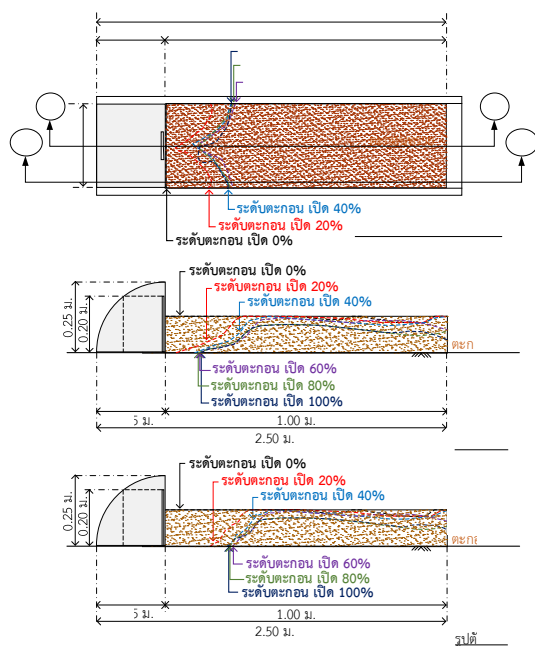
ระบายตะกอนทรายเทียบกับปริมาณทรายที่ถูกทับถมภายใต้อัตราการไหลสูงสุดเดียวกันแล้วพบว่า พบว่า ฝ่ายคีย์เปียโนสามารถระบายตะกอนทรายออกได้มากที่สุดที่ 55% เมื่อมีการทับถม 80% ของความสูงบานประตู ในขณะที่ฝ่ายหักและฝ่ายสันมนระบายได้เพียง 12% และ 3% ตามลำดับ ที่ความสูงการทับถมตะกอนเดียวกันกับฝ่ายคีย์เปียโน



รูปที่ 21 หน้าตัดตามยาวการทับถมของตะกอนทรายในทางน้ำกรณีไม่มีประตูระบาย (ก) ฝ่ายสันมน (ข) ฝ่ายหัก (ค) ฝ่ายคีย์เปียโน

4.2.การระบายตะกอนผ่านฝายกรณีมีประตูลอย

ผลการทดสอบการระบายตะกอนทรายกรณีเปิดประตูระบายที่ระดับต่างกัน พบว่า ฝายหยักมีประสิทธิภาพในการระบายตะกอนทรายมากกว่าฝายสันมน รูปที่ 22-23 แสดงหน้าตัดตามยาวของตะกอนทรายที่ทับถมในทางน้ำของการเปิดบานประตูที่ระดับต่างๆ ของฝายทั้งสามชนิด และลักษณะตะกอนทรายที่ตกค้างอยู่หน้าฝายที่ระดับการทับถม 12 ซม. ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของฝายสันมนและฝายหยักได้ดังนี้



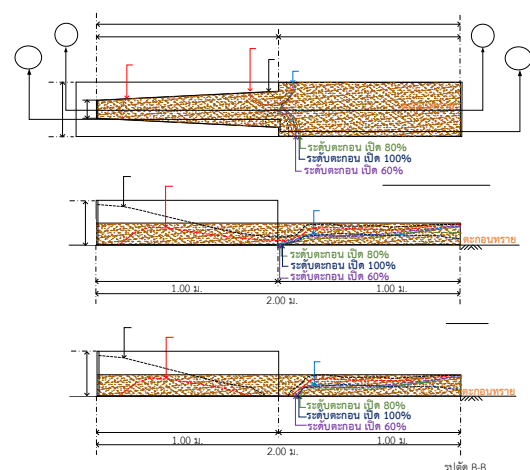
(ก)



(ข)

รูปที่ 22 การทับถมของตะกอนฝายสันมนที่ความลึกการทับถมของตะกอน 12 ซม. (ก) หน้าตัดตามยาว (ข) ลักษณะตะกอนทับถมหน้าฝาย

การระบายตะกอนทรายผ่านฝายสันมนตั้งแต่ระดับการทับถมของตะกอนหนา 4 ถึง 16 ซม. จะสังเกตเห็นว่า ระดับการทับถมของตะกอนที่สูงจะถูกพัดพาและเคลื่อนที่ได้ไว กว่าระดับการทับถมตะกอนที่ต่ำ ตะกอนทรายบริเวณด้านเหนือน้ำจะถูกกัดเซาะเป็นแอ่งแล้วไหลมาทับถมบริเวณหน้าฝาย เมื่อเปิดบานระบายพบว่าตะกอนด้านหน้าฝายช่วงแรกจะถูกกัดเซาะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับระดับตะกอน การกัดเซาะช่วงแรกเป็นรูปครึ่งวงกลมจากนั้นเมื่อกัดเซาะมาถึงริมขอบทางน้ำจะเปลี่ยนเป็นกัดเซาะแบบรูปตัววี เนื่องจากความเร็วของการกัดเซาะตรงริมขอบทั้งสองด้าน ขัดขวางการไหลบริเวณตรงกลางทำให้ความเร็วการไหลกึ่งกลางทางน้ำน้อยลง ระดับการทับถมของตะกอนตั้งแต่ 8 ถึง 16 ซม. จะถูกพัดพาออกไปจนเหลือระดับความสูงของตะกอนประมาณ 4 ซม.



(ก)



(ข)

รูปที่ 23 การทับถมของตะกอนฝายหยักที่ความลึกการทับถมของตะกอน 12 ซม. (ก) หน้าตัดตามยาว (ข) ลักษณะตะกอนทับถมหน้าฝาย

การทดสอบฝายหักตั้งแต่ระดับการทับถมของตะกอนหนา 4 ถึง 16 ซม. พบว่า เมื่อยังไม่เปิดบานประตูระบายตะกอนที่อยู่ในทางน้ำจะถูกพัดเข้ามาทับถมภายในตัวฝายหัก โดยตะกอนหน้าฝายในทางน้ำจะถูกกัดเซาะเป็นรูปทรงตัววี ส่วนตะกอนที่อยู่ในฝายหักจะถูกพัดพาไปทับถมบริเวณหน้าบานประตูเป็นลักษณะสามเหลี่ยมลาดเอียง มีระดับของการทับถมสูงสุดที่บ้านประตู จากนั้นผิวหน้าของตะกอนจะเคลื่อนที่ไหลผ่านสันฝายไป และเมื่อทำการเปิดบานประตูแล้ว ตะกอนที่ตกทับถมอยู่ที่หน้าบานประตูจะถูกกัดเซาะออกไปซึ่งถ้าเปิดประตูตั้งแต่ที่ระดับความสูง 40% ของความสูงบานระบายขึ้นไป ตะกอนที่อยู่ในตัวฝายหักจะถูกพัดพาออกไปทั้งหมด ในขณะที่ตะกอนบริเวณหน้าฝายหักจะถูกกัดเซาะคล้ายคลึงกับฝายสันมน

ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรตะกอนทรายที่ระบายออกไปได้ต่อปริมาตรเดิมของฝายทั้งสามชนิดที่ระดับการทับถมต่างกัน โดยพิจารณาที่ระดับการไหลผ่านบานประตูระบายสูงสุด (เปิดบานประตู 100%) สำหรับการระบายตะกอนทรายที่อัตราการไหลอื่นๆ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณการระบายของฝาย 3 ชนิด

ระดับการทับถม % ความสูง (ซม.)	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรตะกอนที่ระบาย ออก		
	ฝายสันมน	ฝายหัก	ฝายคีย์เปียโน
20(4 ซม.)	21	68.1	6
40 (8 ซม.)	34.4	84.8	6
60 (12 ซม.)	55.7	86.2	25
80 (16 ซม.)	63.8	84.6	55

จากตารางที่ 3 พบว่าเมื่อมีการใช้งานประตูระบายตะกอนทราย ฝายหักจะมีอัตราการระบายตะกอนออกมามากที่สุดตามด้วยฝายสันมนและฝายคีย์เปียโนตามลำดับ นอกจากนี้ ฝายหักยังมีศักยภาพในการระบายตะกอนที่ระดับการทับถมน้อยอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าเป็นห่วงสำหรับการใช้งานฝายหักคือ เมื่อไม่มีการเปิดประตู

ระบาย ตะกอนทรายจะไปทับถมด้านหน้าประตูระบายสูงซึ่งจะเกือบท่วมกับความสูงของสันฝายทำให้เสี่ยงต่อการชำรุดของประตูระบายอย่างสูง

4.3.วิจารณ์ผลการทดลองและการนำไปใช้งาน

จากผลการทดลองการใช้งานฝายทั้งกรณีและไม่มีประตูระบายพบว่า การทับถมของตะกอนทรายด้านหน้าฝายเมื่อไม่มีประตูระบายของฝายทั้งสามชนิดจะเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าฝายเป็นหลัก และการเปลี่ยนแปลงตะกอนที่ทับถมในฝายหักจะเกิดขึ้นมากและเร็วกว่าฝายสันมนและฝายคีย์เปียโน การทับถมของตะกอนหน้าฝายสันมนของการทดลองนี้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับฝายสันมนบริเวณฝายดินดำ จังหวัดเชียงราย ดังแสดงในรูปที่ 24 การทับถมของตะกอนหน้าฝายหักสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Herbst et al. [3] เป็นอย่างดี ซึ่งการทับถมของฝายสันมนและฝายหักบ่งชี้ว่ารูปร่างของการทับถมตะกอนทรายทำให้รูปทรงของพื้นผิวทรายที่ทับถมคล้ายกับรูปทรงของฝายคีย์เปียโน คือ มีระดับการทับถมลาดเอียงไปทางด้านหน้าฝาย ประกอบกับเมื่อพิจารณาอัตราส่วนปริมาตรตะกอนทรายที่ระบายออกไปเมื่อไม่มีประตูระบาย ฝายคีย์เปียโนสามารถระบายตะกอนทรายออกได้มากที่สุด ดังนั้น ในลำน้ำขนาดเล็กที่ไม่มีการติดตั้งประตูระบายตะกอน ควรใช้งานฝายรูปแบบคีย์เปียโนจะดีที่สุดเพราะนอกจากจะสามารถระบายตะกอนออกได้ด้วยลักษณะของฝายแล้ว ยังลดระดับความสูงของน้ำที่ไหลผ่านฝายด้วย แต่สำหรับการติดตั้งฝายที่สามารถมีประตูระบายตะกอนได้ ควรใช้งานฝายหักเนื่องจากมีศักยภาพในการระบายตะกอนทรายได้สูงสุดและระบายได้ดีแม้แต่ในระดับการทับถมที่ต่ำ



รูปที่ 24 การทับถมของตะกอนหน้าฝายดินดำ

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบายตะกอนทรายของฝายสันมน ฝายหยัก และฝายคีย์เปียโน การศึกษาเลือกใช้แบบจำลองกายภาพมาตราส่วน 1:10 โดยใช้ฝายดินดำและฝายทาสีชมพูเป็นต้นแบบในการจัดทำฝายสันมนและฝายหยัก สำหรับฝายคีย์เปียโนจะออกแบบโดยกำหนดระดับความสูงให้เท่ากับฝายทั้งสอง ตะกอนทรายจำลองที่ใช้ในการศึกษาคือตะกอนจากแร่ลิกไนต์โดยมีขนาดประสิทธิภาพ (D_{50}) ที่ 3.42 มม. การศึกษาความเหมาะสมในการใช้งานแบ่งเป็นกรณีและไม่มีประตูประบายทรายติดตั้งในฝาย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในฝายที่ไม่มีประตูประบายทราย การระบายตะกอนของฝายคีย์เปียโนจะดีที่สุด สำหรับฝายหยักจะเริ่มระบายได้เมื่อตะกอนทรายทับถมหน้าฝายจนมีรูปร่างเหมือนฝายคีย์เปียโน ในขณะที่ฝายสันมนไม่สามารถระบายตะกอนออกไปได้เลย สำหรับผลการศึกษากรณีการระบายตะกอนทรายเมื่อมีประตูประบายติดตั้งในฝายแสดงให้เห็นว่าฝายหยักมีศักยภาพในการระบายตะกอนทรายสูงสุดและยังสามารถระบายได้ดีแม้ในช่วงการทับถมของตะกอนต่ำ ในขณะที่ฝายสันมนและฝายคีย์เปียโนสามารถระบายได้น้อยกว่าตามลำดับ ผลการศึกษายังชี้ว่า ในลำน้ำที่ไม่สามารถติดตั้งประตูประบายทรายในฝายได้ ควรใช้งานฝายคีย์เปียโนเป็นหลัก แต่สำหรับลำน้ำที่สามารถติดตั้งประตูประบายทรายในฝายได้ ควรเลือกใช้ฝายหยัก แต่ทั้งนี้ควรมีผู้ดูแลการควบคุมประตูประบายเนื่องจากตะกอนที่ทับถมในฝายหยักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทับถมสูงบริเวณหน้าประตูประบายอันทำให้เสี่ยงต่อการชำรุดของประตูประบายได้

6. ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการศึกษาครั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบโดยใช้รายน้ำขนาด 30 ซม. ในการทดสอบซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็กจึงทำการจำลองได้เพียง 1 วนรอบฝาย หากเพิ่มความกว้างของรายน้ำจะทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการระบายตะกอนของการจัดวางฝายเต็มรูปแบบในทางน้ำได้
- 2) ควรมีการศึกษาฝายประเภทอื่นๆ เพิ่มเติมในประเด็นการระบายตะกอนทรายเมื่อไม่มีประตูประบาย เช่น crump

weir ซึ่งมีลักษณะความลาดชันใกล้เคียงกับฝายคีย์เปียโน หรือฝายบางซึ่งสามารถปรับระดับฝายได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Plangoen, S. Tiaotoi and S. Mueangthong, "Effects of land use and climate change on erosion of the Upper Yom Basin," *Chulachomklao Royal Military Academy Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 65–78, 2015.
- [2] P. Phalaphananawi, "The Principles for calculating the discharge of water through irrigation regulator," Royal Irrigation Department, Bangkok, Thailand, 2011. [Online]. Available: <http://water.rid.go.th/waterm/template/manager/FProjectMAC/O&MQA/65/a/9/9.4.pdf>
- [3] J. Herbst, M. Gebhardt, J. Merkel, F. Belzner, and C. Thorenz, "Sediment transport over labyrinth weirs," in *Proc. 7th International Symposium on Hydraulic Structure*, Aachen, Germany, May 15–18, 2018, doi: 10.15142/T3XP91.
- [4] C. Sindelar, J. Schobesberger and H. Habersack, "Effects of weir height and reservoir widening on sediment continuity at run-of-river hydropower plants in gravel bed rivers," *Geomorphology*, vol. 291, pp. 106–115, 2017, doi: /10.1016/j.geomorph. .2016.07.007
- [5] *Hydraulics design of Labyrinth weir*, S. Choonhawat, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: https://engfanatic.tumcivil.com/tumcivil_1/content/upload/File/KromYotha/Labyrinth.pdf.
- [6] M. Nosedá, I. Stojnic, M. Pfister and A. J. Schleiss, "Upstream erosion and sediment passage at piano key weirs," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 145, no. 8, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001616
- [7] J. M. Ribí, B. Spahni, D. Dorthe and M. Pfister, "Piano Key Weir as overflow on sedimentation basin of wastewater treatment plant," in *Proc. 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key*

- Weirs (PKW 2017)*, Qui Nhon, Vietnam, Feb. 22–24, 2017, pp. 175–184, doi: 10.1201/9781315169064-25.
- [8] F. L. Bremer and M. Oertel “Numerical uncertainty of piano key weir discharge coefficient estimations by means of 3D CFD modelling-a preliminary study,” in *Proc. 7th International Symposium on Hydraulic Structure*, Aachen, Germany, May 15–18, 2018, doi: 10.15142/T39W7R.
- [9] P. Blanc and F. Lempérière, “Labyrinth spillways have a promising future,” *International Journal on Hydropower and Dams*, vol. 8, no. 4, pp. 129–131, 2001.
- [10] F. Lempérière and A. Ouamane, “The piano key weir: a new cost-effective solution for spillways,” *Hydropower & Dams*, vol. 10, no. 5, pp. 144–149, 2003.
- [11] F. Laugier, “Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam,” *Hydropower & Dams*, vol. 13, no. 5, pp. 94–101, 2007.
- [12] J. Pralong, J. Vermeulen, B. Blancher, F. Laugier, S. Erpicum, O. Machiels, M. Pirotton, J. L. Boillat, M. L. Ribeiro and A. Schleiss, “A naming convention for the Piano Key weirs geometrical parameters,” in *Proc. 1st International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011)*, Liege, Belgium, Feb. 9–11, 2011.
- [13] A. Shields, “Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement,” The Prussian Research Institute for Hydraulic Engineering, Berlin, Germany, Rep. 1338, 1936.
- [14] M. S. Yalin, “Similarity in Sediment Transport,” in *Theory of Hydraulic Models*, 1st ed., London, Britain: Red Globe Press, 1971, ch. 6, sec. 6.5, pp. 145–186.

มาตรการปรับตัวต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลโดยการเติมทรายชายหาด

ณ หาดบ้านเพ จังหวัดระยอง

Adaptation Measure to Sea Level Rise by Beach Nourishment

at Banpae Beach, Rayong Province

ภัทรกร นิธินรางกูร^{1,*} และ สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยโตเกียว บุนเกียว กรุงโตเกียว 113-8654

²ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Pattrakorn Nidhinarangkoon^{1,*} and Sompratana Ritphring²

¹Department of Civil Engineer, Faculty of Engineering, The University of Tokyo,

Bunkyo city, Tokyo, 113-8654, Japan

²Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,

Lat Yao Subdistrict, Chatuchak district, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding Author E-mail: pattrakorn.n@gmail.com

Received: Aug 24, 2022; Revised: Feb 19, 2023; Accepted: Feb 20, 2023

บทคัดย่อ

ชายฝั่งทะเลคือพื้นที่ที่มีความเป็นพลวัตสูง พื้นที่ชายฝั่งกว่า 70% ทั่วโลกกำลังเผชิญกับปัญหาระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงภัยพิบัติทางทะเลที่มีแนวโน้มมากขึ้นทั้งความถี่และความรุนแรง ผลกระทบทางตรงจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลคือ พื้นที่ริมชายฝั่งจะค่อยๆหายไปจากการปรับสมดุลใหม่ของกระบวนการทางชายฝั่งทะเลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล ซึ่งการหายไปของชายหาดที่มีลักษณะการใช้ประโยชน์เพื่อการท่องเที่ยว นั้น อาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายทางเศรษฐกิจมากกว่า ชายหาดที่มีลักษณะการใช้ประโยชน์ในด้านอื่น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล ในอนาคตบริเวณชายหาดบ้านเพ ซึ่งเป็นชายหาดท่องเที่ยวของ อ.เมือง จ.ระยอง ด้วยแบบจำลองบูรณาการ ร่วมกับการสำรวจภาคสนาม พร้อมทั้งใช้มาตรการเติมทรายชายหาดเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยพบว่า ความกว้างของชายหาดที่อาจถูกกัดเซาะในอนาคตมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 16–27 เมตร โดยมีปริมาตรชายหาดสูญเสียเฉลี่ยประมาณ 5.0–8.4 แสนลูกบาศก์เมตร เมื่อเลือกมาตรการเติมทรายชายหาดเพื่อบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต พบว่า งบประมาณที่จำเป็นต้องใช้อยู่ในช่วงประมาณ 294–493 ล้านบาท จากสถานการณ์สมมติในอนาคต ผลจากการศึกษานี้มีส่วนช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเลือกมาตรการเพื่อบรรเทาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลในอนาคตสำหรับชายหาดบ้านเพ รวมถึงชายหาดท่องเที่ยวอื่นๆต่อไป

คำสำคัญ: เติมทรายชายหาด, การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล, กัดเซาะชายฝั่ง, แบบจำลองบูรณาการ

Abstract

Coastal zone is one of the most dynamic areas in the world. More than 70 percent of the coastal areas around the world are experiencing the effect of sea level rise. In addition, Climate change has exacerbated the intensity and frequency

of coastal disasters. The gradual erosion of the coast owing to the shoreline recovery process is the direct effect of sea level rise. The economy is affected severely by the loss of tourism beaches more than other types of beaches. This study aims to use Bruun rule with the field investigation to analyze the future beach loss due to sea level rise at Banpae tourism beach, which is located in Rayong Province. The beach nourishment was determined to be the adaptation measure in this study. Results showed that the average loss of beach width will be about 16–27 meters and the average beach volume is projected to be lost about 5.0–8.4 hundred thousand cubic meters. The cost of adaptation to sea level rise in the future by using beach nourishment was estimated about 294–493 million baht for the future scenarios, respectively. The results will support the planning of adaptation to sea level rise for Banpae beach and other tourism beaches in the further.

Keywords: Beach nourishment, Sea level rise, Coastal erosion, Bruun rule

1. บทนำ

ในปี ค.ศ. 2007 พบว่า 60% ของเมืองริมชายฝั่งทะเลที่มีประชากรมากกว่า 5 ล้านคนนั้นตั้งอยู่ในระยะไม่เกิน 100 กิโลเมตรจากชายฝั่ง [1] ชายฝั่งทะเลนั้นนับได้ว่าเป็นพื้นที่ที่มีความหลากหลายทางชีวภาพและเป็นหนึ่งในสิ่งแวดล้อมบนโลกที่มีความเป็นพลวัตมากที่สุด [2] และกำลังถูกคุกคามอย่างหนักจากทั้งธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ [3] ทั้งยังมีความเปราะบางสูงต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ [4] ซึ่งส่งผลกระทบต่อพื้นที่ชายฝั่งทะเลในหลายมิติ เป็นต้นว่า การกัดเซาะชายฝั่ง น้ำท่วมริมชายฝั่ง พายุซัดฝั่ง การแทรกตัวของน้ำทะเลริมชายฝั่ง [5] โดยกระทบทั้งสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม ของผู้ที่ตั้งถิ่นฐานและใช้ประโยชน์ริมชายฝั่งทะเล

จากการศึกษาในปี ค.ศ. 2014 พบว่าพื้นที่ชายฝั่งกว่า 70% ทั่วโลกกำลังเผชิญกับปัญหากระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 20% จากค่าระดับน้ำทะเลโลกเฉลี่ย รวมถึงภัยพิบัติทางทะเลที่มีแนวโน้มมากขึ้นทั้งความถี่และความรุนแรง [6] โดยนักวิทยาศาสตร์คาดเดากันว่าพื้นที่ริมมหาสมุทรแปซิฟิกจะเป็นพื้นที่ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลมากที่สุด [7]

สำหรับประเทศไทย เริ่มมีการศึกษาเรื่องการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลอย่างจริงจังในช่วงปี พ.ศ. 2540–2550 โดยใช้ทั้งข้อมูลจากสถานีวัดระดับน้ำชายฝั่งทะเล [8] ข้อมูลจากดาวเทียมและจากแบบจำลอง [9] ในระยะแรกของการศึกษาพบว่ามีความจำกัดเรื่องการบันทึกและความต่อเนื่องของข้อมูลระดับน้ำเป็นอย่างมาก ต่อมาเริ่มมีการบันทึกข้อมูล

อย่างเป็นระบบมากขึ้น รวมถึงเริ่มใช้เทคโนโลยีอื่นๆ เข้ามาช่วยวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น ผลการศึกษาส่วนใหญ่เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือระดับน้ำทะเลในประเทศไทยกำลังค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกันกับโซนเอเชียแปซิฟิก

ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลโลกจากแบบจำลองภูมิอากาศ (CMIP5) พบว่า ช่วงปี ค.ศ. 2081–2100 ระดับน้ำทะเลทั้งสองฝั่งของประเทศไทยทั้งอ่าวไทยและอันดามัน จะมีระดับเพิ่มขึ้นประมาณ 0.21–0.49 เมตร สำหรับสถานการณ์ที่ดีที่สุด และเพิ่มขึ้นถึง 0.55–0.65 เมตร สำหรับสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด อ้างอิงจากระดับน้ำทะเลในปี ค.ศ. 1861–1900 [6] และพบว่า ที่ปี ค.ศ 2100 จะสูญเสียชายหาด 45.8% สำหรับ RCP 2.6, 55.0% สำหรับ RCP4.5, 56.9% สำหรับ RCP6.0 และ 71.8% สำหรับ RCP8.5 [10]

ผลกระทบทางตรงจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลคือพื้นที่ริมชายฝั่งจะค่อยๆ ถูกกลืนหายไป จากการปรับสมดุลใหม่ของกระบวนการทางชายฝั่งทะเลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลนี้ ซึ่งหมายความว่ายิ่งระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นพื้นที่ชายฝั่งทะเลจะยิ่งถูกกลืนหายไปเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งทะเลที่มีความลาดชันต่ำ จะหายไปมากกว่าชายฝั่งทะเลที่มีความลาดชันสูงกว่า [11] ซึ่งการหายไปของพื้นที่ชายหาดที่มีลักษณะการใช้ประโยชน์เพื่อการท่องเที่ยว นั้น อาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายทางเศรษฐกิจมากกว่าชายหาดที่มีการประโยชน์ในทางอื่น [12]

สำหรับประเทศไทย หน่วยงานที่เกี่ยวข้องยังคงใช้มาตรการป้องกันชายฝั่งที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อรับมือกับการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล ได้แก่ กำแพงกันคลื่น เขื่อนกัน

คลื่นนอกชายฝั่ง รอดักทราย และการเติมทรายชายหาด โดยที่ชายหาดท่องเที่ยวนี้ มาตรการเติมทรายชายหาดกำลังถูกนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ชายหาด ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมูลค่าทางเศรษฐกิจของชายหาด [13] ถือได้ว่าเป็นมาตรการที่ส่งผลกระทบทางลบต่อไปยังพื้นที่ข้างเคียงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมาตรการที่ใช้โครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อป้องกันชายฝั่งประเภทอื่น [14]

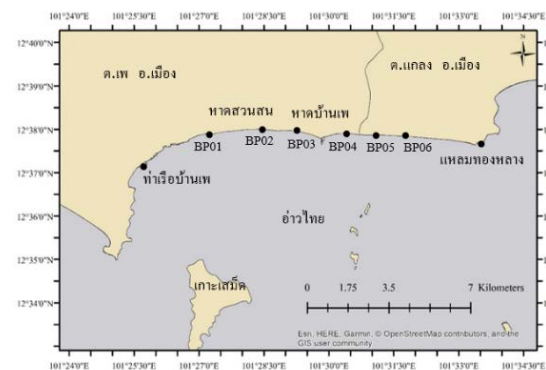
การศึกษานี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลบริเวณชายหาดบ้านเพ ซึ่งเป็นชายหาดท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงตั้งอยู่ใน อ.เมือง จ.ระยอง หาดบ้านเพมีการใช้ประโยชน์หลากหลายรูปแบบ นอกจากการใช้ประโยชน์สำหรับกิจกรรมชายหาดเพื่อการท่องเที่ยวแล้ว ยังเป็นที่ตั้งของชุมชนประมงขนาดใหญ่ มีร้านอาหารริมทะเล และเป็นท่าเรือข้ามไปเกาะเสม็ดเนื่องจากกิจกรรมทั้งหมดจำเป็นต้องใช้พื้นที่ชายหาด จึงควรใช้มาตรการเติมทรายชายหาดเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น

แนวชายฝั่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลในอนาคต วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองบูรณาการกับการสำรวจภาคสนาม และอ้างอิงข้อมูลการเติมทรายชายหาดจากการดำเนินงานของกรมเจ้าท่าที่ผ่านมา ผลการศึกษาจะสามารถใช้เป็นแนวทางจัดการพื้นที่ชายฝั่งทะเลเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลในอนาคต

2. พื้นที่ศึกษา

หาดบ้านเพ (รูปที่ 1) มีลักษณะเป็นอ่าว ตั้งอยู่ใน ตำบลเพ อำเภอเมือง จังหวัดระยอง มีความยาวประมาณ 14.5 กิโลเมตร จำนวน 6 จุดสำรวจ ตั้งแต่ BP01 ถึง BP06 มีสภาพชายหาดในแต่ละตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 2 สภาพโดยรวมมีลักษณะเป็นหาดทรายและบริเวณปากแม่น้ำได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดปกคลุมตั้งแต่ประมาณกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์กับมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งพัดปกคลุมในช่วงฤดูฝนประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม ซึ่งพัดจากทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นส่วนใหญ่ ทำให้อากาศชื้นและมีฝนตก หาดบ้านเพมีการใช้ประโยชน์ที่

หลากหลาย ทั้งเพื่อการท่องเที่ยว พักผ่อนหย่อนใจ ชุมชนประมง ที่อยู่อาศัย และทำเทียบเรือ



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา



รูปที่ 2 สภาพทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

3. ข้อมูลและเครื่องมือที่ใช้

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้มี ภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลคลื่น ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล ข้อมูลความลาดชันชายหาดและขนาดกลางตะกอน และ มูลค่าโครงการเสริมทรายชายหาด

3.1.ภาพถ่ายดาวเทียม

ภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Earth ในช่วงระหว่างเดือน เมษายน ปี พ.ศ. 2560 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2563 (ตารางที่ 1) ใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายหาด

ตารางที่ 1 ข้อมูลวันที่ถ่ายภาพถ่ายดาวเทียม

วันที่
3 เมษายน พ.ศ. 2560
19 มกราคม พ.ศ. 2561
10 มีนาคม พ.ศ. 2562
13 ธันวาคม พ.ศ. 2562
24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

3.2.ข้อมูลคลื่น

ข้อมูลที่ใช้เป็น 3-hour significant wave ซึ่งมี 12-hour exceeds significant wave height re-analyzed (มีความละเอียด 1-ดีกรีละติจูด-ลองจิจูด) จาก European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) เป็นข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2523 ถึง พ.ศ. 2553

ข้อมูลคลื่นที่นำมาใช้ในพื้นที่ศึกษามีดังนี้ ค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.60 เมตร, คาบคลื่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 13.82 วินาที, ความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.92 เมตร และ คาบคลื่นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 7.18 วินาที

3.3.ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล

ข้อมูลจาก 21CMIP5 models เป็นข้อมูลแบบ ensemble-mean regional sea-level rise (มีความละเอียด 1-ดีกรีละติจูด-ลองจิจูด) โดย RCP คือ Representative Concentration Pathway สำหรับสถานการณ์สมมติในอนาคต RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 และ RCP8.5 ณ ปี พ.ศ.2643 เมื่อ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับข้อมูลในปี พ.ศ.2529 ถึง พ.ศ. 2548 [15]

3.4.ข้อมูลความลาดชันชายหาดและขนาดกลางของตะกอน

จากการสำรวจภาคสนาม ข้อมูลความลาดชันชายหาดได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความลาดชันชายหาด ขนาดกลางของตะกอนได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) พื้นที่ศึกษามีบ้านเพในแต่ละบริเวณมีค่าความลาดชันชายหาดและขนาดกลางของ

ตะกอนแสดงดังตารางที่ 2 โดยพบว่าชายหาดมีความลาดชันอยู่ในช่วง 2–9 องศา และมีขนาดกลางของตะกอนอยู่ในช่วง 0.25–1.2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2 ความลาดชันชายหาดและขนาดกลางของตะกอน

พื้นที่ศึกษา	ความลาดชันชายหาด (องศา)	ขนาดกลางของตะกอน(D_{50}) (มม.)
BP01	8.5	0.28
BP02	3.3	0.25
BP03	2	0.25
BP04	6.3	0.6
BP05	7.4	0.48
BP06	9	1.2

3.5.มูลค่าโครงการเติมทรายชายหาด

การเติมทรายชายหาดเป็นมาตรการหนึ่งในการป้องกันชายหาดจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล ปัจจุบันในประเทศไทยมีโครงการเติมทรายชายหาดที่ก่อสร้างแล้วเสร็จเพียง 1 โครงการ ณ หาดพิทยา จ.ชลบุรี และที่กำลังดำเนินการอยู่ที่หาดจอมเทียน จ.ชลบุรี และหาดชลาลัย จ.สงขลา การศึกษานี้ประเมินมูลค่าของการเติมทรายจากค่าเฉลี่ยต่อลูกบาศก์เมตรของการเติมทรายจากทั้ง 3 โครงการ มูลค่า 803 บาท/ลบ.ม. ซึ่งได้รวมทั้งค่าขุดล้าง ขนย้าย และค่าดำเนินการทุกอย่างครบทั้งกระบวนการแล้ว [16–18]

4. วิธีการวิจัย

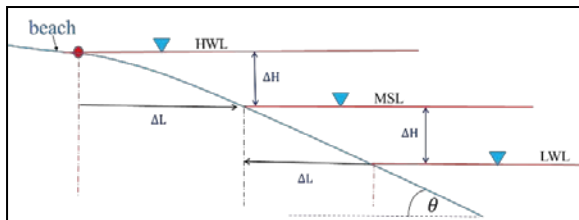
ในการศึกษานี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การระบุแนวชายฝั่งด้วยวิธีการปรับแก้ระดับน้ำทะเล (Tidal correction) [19–20] และการประเมินการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลด้วยแบบจำลองบรูน (Bruun rule) เพื่อหาพื้นที่เปลี่ยนแปลงของชายหาดในแต่ละสถานการณ์สมมติ

4.1.การระบุแนวชายฝั่งด้วยวิธีการปรับแก้ระดับน้ำทะเล (Tidal correction)

การระบุแนวชายฝั่งด้วยการปรับแก้ระดับน้ำทะเลมีจุดประสงค์เพื่อระบุแนวชายฝั่ง ณ เส้นระดับทะเลปาน

กลาง เพื่อเป็นระดับอ้างอิงในการระบุการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง [19–21] สามารถทำได้โดยการหาเวลาที่ถ่ายภาพจากเงาในภาพ เพื่อระบุตำแหน่งระดับน้ำทะเล ณ เวลาถ่ายภาพ และปรับแก้ระดับน้ำทะเล ขึ้นตอนในการทำคือ ตรึง Ground control point เพื่อปรับพิกัดของภาพ และใช้กระบวนการ image-processing ในการวิเคราะห์ความต่างสีของภาพเพื่อระบุตำแหน่งของชายฝั่ง ก่อนจะวัดมุม solar-azimuth angle (θ) เพื่อประมาณเวลาในการถ่ายภาพจากมุม และปรับแนวชายฝั่ง ให้เป็นชายฝั่ง ณ ระดับทะเลปานกลาง โดยใช้สมการที่ (1) จากรูปที่ 3 [21] เมื่อ MSL คือ ระดับทะเลปานกลาง, HWL คือ ระดับน้ำที่สูงกว่าระดับทะเลปานกลาง, LWL คือ ระดับน้ำที่ต่ำกว่าระดับทะเลปานกลาง, ΔH คือ ระดับที่แตกต่างระหว่าง HWL กับ MSL หรือ LWL กับ MSL, ΔL คือ ระยะห่างระหว่างแนวชายฝั่งที่ระบุได้ ณ ช่วงเวลาที่ถ่ายภาพกับระดับทะเลปานกลาง และ θ คือ ความลาดชันชายหาด หรือ Foreshore slope

$$\Delta L = \frac{\Delta H}{\tan \theta} \quad (1)$$



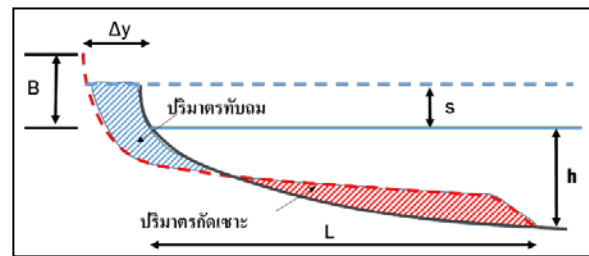
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของระดับน้ำ ความกว้างชายหาด และความลาดชันชายหาด

4.2. ระบุการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลด้วย แบบจำลองบูรณและประเมินพื้นที่เปลี่ยนแปลงของแต่ละสถานการณ์สมมติ (Future scenarios)

Bruun [22] เป็นแบบจำลองซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล โดยมีสมมติฐานว่า แบบจำลองมีลักษณะเป็นสองมิติและไม่คิดผลกระทบจากคลื่น โดยมีสมการของ Bruun (Bruun rule equation) แสดงดังสมการที่ (2) และ รูปที่ 4 เมื่อ Δy คือ ระยะแนวชายฝั่งที่หายไปจากการ

เพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล, y_* คือ ความยาวของรูปตัดชายหาดที่พิจารณา, S คือ ระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้น, h คือ ความลึกของระดับน้ำทะเลเดิมถึงระดับท้องเดิม (Old bottom level) ที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของตะกอน (Depth of closure) และ B คือ ความสูงของตะกอนทรายก่อนการกัดเซาะ (Berm height)

$$\frac{\Delta y}{y_*} = \frac{S}{h + B} \quad (2)$$



รูปที่ 4 หน้าตัดชายหาดและตัวแปร Bruun rule

ระดับความลึกที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของตะกอน (Depth of closure) คำนวณจากความสูงคลื่นนัยสำคัญสูงสุดและคาบคลื่นสูงสุดโดยใช้สมการที่ (3) [23] เมื่อ $H_{e,t}$ คือ ความสูงคลื่นนัยสำคัญสูงสุด (Maximum significant wave height), $T_{e,t}$ คือ คาบคลื่นสูงสุด (Maximum wave period) และ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$$h = 2.28H_{e,t} - 68.5\left(\frac{H_{e,t}^2}{gT_{e,t}^2}\right) \quad (3)$$

ความยาวของรูปตัดชายหาด พิจารณาจากความสัมพันธ์ของระดับน้ำทะเลเดิมถึงระดับท้องเดิม หรือระดับความลึกที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของตะกอน (Depth of closure) คำนวณจากสมการที่ (4) [24] เมื่อความลึกของระดับน้ำทะเลเดิมถึงระดับท้องเดิมไม่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของตะกอน และ A คือสัมประสิทธิ์ค่า A (A value) ที่ได้จากความสัมพันธ์ขนาดกลางตะกอนทราย (D_{50}) และ ความลาดชันชายฝั่ง (Beach slope)

$$h = Ay_*^{2/3} \quad (4)$$

ค่าความสูงคลื่น ณ บริเวณคลื่นแตกตัว (Wave height at breaking wave) คำนวณโดยสมการที่ (5) [25] เพื่อนำไปหา ค่าความสูงของชายหาดก่อนการกัดเซาะ เมื่อ h_b คือ ความสูงคลื่น ณ บริเวณคลื่นแตกตัว (Wave height at breaking wave), $\tan \alpha$ คือ ความลาดชันของชายฝั่ง (Beach slope), H_s คือ ความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ย (Mean significant wave height) และ L_s คือ ความยาวคลื่นนัยสำคัญ (Significant wave length) ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ (6) เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ T_s คือ คาบคลื่นเฉลี่ย (Mean significant wave period)

$$\frac{H_b}{H_s} = (\tan \alpha)^{0.2} \left(\frac{H_s}{L_s} \right)^{-0.25} \quad (5)$$

$$L_s = \frac{gT_s^2}{2\pi} \quad (6)$$

ค่าความสูงของชายหาดก่อนการกัดเซาะ (Berm height) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) [26]

$$B = 0.125H_b^{5/8} (gT_s^2)^{3/8} \quad (7)$$

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

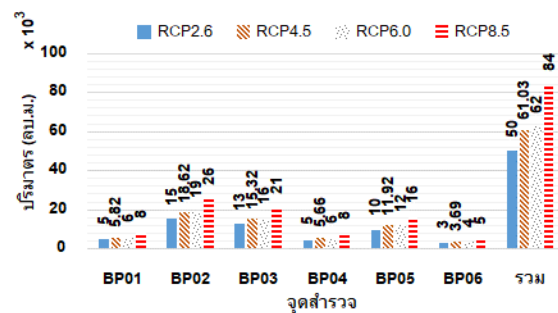
ผลการวิจัยและการอภิปรายผลประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงชายหาดจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล และ มาตรการเติมทรายชายหาด แสดงดังต่อไปนี้

5.1. การเปลี่ยนแปลงชายหาดจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล

จากการวิเคราะห์พบว่าบริเวณ BP02 มีระยะกัดเซาะจากการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลมากที่สุด (ตารางที่ 3 และ รูปที่ 5) และบริเวณ BP06 มีระยะกัดเซาะเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลน้อยที่สุดเนื่องจากความลาดชันชายหาดและขนาดกลางของตะกอน ส่งผลต่อการวิเคราะห์ระยะการเปลี่ยนแปลง หาดบริเวณ BP02 มีความลาดชันต่ำ (2 องศา) และขนาดกลางตะกอนมีขนาดเล็ก (0.25 มม.) หาดบริเวณ BP06 มีความลาดชันสูงกว่าบริเวณอื่นๆ (9 องศา) และขนาดกลางของตะกอนมีขนาดใหญ่ (1.2 มม.)

ตารางที่ 3 ปริมาตรชายหาดสูญเสียเฉลี่ยและระยะการเปลี่ยนแปลงชายหาดจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล

สถานการณ์ สมมติ	ปริมาตรชายหาด สูญเสียเฉลี่ย (ลบ.ม)	ระยะเฉลี่ยของหาด ที่หายไป (ม.)
RCP 2.6	500,753	16.23
RCP 4.5	610,264	19.77
RCP 6.0	624,875	20.25
RCP 8.5	838,616	27.17



รูปที่ 5 ปริมาตรชายหาดสูญเสียเฉลี่ยจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล

จากตารางที่ 3 พบว่าระยะเฉลี่ยของหาดที่หายไปในแต่ละสถานการณ์สมมติอยู่ในช่วง 16 ถึง 27 เมตร จากความกว้างชายหาดเฉลี่ยปัจจุบันซึ่งมีความกว้าง 15.80 เมตร และมีปริมาตรชายหาดสูญเสียเฉลี่ยในช่วง 5–8.4 แสนลูกบาศก์เมตร

โดยพบว่า ผลการศึกษานี้สามารถระบุปริมาณการเปลี่ยนแปลงของชายหาดทั้งเชิงระยะทาง รวมถึงปริมาตรของทรายที่หายไปจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลได้ ในแต่ละพื้นที่ย่อย ซึ่งมีความยาวหาด 1–4 กม. ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งละเอียดกว่างานศึกษาที่ผ่านมา ที่เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในภาพรวมของชายหาดแถบนี้ไว้เพียง 1 ค่า ตลอดแนวความยาวกว่า 30 กม. [10]

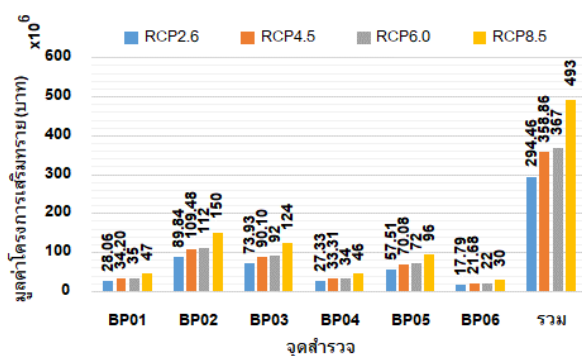
5.2. มาตรการเติมทรายชายหาด

มาตรการป้องกันชายฝั่งมีหลายรูปแบบ แต่การเลือกใช้มาตรการที่เป็นโครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น กำแพงกันคลื่น จะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ชายหาด ที่มีความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์ในบริเวณพื้นที่ศึกษา การศึกษานี้เลือกมาตรการเติมทรายชายหาดเพื่อฟื้นฟูพื้นที่ชายหาดที่หายไปเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล โดยจะเติมทรายมี

ความกว้างเท่ากับระยะกีดเซาะชายหาดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล และมีความสูงเท่ากับสันหาดเดิมจากการประเมินปริมาตรทรายที่เปลี่ยนแปลงและคำนวณราคาโครงการเติมทรายชายหาด ในแต่ละสถานการณ์สมมติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4 และ รูปที่ 6 โดยมูลค่าการเติมทรายชายหาดแปรผันตรงกับปริมาตรทรายที่เปลี่ยนแปลงจากการประเมินในขั้นแรก และขนาดกลางตะกอนที่นำมาเติมมีค่าเท่ากับขนาดกลางตะกอนเดิม โดยมีงบประมาณที่จำเป็นต้องใช้ในช่วงประมาณ 294–493 ร้อยล้านบาท

ตารางที่ 4 โครงการเสริมทรายชายหาดโดยใช้ทรายจากทะเล

สถานการณ์สมมติ	มูลค่าโครงการ (บาท)
RCP 2.6	294,463,039
RCP 4.5	358,859,625
RCP 6.0	367,451,596
RCP 8.5	493,139,663



รูปที่ 6 มูลค่าโครงการเสริมทรายชายหาด

6. สรุป

ผลกระทบจากเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลบริเวณชายหาดบ้านเพ โดยการวิเคราะห์แนวชายฝั่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลในอนาคตด้วยแบบจำลองบรูณ ร่วมกับการสำรวจภาคสนาม พบว่า ความกว้างของชายหาดที่อาจถูกกัดเซาะในอนาคตมีค่าเฉลี่ยประมาณ 16–27 เมตร โดยมีปริมาตรชายหาดสูญเสียเฉลี่ยเท่ากับ 5–8.4 แสนลูกบาศก์เมตร สำหรับสถานการณ์สมมติที่ดีที่สุด (RCP 2.6) และเลวร้ายที่สุด (RCP 8.5) ตามลำดับ

เมื่อเลือกมาตรการเติมทรายชายหาดเพื่อบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต โดยการเพิ่มความกว้างชายหาดให้เท่ากับระยะกีดเซาะของชายหาดที่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล โดยใช้ความสูงเท่ากับสันหาดเดิม และเลือกใช้ทรายจากทะเลเหมือนกับที่หน่วยงานเลือกใช้อยู่ในปัจจุบันพบว่า งบประมาณที่จำเป็นต้องใช้ในช่วงประมาณ 294–493 ร้อยล้านบาท สำหรับสถานการณ์สมมติที่ดีที่สุด (RCP 2.6) และเลวร้ายที่สุด (RCP 8.5) ตามลำดับ ผลจากการศึกษานี้จะมีส่วนช่วยสนับสนุนข้อมูลเพื่อการตัดสินใจของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการเลือกมาตรการเพื่อบรรเทาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลในอนาคตกรณีศึกษาชายหาดบ้านเพ รวมถึงชายหาดท่องเที่ยวอื่นๆต่อไป โดยสามารถนำวิธีการศึกษานี้ไปปรับใช้ตามบริบทของแต่ละชายหาดที่แตกต่างกัน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. R. Burkett, J. O. Codignotto, J. E. Hay, R. F. McLean, S. Ragoonaden, C. D. Woodroffe, R. J. Nicholls and P. P. Wong, "Coastal systems and low-lying areas," in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007, 315–356.
- [2] R. F. McLean, A. Tsyban, V. Burkett, J. O. Codignott, D. L. Forbes, N. Mimura, R. J. Beamish and V. Ittekkot, "Coastal Zones and Marine Ecosystems," in *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken

- and K. S. White, Eds, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001, 343–379.
- [3] R. J. Nicholls and J. A. Lowe, “Benefits of mitigation of climate change for coastal areas,” *Global environmental change*, vol. 14, no. 3, 229–244, 2004, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2004.04.005.
- [4] U.S. EPA, “Assessment of the Impacts of Global Change on Regional U.S. Air Quality: A Synthesis of Climate Change Impacts on Ground-Level Ozone,” U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, Rep. EPA/600/R-07/094, 2009.
- [5] G. Camarsa, J. P. Silva, J. Toland, J. Eldridge, T. Hudson, W. Jones, E. O’Hara, E. Thorpe and C. Thévenot, “Coastal climate change adaptation,” in *Life and coastal management*, Gare, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012, ch.4, sec. 1, pp.54.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2014 Synthesis Report,” Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, Rep. AR5, 2014.
- [7] D. Charan, M. Kaur, P. Singh, “Customary Land and Climate Change Induced Relocation - A Case Study of Vunidogoloa Village, Vanua Levu, Fiji,” in *Climate Change Adaptation in Pacific Countries*, W. L. Filho, Ed., Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017, ch. 2, pp. 19–33.
- [8] K. Pucharapitchakon and S. Ritphring, “Sea level change in Thailand,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 55–60, 2012. (in Thai)
- [9] T. Intang, M. Anongponyoskun and P. Sojisuporn, “Application of numerical model to study the tidal current: Case study-The Chao Phraya River mouth, Samutprakarn province,” in *Proc. 5th Marine Science Conference*, Bangkok, Thailand, 2016. pp. 619–625. (in Thai)
- [10] S. Ritphring, C. Somphong, K. Udo and S. Kazama, “Projections of Future Beach Loss due to Sea Level Rise for Sandy Beaches along Thailand's Coastlines,” *Journal of Coastal Research*, vol. 85, no. sp1, pp. 541–545, 2018, doi: 10.2112/SI85-109.1.
- [11] S. Ritphring, “Beach Nourishment for Coastal Protection,” *Ladkrabang engineering Journal*. vol. 31, no. 4, pp. 7–12, 2014. (in Thai)
- [12] K. Kunkitti. and S. Ritphring, “Ban Krut beach change due to sea level rise,” in *the 26th National Convention on Civil Engineering*, 2021, pp. WRE-05-1– WRE-05-6. [Online]. Available: <https://www.conference.thaince.org/index.php/nccce26/article/download/1108/669>. (in Thai)
- [13] M. Kiguchi, K. Takata, N. Hanasaki, B. Archevarahuprok, A. Champathong, E. Ikoma, C. Jaikaeo, S. Kaewrueng, S. Kanae and S. Kazama, “A review of climate-change impact and adaptation studies for the water sector in Thailand,” *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 2. 2021. Art. no. 023004, doi: 10.1088/1748-9326/abce80.
- [14] P. Nidhinarakoon and S. Ritphring, “Beach Tourism Carrying Capacity Assessment to Sea Level Rise Scenarios,” *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, vol. 21, no. 3, pp. 27–42, 2021. (in Thai)
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2013 The Physical Science Basis,” New York, NY, USA: Cambridge University Press, Rep. AR5, 2013.
- [16] Department of Marine and Coastal Resources, “The master plan of designing and observing for beach nourishment at Pattaya beach, Chonburi,” Department of Marine and Coastal Resources, Bangkok, Thailand, Final Rep, 2012. (in Thai)
- [17] Department of Marine and Coastal Resources, “The environmental impact assessment report and design for coastal protection project at Samila-Chalatat beach

- in Songkhla,” Department of Marine and Coastal Resources, Bangkok, Thailand, Final Rep, 2015. (in Thai)
- [18] Department of Marine and Coastal Resources, “The master plan of designing and observing for beach nourishment at Jomtien beach, Chonburi,” Department of Marine and Coastal Resources, Bangkok, Thailand, Final Rep, 2016. (in Thai)
- [19] V. C. Hoang, H. Tanaka and Y. Mitobe, “A method for correcting tidal effect on shoreline position extracted from image with unknown capture time,” *Geosciences*, vol. 7, no. 3, 2017, Art. no. 62, doi: 10.3390/geosciences7030062.
- [20] P. Nidhinarakoon and S. Ritphring, “Shoreline changes by using Google Earth images with tidal correction: a case study of Samui island, Thailand,” in *Proc. the 8th International Conference on Fluid Mechanics*, Sendai, Japan, Sep. 25–28, 2018, pp. 1–5.
- [21] P. Nidhinarakoon and S. Ritphring, “The comparative of shoreline detection methods,” *Proc. the 24 th National Convention on Civil Engineering*, Udonthani, Thailand, Jul. 10–12, 2019, pp. 2106–2113. (in Thai)
- [22] P. Bruun. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, vol. 88, no. 1, pp. 117–132, 1962, doi: 10.1061/JWHEAU.0000252.
- [23] R. J. Nicholls, W. A. Birkemeier and R. J. Hallermeier, “Application of the depth of closure concept,” *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 1, no. 25, pp. 3874–3887, 1996.
- [24] R. G. Dean, “Equilibrium beach Profiles: characteristics and applications,” *Journal of Coastal Research*, vol. 7, no. 1, pp. 53–84, 1991.
- [25] I. Takeda and T. Sunamura, “Formation and spacing of beach cusps,” *Coastal Engineering in Japan*, vol. 26, no. 1, pp. 121–135, 1983, doi: 10.1080/05785634.1983.11924363. (in Japanese).
- [26] T. Sunamura, “Coastal and beach changes by waves,” *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, vol. 4, no. 2, pp. 179–188, 1983. (in Japanese).

การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของการแตกร้าวและการเกิดการกัดกร่อนของสนิม โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับระบบเฝ้าระวังสะพาน

Comparative Analysis of the Effects of Cracking and Corrosion using Numerical Model for Bridge Monitoring System

พิชญะ ชัยรุ่งเรืองศรี^{1,*}, ณัฐดนัย สินสมุทรผดุง¹ และ กวิน สายประเสริฐกิจ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง
ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

²วิศวกรรมโยธา ระดับชำนาญการพิเศษ กรมทางหลวงชนบท ออสเตรเลีย บางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

Pitchaya Chairungruangsri^{1,*}, Natdanai Sinsamutpadung¹ and Kavin Saiprasertkit²

¹Department of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

²Civil Engineering, Senior Professional Level, Department of Rural Roads, Anusawari, Bang Khen, Bangkok, 10220,
Thailand

*Corresponding Author E-mail: 63601132@kmitl.ac.th

Received: Oct 26, 2022; **Revised:** Feb 23, 2023; **Accepted:** Feb 28, 2023

บทคัดย่อ

ระบบเฝ้าระวังสะพานถูกนำมาใช้เพื่อประเมินสภาพสะพานจากระยะไกลและช่วยลดภาระในการตรวจสอบ เมื่อสะพานคานเหล็กกล่องได้รับความเสียหายจากการแตกร้าวและการกัดกร่อน จึงมีระบบดังกล่าวเข้ามาช่วยประกอบด้วย เซนเซอร์วัดค่าการโก่งตัวและค่าความเครียดที่ใช้ตรวจสอบความเสียหายเหล่านี้ได้ ในงานวิจัยฉบับนี้มีการสร้างแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานด้วยแบบจำลองความเสียหายเชิงโครงสร้างในระดับต่างๆ ถูกนำมาจำลองในรูปแบบของรอยแตกบนแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปและการกัดกร่อนในคานเหล็ก จากนั้นจึงมีการจำลองโดยใช้น้ำหนักของรถบรรทุกมากระทำกับแบบจำลองสะพาน ผลลัพธ์ที่ได้ประกอบด้วยค่าการโก่งตัวและความเครียดที่ส่วนวิกฤตของสะพาน เป็นผลให้มีการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายและค่าการโก่งตัวและค่าความเครียด นอกจากนี้ ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจสอบสะพานที่เหมาะสมสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ผลการศึกษานี้

คำสำคัญ: ระบบการเฝ้าระวังของโครงสร้าง, แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป, สะพานคานเหล็กกล่อง, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, การแตกร้าว, การกัดกร่อน, ความเสียหายของสะพาน

Abstract

Bridge monitoring system can be used to remotely assess bridge conditions and reduce an inspection gap. Steel box girder bridges suffer from cracking and corrosion damage. A system consists of displacement and strain sensor can be used to monitor these damages. A finite element model of the bridge has been created. A various level of structural damage was introduced to the model in form of cracks in the RC deck, and corrosion in steel girders. Then, a conventional truck load

has been applied in the model. Thus, the severity of the damage can be observed based on the deflection and strain value at the critical section of the bridge. As a result, the relationship between damage level and monitoring deflection and strain index has been established. In addition, the proper location of bridge monitoring sensors can be determined by using the result of this study.

Keywords: Structural health monitoring, RC deck, Steel box girder bridge, Finite element model, Cracks, Corrosion, Bridge damage

1 บทนำ

สะพานเป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ที่สำคัญอย่างมากในการเชื่อมโยงระบบคมนาคม (Transportation network) ให้มีประสิทธิภาพ [1–3] ถูกสร้างขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางทางกายภาพ เช่น แหล่งน้ำ, หุบเขา หรือถนน [4] โดยตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันมีการพัฒนาทั้งรูปแบบของสะพาน วัสดุที่ใช้ และกระบวนการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมตามการใช้งาน และลักษณะภูมิประเทศที่สร้าง [5] แต่เมื่อเวลาผ่านไปสะพานก็เริ่มเสื่อมสภาพและชำรุดเสียหายไปตามระยะเวลาการใช้งาน ส่งผลให้ความแข็งแรงของตัวโครงสร้างลดต่ำลง ใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเป็นสิ่งที่จะต้องทำเป็นอย่างมาก และหากโครงสร้างได้รับการดูแลรักษาเป็นอย่างดีและต่อเนื่องสะพานก็จะสามารถใช้งานได้ดีและยืดอายุการใช้งานได้มากขึ้น [6],[7]

สำหรับการดูแลรักษาและการตรวจสอบสะพานนั้นจะใช้วิศวกรที่มีทักษะและประสบการณ์สูงมาทำการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในการตรวจสอบจะต้องใช้เวลา แรงงานวิศวกรมากและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในแต่ละครั้ง [6] รวมถึงความเสียหายบางประเภทนั้นวิศวกรก็ไม่สามารถจะตรวจสอบหรือมองเห็นได้ เช่น ความสึกของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากผิวสะพานลึกลงไปในโครงสร้าง ดังนั้น ระบบของคอมพิวเตอร์ที่มีความก้าวหน้า รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม จึงถูกนำมาช่วยให้การตรวจสอบและแก้ไขปัญหานั้นสามารถทำได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น [8],[9] นักวิจัยจึงมีการศึกษาค้นคว้าและให้ความสนใจในการพัฒนาความสามารถในการประเมินสภาพโครงสร้างอย่างมาก เพื่อยืดอายุการใช้งานและทำให้โครงสร้างใช้งานได้ได้อย่างปลอดภัย [10]

ระบบการเฝ้าระวังของโครงสร้าง (Structural health monitoring system; SHM) เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่องมือตรวจวัด (เช่น Strain gauge, Accelerometer, Inclinator) นำไปต่อยอดและบูรณาการให้สามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมจริงได้ [11],[12] โดยระบบดังกล่าวได้ถูกใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต ยานยนต์ และอวกาศมาหลายปีแล้ว [13] ในส่วนของระบบโครงสร้างโยธา นั้น ได้มีหลายประเทศทั้งสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น สหราชอาณาจักร และประเทศในแถบยุโรป พยายามที่จะนำระบบดังกล่าวมาใช้ โดยเจาะจงที่การใช้งานบนทางหลวงและสะพานที่มีช่วงยาว [13] ซึ่งหากนำมาใช้งานได้เป็นอย่างดีจะช่วยทำให้การประเมินสภาพของโครงสร้างนั้นทำได้อย่างรวดเร็ว เพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ช่วยแจ้งเตือนในจุดที่ชำรุดเสียหายได้ทันที และประเมินความปลอดภัยเพื่อการตัดสินใจในการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม [14] โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินสะพานจากค่าการโก่งตัวและความเครียดที่วัดได้ [15],[16] นำมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลอง โดยค่าที่ได้สามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของโครงสร้าง รวมถึงในงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเครื่องมือตรวจวัดมาใช้ร่วมกับระบบดังกล่าว ถึงแม้ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา ระบบการเฝ้าระวังของโครงสร้างจะมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ช่วยให้การดำเนินงานสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น [17] แต่การจะนำระบบดังกล่าวมาใช้ได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพนั้น ก็จำเป็นต้องจะต้องมีความเข้าใจโครงสร้างและแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายและคาดการณ์ผลที่เกิดขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การใช้ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ในตำแหน่งที่เหมาะสมนั้น ก็จำเป็นต้องจะต้องมีการคำนึงถึงขนาดและ

ทิศทางของโครงสร้างที่ถ่ายทอดไปยังอุปกรณ์ การรักษาความสามารถในการวัดค่าต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่ต้องการ ซึ่งหากวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลเสียถึงค่าที่ได้จากการวัดที่ไม่ถูกต้อง ทำให้การวิเคราะห์ผลอาจผิดพลาด

ในปัจจุบันมีรูปแบบของสะพานให้เลือกใช้มากมาย เช่น สะพานแบบ โค้ง (Arch bridge), สะพานแบบคาน (Beam bridge), สะพานแบบ โครง (Truss bridge), สะพานแขวน (Suspension bridge) ตามความเหมาะสม และลักษณะภูมิประเทศที่ใช้งาน [4] โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้รูปแบบของสะพานคานเหล็กกล่อง (Steel box girder bridge) มาทำการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นรูปแบบของสะพานที่ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากการทำก่อสร้างและบำรุงรักษาได้ง่าย เหมาะกับโครงการที่มีช่วงยาวและมีแนวโค้ง [8],[18],[19] ในส่วนของหน้าตัดของคานกล่องนั้น มีหลายรูปแบบ โดยส่วนใหญ่แบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมคางหมูจะถูกเลือกมาใช้งานมากที่สุด [20] และจำนวนของคานกล่องนั้นอาจเป็นแบบกล่องเดี่ยว (One box) แบบหลายกล่อง (Separate boxes) หรือแบบหลายกล่องต่อเนื่องกัน (Continuous cells) ขึ้นอยู่กับความกว้าง ความยาวของช่วงและน้ำหนักบรรทุก [21–23]

ในส่วนของความเสียหายนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อสะพานถูกใช้งานไป โดยทั่วไปสะพานคานเหล็กกล่องจะพบความเสียหายประเภทการแตกร้าว (Cracking) และการกัดกร่อนของสนิม (Corrosion) ในคานเหล็ก โดยการแตกร้าวอาจเกิดจากโครงสร้างถูกใช้งานในระยะเวลาานานหรือเกิดจากการหดตัวของแผ่นพื้นทางคอนกรีต (Concrete shrinkage) และการรับแรงดึงของคอนกรีต (Concrete tension strength) ซึ่งเป็นสาเหตุทั่วไปที่พบได้ [24] หรืออาจเกิดจากสาเหตุทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดความเสียหาย เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature changes), การเปลี่ยนรูปร่างของพื้น (Ground deformation) [25] ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นอาจสามารถซ่อมแซมบำรุงรักษาได้ แต่บางกรณีอาจซ่อมแซมได้ยากหรือไม่ได้เลย และกรณีที่เลวร้ายที่สุดคือการวิบัติของโครงสร้าง จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษา วิเคราะห์เกี่ยวกับความเสียหายดังกล่าว ในส่วนของความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนของสนิมในคานเหล็กนั้น โดยทั่วไปเกิดจากกระบวนการทางเคมี

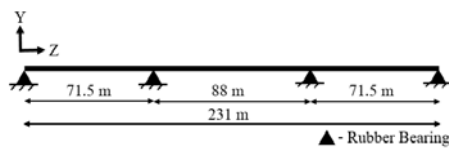
และไฟฟ้าระหว่างเหล็กและสภาพแวดล้อม ตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ อาจมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ [26] หรืออีกตัวอย่าง คือ การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนอกชายฝั่ง จะเกิดการกัดกร่อนที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโครงสร้าง เช่น โครงสร้างที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินจะเกิดอัตราการกัดกร่อน 0.06–0.10 มิลลิเมตรต่อปี โครงสร้างที่อยู่ในบริเวณเปียก (Splash zone) จะเกิดอัตราการกัดกร่อน 0.20–0.40 มิลลิเมตรต่อปี โครงสร้างที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Zone) นอกชายฝั่ง จะเกิดอัตราการกัดกร่อน 0.050–0.075 มิลลิเมตรต่อปี เป็นต้น [27] ในส่วนของวัสดุโลหะในแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันของธาตุทางเคมีที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อน ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิมจะสร้างชั้นออกไซด์ป้องกันที่พื้นผิว ในขณะที่เหล็กกล้าอัลลอยด์ต่ำจะมีความไวต่อการกัดกร่อน [27],[28] ทำให้การกัดกร่อนของสนิมมีความซับซ้อนมาก ซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนส่งผลต่อพฤติกรรมและกระบวนการในการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน

ในการศึกษานี้ได้นำเอาสะพานคานเหล็กกล่อง (Steel box girder bridge) ที่มีส่วนประกอบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Deck) มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยทำการจำลองรูปแบบการเกิดรอยแตกในแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก และการจำลองการเกิดสนิมในคานเหล็ก จากนั้นจะทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานและจำลองรูปแบบความเสียหายดังกล่าวเพื่อแสดงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสะพาน โดยนำค่าการโก่งตัว (Deflection) และค่าความเครียด (Strain) ที่บริเวณใต้แผ่นพื้นสะพานมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาการติดตั้งเกจวัดความเครียดที่เหมาะสม

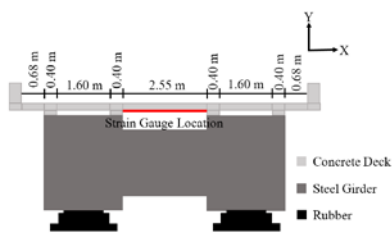
2 ลักษณะสะพาน (Target Bridge)

สะพานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีลักษณะเป็น สะพานคานเหล็กกล่อง (Steel box girder bridge) ประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Deck) หนา 220 มิลลิเมตร และคานที่ถูกออกแบบเป็นคานเหล็กแบบไม่ประกอบ (Non-composited girder) สะพานแบ่งความยาวออกเป็น 3 ช่วงต่อเนื่องกัน ประกอบด้วยช่วงด้านข้าง

ทั้ง 2 ฟันยาว 71.5 เมตรและช่วงตรงกลางยาว 88 เมตร สะพานที่นำมาใช้ ได้ถูกออกแบบและอ้างอิงระยะช่วง สะพานจากมาตรฐาน AASHTO [29],[30] และการศึกษา ก่อนหน้า [31] ดังแสดงในรูปที่ 1 ในส่วนของการติดตั้ง เภววัดความเครียดจะติดตั้งที่บริเวณใต้พื้นผิวของสะพาน ในช่วงกึ่งกลางของแผ่นพื้นดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากใน การศึกษาก่อนหน้าพบรอยแตกร้าวในบริเวณดังกล่าว และ มีค่าการ โกงตัวที่สูง [31] รวมถึงการติดตั้งเภววัด ความเครียดสามารถทำได้ง่ายที่สุด ณ บริเวณดังกล่าว



รูปที่ 1 มุมมองด้านข้างของลักษณะสะพาน



รูปที่ 2 หน้าตัดของลักษณะสะพาน

3 แบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model)

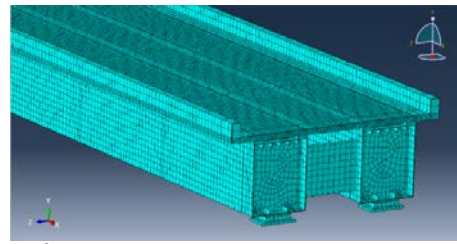
3.1 รายละเอียดสะพาน (Bridge details)

สะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์ถูกจำลองขึ้นในรูปแบบของ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE Model) โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [32] วิธีการสร้างแบบจำลองจะทำการขึ้นชิ้นส่วน ของโครงสร้างของสะพานทีละชิ้นส่วน ประกอบด้วยแผ่นพื้น คอนกรีตเสริมเหล็ก และฐานยางรองคอสสะพาน (Rubber bearing) โดยถูกจำลองเป็นรูปแบบทรงตัน (Solid) และคาน เหล็ก ซึ่งถูกจำลองในรูปแบบแผ่นเปลือก (Shell) นำมา ประกอบกันเป็นแบบจำลองสะพานดังแสดงในรูปที่ 3

3.2 คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)

คุณสมบัติของวัสดุได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยที่ คอนกรีตและเหล็กเป็นค่าที่ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน ในส่วน ของฐานรองคอสสะพาน จะคำนวณโดยใช้สมการการ ประมาณค่า (Estimate equation) โดยที่ฐานรองคอสสะพาน

ตัวริม (Abutment) และตัวใน (Pier) นั้นมีขนาดที่ไม่เท่ากัน จึงมีการคำนวณที่ต่างกันของทั้ง 2 แบบ [31],[32]



รูปที่ 3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพาน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุ

Index	Material	Young's Modulus
1	Concrete	28 GPa
2	Steel	200 GPa
3	Abutment bearing rubber	54.14 MPa
4	Pier bearing rubber	60.14 MPa

3.3 การจำลองความเสียหาย

3.3.1 การจำลองรอยแตก (Crack modeling)

การใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นสามารถนำมาใช้ในการ จำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุได้ โดยมีงานวิจัยที่ได้ ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขในการปรับแก้ค่าของวัสดุ เพื่อ จำลองความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ เช่น การ ลดกำลังของลวดรับแรงอัดในคอนกรีต [33] โดยในการศึกษานี้ จากการสำรวจ ณ สถานที่จริง พบว่า สะพานมีรอยร้าวที่แผ่นพื้นคอนกรีตสะพานเป็นสาเหตุ หลัก โดยทางผู้วิจัยมีแนวคิดว่า รอยร้าวของแผ่นพื้น คอนกรีตไม่ได้รับแรงในทิศทางแนวดิ่งและแนวขวาง เนื่องจากได้แตกร้าวไปแล้ว โดยที่ยังเหลือกำลังในทางแน วยาวเนื่องจากเหล็กเสริมในแผ่นพื้นที่ยังเชื่อมติดกันอยู่ เพื่อให้ใช้แนวคิดดังกล่าวได้ในทางปฏิบัติของการสร้าง แบบจำลอง จึงได้เลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุประเภท Orthotropic elasticity จำลองลงในชิ้นส่วนที่จะทำให้เกิด ความเสียหาย [32] เพื่อระบุพฤติกรรมดังกล่าวในแต่ละ ทิศทางดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยการระบุคุณสมบัติของวัสดุ ดังกล่าวตามแนวรอยร้าวร่วมกับการใส่ปริมาณรอยร้าวใน ปริมาณที่ต่างกัน จะทำให้แบบจำลองสะพานสามารถ

จำลองความเสียหายของสะพานในระดับที่แตกต่างกันได้ ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายในระดับต่าง ๆ กับดัชนีชี้วัดจากเซนเซอร์ ที่ได้จากระบบเฝ้าระวังสะพานได้

รูปแบบรอยแตกที่นำมาศึกษาและทำการจำลองในสะพาน ได้แก่ รอยแตกตามขวาง (T-crack), รอยแตกตามยาว (L-crack) และรอยแตกแบบผสม (TL-crack) โดยการจำลองรอยแตกเหล่านี้สามารถทำได้โดยการลดค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุลง [31] โดยคุณสมบัติของออร์โธโทโรปิกได้แสดงไว้ในสมการที่ (1) และ (2) ประกอบด้วยค่าความเค้น (σ), ความเครียด (ϵ), ความเครียดเฉือน (γ), โมดูลัสของยัง (E), โมดูลัสของแรงเฉือน (G) และอัตราส่วนปัวซอง (ν) ส่วนการจำลองรูปแบบรอยแตกแสดงไว้ในรูปที่ 4 และคุณสมบัติออร์โธโทโรปิกแต่ละแบบแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติออร์โธโทโรปิกของรอยแตก

Index	Case	Young's Modulus		
		E_{xx}	E_{yy}	E_{zz}
1	 T-element	5 GPa	1 GPa	1 GPa
2	 L-element	1 GPa	5 GPa	1 GPa
3	 TL-element	1 GPa	1 GPa	1 GPa

3.3.2 การจำลองการกัดกร่อนของสนิม (Corrosion modeling)

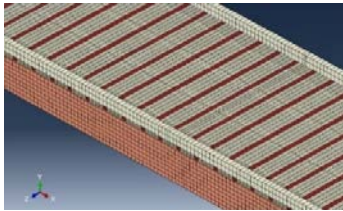
เหล็กนั้นถูกนำมาใช้ในงาน โครงสร้างทางวิศวกรรมค่อนข้างมาก เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำและมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี [26] แต่เมื่อถูกนำมาใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการกัดกร่อนของเหล็ก ซึ่งจะส่งผลกับอายุการใช้งานรวมถึงการเกิดการกัดกร่อนนั้นก็จะใช้เวลาที่ต่างกัน สภาพแวดล้อม และตำแหน่งที่ต่างกัน [34] มีงานวิจัยที่ได้ทำการวัดค่าความหนาของการเกิดการกัดกร่อนของสนิมในตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน โดยได้เลือกสะพานทั้ง 8 แห่งที่ตั้งอยู่ในสถานที่ต่าง ๆ มาวิเคราะห์ โดยพบว่าตำแหน่งของสนิมที่เกิดจะพบมากในบริเวณพื้นผิวด้านบนส่วนนอกของปีกล่างของคาน (Upper outer surface of bottom flange) แต่ค่าการกัดกร่อนนั้นแตกต่างกัน

กัน เช่น สะพานที่มีอายุ 30 ปี มีค่าการกัดกร่อน 0.2 มิลลิเมตร ในขณะที่สะพานอีกตัวอย่างมีอายุเพียง 15 ปี แต่มีค่าการกัดกร่อนที่ 0.27 มิลลิเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของสะพานนั่นเอง [35] อีกงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม ได้ทำการวัดค่าการกัดกร่อนของสนิมในตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น 1 ปี และ 3 ปี ซึ่งในงานวิจัยแรกพบว่าค่าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสูงสุดประมาณ 0.019 และ 0.034 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในบริเวณพื้นผิวด้านบนส่วนนอกของปีกล่างของคานซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับงานวิจัยแรกที่ได้ทำการศึกษา [28],[34] และอีกหนึ่งงานวิจัยได้ค่าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสูงสุด 0.035 และ 0.042 มิลลิเมตรตามลำดับ ในบริเวณเดียวกัน [36],[37] อีกงานวิจัยที่น่าสนใจ เป็นงานวิจัยที่ทำให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมของพื้นที่นั้นที่ส่งผลกับการกัดกร่อนของสนิมอย่างชัดเจน โดยได้ทำการวัดค่าการกัดกร่อนของสนิม ของสะพาน 2 แห่ง โดยสะพานมีอายุ 47 ปี และมีค่าการกัดกร่อนอยู่ที่ 1.21 และ 1.23 มิลลิเมตร โดยในงานวิจัยนี้พบว่า ในช่วง 10 ปีแรก พบว่าค่า SO_2 ในชั้นบรรยากาศค่อนข้างสูง ทำให้เกิดค่าการกัดกร่อนค่อนข้างมากในปี 1970–1980 แต่หลังจากนั้นได้มีมาตรการควบคุมมลพิษในอากาศทำให้ SO_2 ในชั้นบรรยากาศลดลงค่าการกัดกร่อนจึงลดลงตามไปด้วย [38]

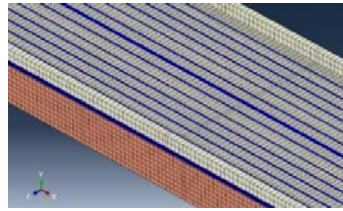
จากตัวอย่างงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา จะสังเกตได้ว่ามีปัจจัยหลายอย่างทั้งสภาพแวดล้อม สถานที่ตั้ง ความชื้นที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนของโครงสร้าง และค่าการกัดกร่อนของสนิมที่ได้นั้นแตกต่างกัน ซึ่งหากจะพิจารณานำมาใช้ในการวิเคราะห์ในแบบจำลองนั้นทำได้ยาก จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมและพบงานวิจัยที่พูดถึงระยะเวลาที่การกัดกร่อนของสนิมในเหล็กนั้นเริ่มส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของสะพาน โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งช่วงเวลาการกัดกร่อนออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอายุของวัสดุที่ใช้ในการเคลือบเหล็กในการป้องกันการกัดกร่อน และช่วงของอายุการใช้งานของเหล็กที่เหลืออยู่ รวมถึงระดับการกัดกร่อน 3 ระดับซึ่งพิจารณาตามสภาพแวดล้อม (สูง กลาง ต่ำ) โดยอัตราการกัดกร่อนในช่วง 10–15 ปีแรกนั้นจะถือว่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาก่อนที่วัสดุเคลือบป้องกันการกัดกร่อนนั้นจะเสื่อมสภาพ และสันนิษฐานว่าการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นทันทีหลังจากนั้น [39–41]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

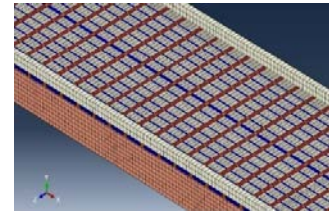
$$G_{ij} = \frac{\sqrt{E_i E_j}}{2(1+\nu)} \quad (2)$$



(ก)



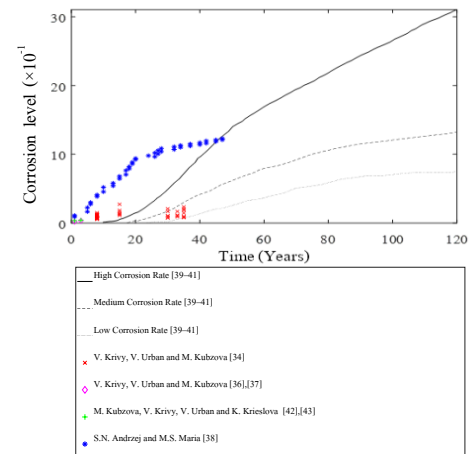
(ข)



(ค)

รูปที่ 4 รูปแบบรอยแตก (ก) รอยแตกตามขวาง (ข) รอยแตกตามยาว (ค) รอยแตกแบบผสม

จากงานวิจัยที่ศึกษามาข้างต้นทั้งหมด หากนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการศึกษานี้แสดงในรูปที่ 5 โดยค่าการกัดกร่อนที่ทำการศึกษามาจากการศึกษาของ V. Krivy และคณะ [34] จะพบว่าค่าการกัดกร่อนนั้นแตกต่างกัน ส่วนหนึ่งเกิดจากตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน เช่น ตัวสะพานที่ตั้งอยู่ในชุมชนที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนต่ำถึงปานกลาง หรือสะพานที่ติดตั้งใกล้ชายฝั่งที่ส่งผลให้ค่าการกัดกร่อนในช่วงแรกมีอัตราที่สูง ซึ่งค่าที่ได้ยังถือว่าใกล้เคียงและอยู่ในเกณฑ์กับอัตราการกัดกร่อนที่ศึกษามา อีกสองงานวิจัยที่ได้ค่าการกัดกร่อนใกล้เคียงกันของการศึกษาของ V. Krivy และคณะ [36],[37] และ M. Kubzova และคณะ [42],[43] จะพบว่าค่าการกัดกร่อนมีค่าน้อยมากในช่วง 3 ปีที่ทำการวิจัย ซึ่งสอดคล้องกับกราฟอัตราการกัดกร่อนที่ให้ช่วง 10–15 ปีแรกเป็นศูนย์ เนื่องจากมีการกัดกร่อนที่ส่งผลต่อเหล็กที่น้อยมาก และการศึกษาของ S. N. Andrzej และ M. S. Maria [38] ในงานวิจัยนี้ได้บันทึกค่าการกัดกร่อนในระยะยาวแต่จะเห็นได้ชัดว่าค่าการกัดกร่อนในช่วงแรกมีค่าการกัดกร่อนที่สูงเนื่องจากมีค่า SO_2 ในชั้นบรรยากาศค่อนข้างมากดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่หลังจากที่มีการควบคุมจะพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของการกัดกร่อนนั้นจะสอดคล้องกับกราฟอัตราการกัดกร่อนระดับกลาง จึงเลือกใช้กราฟอัตราการกัดกร่อนที่ศึกษามาใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5 กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อน

โดยในแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะทำการจำลองการกัดกร่อนในลักษณะนี้ลงไป โดยการลดค่าความหนาของคานเหล็ก และสมมติให้เกิดการกัดกร่อนเท่ากันตลอดทั้งชิ้นส่วน ด้วยอัตราการกัดกร่อนสูงสุดในช่วงเวลา 20, 30 และ 40 ปี มีปริมาณสนิมที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3 [39–41]

ตารางที่ 3 อัตราการกัดกร่อน

Index	Corrosion level (mm)	Time (Years)
1	0.2	20
2	0.5	30
3	1	40

3.4 รูปแบบของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ (Loading conditions)

น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้างสะพาน ได้เลือกใช้น้ำหนักบรรทุก 6 ล้อ (Truck load) โดยน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน HL-93 ซึ่งมีน้ำหนักอยู่ที่ 33.13 ตัน หรือ 325 กิโลนิวตัน [29],[30] ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำจะกระจายตามตำแหน่งของล้อ ดังแสดงในรูปที่ 6 แต่เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงทำการแบ่งให้น้ำหนักของรถบรรทุกกระทำออกเป็น น้ำหนักบรรทุกแบบจุดทั้งหมด 6 แรงตามแนวแกน X และกระทำในช่วงกึ่งกลางของสะพาน มีน้ำหนักอยู่ที่ 54.2 กิโลนิวตันต่อ 1 แรง โดยลงตามตำแหน่งของระยะห่างระหว่างล้ออยู่ที่ 6 ฟุต หรือ 1.8 เมตร [29] และขนาดความหนาของล้อยอดซึ่งมีขนาดอยู่ที่

ที่ 250 มิลลิเมตร [44] และทำการใส่น้ำหนักบรรทุก 2 กรณี ได้แก่ การใส่น้ำหนักบรรทุกบริเวณ กึ่งกลาง (Center) ของความกว้างสะพาน และการใส่น้ำหนักบรรทุกบนช่องจราจรของถนน (On-Lane) ดังแสดงในรูปที่ 7 และตารางแสดงการวิเคราะห์ (Analytical configurations) แสดงไว้ในตารางที่ 4 ประกอบด้วยการจำลองรอยแตกกว้างในแนวต่าง ๆ ทั้ง 3 แบบ การลงน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางและบนช่องจราจร และการจำลองการกัดกร่อนของสนิม ตัวอย่างเช่น 1T-1L-OL-30Y หมายถึง กรณีใส่น้ำหนักบรรทุกบนช่องจราจร โดยได้รับความเสียหายจากรอยแตกตามขวางและรอยแตกตามยาวทุก ๆ 1 เมตร และได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อนของสนิม 30 ปี ตารางที่ 4 ตารางแสดงการวิเคราะห์

ตารางที่ 4 ตารางแสดงการวิเคราะห์

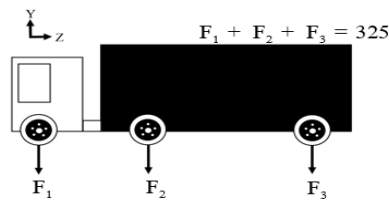
Index	Case	Pattern	Loading location	Rate of corrosion
1-8	No-crack	No Crack	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
9-16	1.0T	Transverse (T)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
17-24	0.5T	Transverse (T)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
25-32	0.25T	Transverse (T)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
33-40	1L	Longitudinal (L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
41-48	0.5L	Longitudinal (L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
49-56	0.25L	Longitudinal (L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
57-64	1T-1L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
65-72	1T-0.5L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
73-80	1T-0.25L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
74-88	0.5T-1L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
89-96	0.5T-0.5L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
97-104	0.5T-0.25L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
105-112	0.25T-1L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
113-120	0.25T-0.5L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years
121-128	0.25T-0.25L	Combined (T-L)	Center (C) / On lane (OL)	0 / 20 / 30 / 40 Years

4 ผลการวิเคราะห์

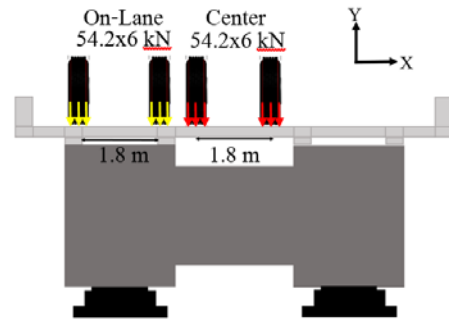
ตำแหน่งที่นำค่ามาใช้ในการวิเคราะห์ คือ บริเวณใต้พื้นผิวของความกว้างของแผ่นพื้น (เส้นสีแดง) ดังแสดงใน

รูปที่ 8 โดยที่ผลของการวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวได้นำผลออกมาเป็นโหนด (Node) ตลอดช่วงความกว้างสะพานแสดงในรูปที่ 8(ก) ในขณะที่ค่าความเครียดได้นำผลออกมาเป็น

ชั้นส่วน (Element) เฉพาะตำแหน่งติดแถวความเครียดแสดง
ในรูปที่ 8(ข)



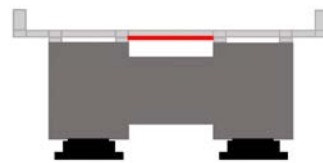
รูปที่ 6 แสดงภาพจำลองรถบรรทุก 6 ล้อตามมาตรฐาน HL-93



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ตำแหน่งที่นำผลมาวิเคราะห์ (เส้นสีแดง) (ก) ตำแหน่งของค่าโก่งตัว (ข) ตำแหน่งของค่าการโก่งตัว

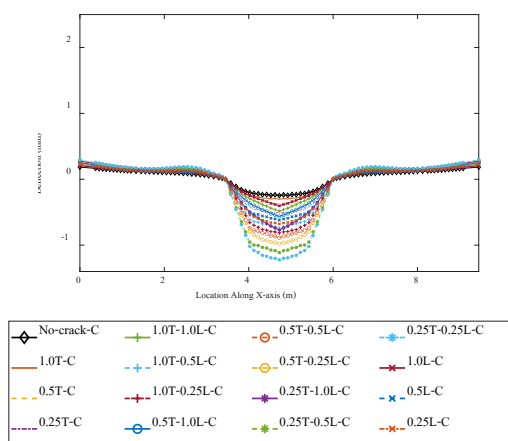
4.1 การโก่งตัว (Deflection)

ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากสะพานมีความเสียหายเนื่องจากการแตกร้าวที่มาก ค่าการโก่งตัวก็จะมากตามไปด้วยเช่นกัน รวมถึงการใสน้ำหนักบรรทุกลงที่บริเวณกึ่งกลางจะสามารถสังเกตความแตกต่างของการโก่งตัวแต่ละระดับและแยกแยะความเสียหายได้ชัดเจนกว่าการใสน้ำหนักบรรทุกบนช่องจราจรของถนน ในส่วนของการเพิ่มความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อน จะพบว่าความแตกต่างนั้นน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าความเสียหายจากการกัดกร่อนส่งผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยกว่าการแตกร้าว แสดงในรูปที่ 10 โดยที่การเพิ่มขึ้นของค่าการโก่งตัวสูงสุดในกรณี No-crack-C-40Y เพิ่มขึ้นเพียง 1.14% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อนในส่วนของการเพิ่มความเสียหายจากการแตกร้าวร่วมกับการกัดกร่อนพบว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์นั้นเหมือนกันกับรูปที่ 9 เพียงแต่มีค่าการโก่งตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากค่าการกัดกร่อน เช่น กรณี 0.25T-0.25L-C เทียบกับกรณี 0.25T-0.25L-C -40Y มีการเพิ่มขึ้นเพียง 0.74% แต่เนื่องจากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 10 นั้นมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งอาจเกิดจากค่าที่นำมาวิเคราะห์เป็นค่าที่ได้จากบริเวณใต้แผ่นพื้นสะพานที่มีความ

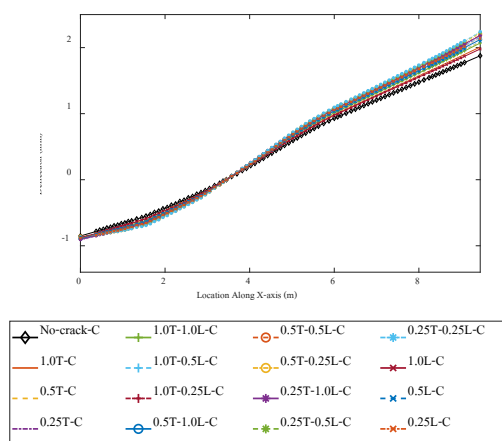
เสียหายหลักเกิดจากรอยแตกร้าว ส่งผลให้ความเสียหายที่เกิดจากการแตกร้าวนั้นมีผลมากกว่าการกัดกร่อนของสนิม จึงได้ทำการนำค่าจากส่วนบนของคานเหล็ก ซึ่งได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อนของสนิมโดยตรง แสดงในรูปที่ 11 และทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ในแต่ละกรณีอีกครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ในรูปที่ 12 ว่าแนวโน้มของกราฟยังคงเหมือนเดิม แต่เมื่อนำมาคำนวณหาร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ส่วนบนของคานเหล็กจะพบว่ามีความน้อยกว่าอย่างมาก เมื่อเทียบกับการนำค่าจากแผ่นพื้นมาวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น กรณี IT-IL-C ร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ได้แผ่นพื้นคอนกรีตอยู่ที่ 64.34% ในขณะที่ผิวบนของคานเหล็กอยู่ที่ 11.92% เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่นำมาวิเคราะห์หากได้รับความเสียหายโดยตรง จะส่งผลให้ค่าการโก่งตัวนั้นเพิ่มขึ้นสูงกว่าตำแหน่งที่ไม่ได้รับความเสียหายโดยตรง อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ใช้ตั้งเกณฑ์สำหรับระดับความเสียหายของสะพาน เมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบกรณีที่มีรถวิ่งผ่านเพียงคันเดียวหรือการทดสอบรถบรรทุก (Testing truck) ก็สามารถนำค่าจากระบบเฝ้าระวังในขณะนั้นเข้ามาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในการศึกษา นี้ได้นอกจากนี้การประยุกต์ข้อมูลจากการศึกษานี้ในการใช้

งานจริง จะต้องมีการปรับแก้ เกณฑ์สำหรับระดับความเสียหายของสะพานอื่น ๆ ตามรูปแบบและลักษณะของสะพานเพื่อทำการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากการกีดกร่อนของสันนิษว่ามีผลเล็กน้อยเพียงใด จึงทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เช่นเดียวกับรูปที่ 10 แต่ทำการนำค่าบริเวณผิวบนของคาน (รูปที่ 11) มาทำการวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 13 และเมื่อนำมาคำนวณหาร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าการโก่งตัวจะพบว่ามีความเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าที่ได้จากใต้แผ่นพื้นมากถึง 76.5% ซึ่งช่วยยืนยันได้ว่าตำแหน่งที่ใช้ในการนำมาวิเคราะห์นั้นมีผล แต่หากพิจารณาความเสียหายที่ส่งผลให้เกิดการโก่งตัวสูง ยังคงพบว่าการเกิดการแตกร้าวยังส่งผลกับการโก่งตัวมากกว่าการเกิดการกีดกร่อนจากสันนิษแต่ในระบบการเฝ้าระวังของโครงสร้างนั้นการใช้ เกจวัด

ความเครียดเป็นตัวประเมินผลยังถือว่าทำได้ง่ายกว่าการประเมินโดยใช้เครื่องมือวัดค่าการโก่งตัว เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวมีการใช้งานที่ทำให้ยุ่งยากกว่า และเครื่องมืออาจมีความเสียหายและหลุดได้หากเกิดภัยธรรมชาติที่รุนแรง เช่น แผ่นดินไหว ซึ่งต่างจากเกจวัดความเครียดที่ติดตั้งกับตัวป้องกันอุปกรณ์ เช่น อีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่า อีกทั้งในส่วนของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจริง หลังจากเกิดการแตกร้าวจะส่งผลทำให้ค่าการหดตัวนั้นลดลง ดังนั้นการจำลองค่าวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการลดค่าการหดตัวลง จึงสอดคล้องกับพฤติกรรมดังกล่าว ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดในการปรับแก้ตามความเหมาะสมของลักษณะสะพานในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้

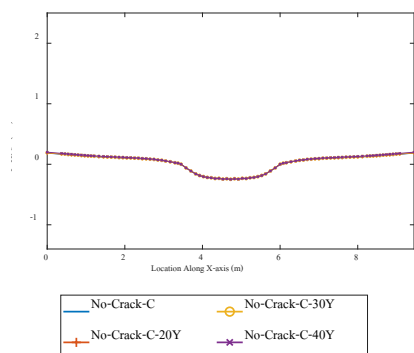


(ก)

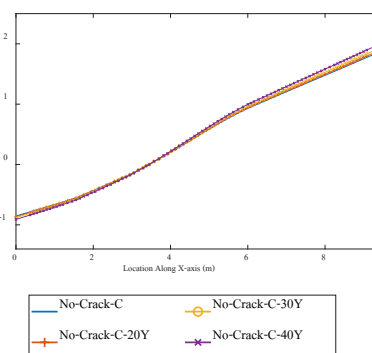


(ข)

รูปที่ 9 ค่าการ โก่งตัวใต้แผ่นพื้นจากการจำลองรอยแตก (ก) น้ำหนักบรรทุกบริเวณกึ่งกลาง (ข) น้ำหนักบรรทุกบนเลน

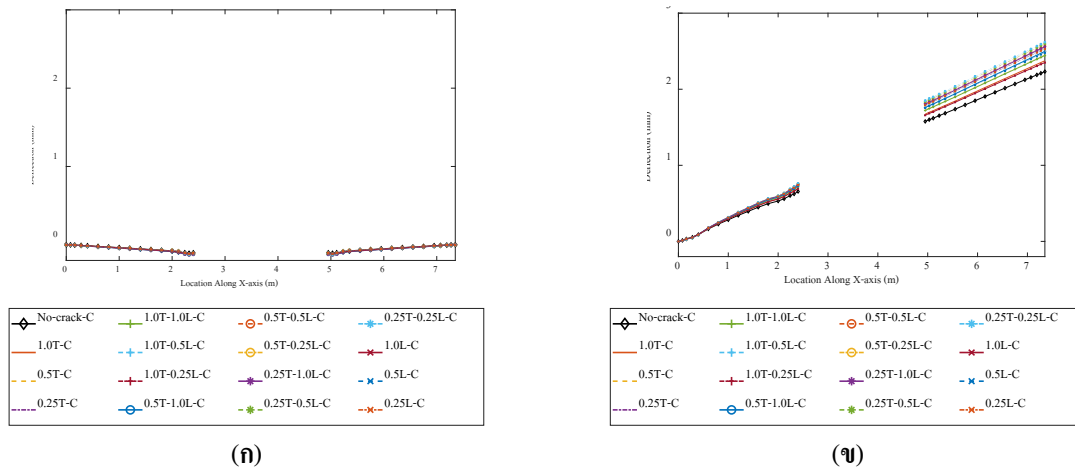
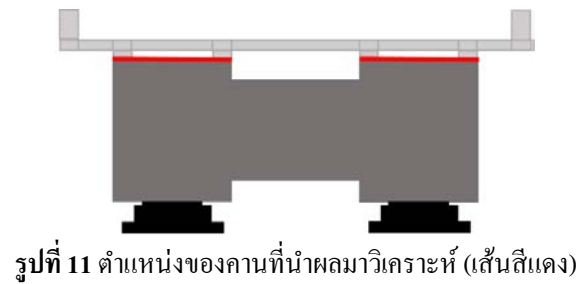


(ก)

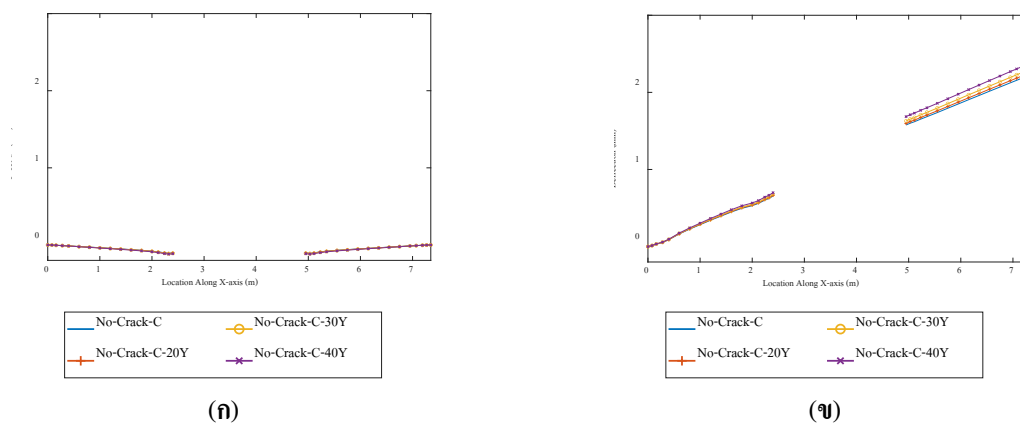


(ข)

รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่าการ โก่งตัวใต้แผ่นพื้นจากการจำลองการกีดกร่อนของสันนิษ (ก) น้ำหนักบรรทุกบริเวณกึ่งกลาง (ข) น้ำหนักบรรทุกบนเลน



รูปที่ 12 ค่าการโก่งตัวบนผิวของคานจากการจำลองรอยแตก (ก) น้ำหนักบรรทุกบริเวณกึ่งกลาง (ข) น้ำหนักบรรทุกบนเลน



รูปที่ 13 เปรียบเทียบค่าการโก่งตัวบนผิวของคานจากการจำลองการกักตัวของสนิม (ก) น้ำหนักบรรทุกบริเวณกึ่งกลาง (ข) น้ำหนักบรรทุกบนเลน

4.2 ความเครียด (Strain)

จากการวิเคราะห์ค่าความโก่งตัวเมื่อหัวข้อที่แล้ว พบว่าความเสียหายที่ได้รับจากการแตกร้าวนั้นมีผลมากกว่าความเสียหายเนื่องจากการกักตัวของสนิม ค่าความเครียดที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินความรุนแรงของความเสียหายจึงเลือกจากบริเวณใต้แผ่นพื้นตรงกลางของความกว้างสะพาน เนื่องจากได้รับผลโดยตรงจากความเสียหาย โดยพบว่าค่า

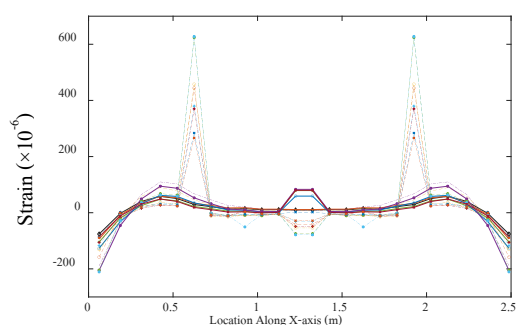
ความเครียดที่ได้จากการใส่น้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางสะพานนั้นยังคงมีค่าที่สูงกว่าการใส่น้ำหนักบรรทุกลงบนช่องจราจร ดังแสดงในรูปที่ 14

ในส่วนของการเพิ่มความเสียหายที่เกิดจากการกักตัวของสนิมได้ทำการคำนวณเทียบออกมาเป็นร้อยละ ซึ่งพบว่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดนั้นค่อนข้างมากหากตัวโครงสร้างได้รับความเสียหายจากการจำลองรอยแตก ตัวอย่างเช่น กรณี

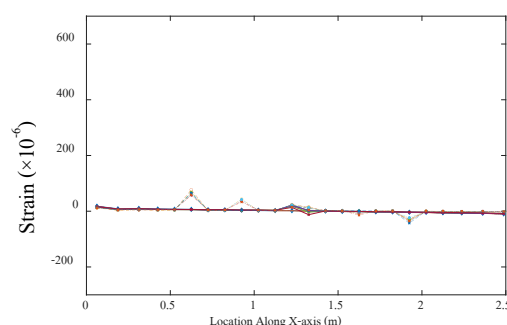
1.0T หากได้รับความเสียหายจากการแตกร้าวรอยแตกการเพิ่มค่าความเครียดเมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้รับความเสียหายใดๆ จะเพิ่มขึ้น 1.09% แต่เพิ่มขึ้นน้อยเมื่อได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อน โดยที่ความเสียหายจากการกัดกร่อนที่ 20, 30 และ 40 ปี จะเพิ่มขึ้น 0.18%, 0.46% และ 0.96% ตามลำดับ และจะเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 15 ว่าความเสียหายจากการกัดกร่อนส่งผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยกว่าการจำลองรอยแตกเช่นเดียวกับค่าการโก่งตัวที่วิเคราะห์ได้ และเมื่อนำมาคำนวณเป็นร้อยละ จะพบว่าถึงแม้ตัวสะพานจะเกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนไปถึง 40 ปี แต่ก็ยังส่งผลให้ค่าความเครียดนั้นเพิ่มขึ้นเพียง 0.96% เท่านั้น ถึงแม้ว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้ทั้งจากค่าการโก่งตัว หรือค่าความเครียดนั้น ความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนจะมีผลกระทบน้อยกว่าความเสียหายจากการแตกร้าวทั้งหมด แม้จะนำค่าจากบริเวณที่รับความเสียหายโดยตรงมาวิเคราะห์แล้วก็ตาม แต่อีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ผลการวิเคราะห์ออกมาในลักษณะนี้ อาจเกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับแผ่นพื้นโดยตรงด้วย ซึ่งหากนำน้ำหนักบรรทุกนั้นย้ายไปกระทำกับคานเหล็กที่รับความเสียหายจากการกัดกร่อน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะออกมาในอีกลักษณะหนึ่งแต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง น้ำหนักบรรทุกนั้นยังคงกระทำกับพื้นโดยตรงอยู่ ความเสียหายจากรอยแตกร้าวจึงยังส่งผลมากกว่า แต่ความเสียหายจากการกัดกร่อนก็ไม่ควรที่จะมองข้ามไปด้วยเช่นกัน เพราะความเสียหายนั้นก็ยังส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นลดต่ำลงเช่นกันนอกจากนี้ค่า

ความเครียดยังสามารถนำมาใช้คำนวณเพื่อตรวจสอบว่าสะพานที่ออกแบบนั้นมีความปลอดภัยตามมาตรฐานการออกแบบหรือไม่ โดยการนำเอาค่าความเครียดจากการวิเคราะห์แต่ละจุดมาหาค่าความเค้น(Stress) และนำไปเทียบกับค่าความเค้นที่ยอมรับได้ (Stress allowable) โดยค่าความเค้นที่ยอมรับได้ของคอนกรีต อยู่ที่ 12.96 MPa และเหล็กอยู่ที่ 141.22 MPa หากค่าความเค้นในแต่ละจุดมีค่าเกินกว่าค่าความเค้นที่ยอมรับได้ แสดงว่าสะพานนั้นไม่ปลอดภัยตามมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งจากการคำนวณในแต่ละกรณีพบว่า แผ่นพื้นคอนกรีตกรณี 0.25T-0.5L และ 0.25T-0.25L มีค่า Stress ที่เกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ เช่นกรณี 0.25T-0.25L-40Y ได้ค่าความเค้นที่ 17.7 MPa ซึ่งเกินค่าความเค้นที่ยอมรับได้ที่ 12.96 MPa ส่วนการกัดกร่อนของคานสะพานเหล็กกล่องนั้นไม่มีกรณีใดที่มีค่าเกิน

การพิจารณาดำเนินการติดตั้งแถวความเครียดนั้น จะพิจารณาการติดตั้งที่ตำแหน่งที่มีค่าความเครียดสูง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบค่าความเครียดสูงในตำแหน่ง 0.475, 1.275, 1.375 และ 2.175 เมตร จึงเลือกทำการติดตั้งแถวความเครียด 5 ตัว ทุก ๆ L/5 โดยที่ L คือ ความกว้างของตำแหน่งที่พิจารณาติดตั้งแถวความเครียดในรูปที่ 2 ซึ่งก็คือทุก ๆ 0.5 เมตร แต่การพิจารณาการติดตั้งดังกล่าวได้ทำการพิจารณาตามผลการวิเคราะห์ที่ได้เท่านั้นและอาจมีตำแหน่งอื่น ๆ เพิ่มเติมที่เหมาะสมในการติดตั้งซึ่งอาจมีการศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติมอย่างละเอียดมากขึ้นในอนาคต

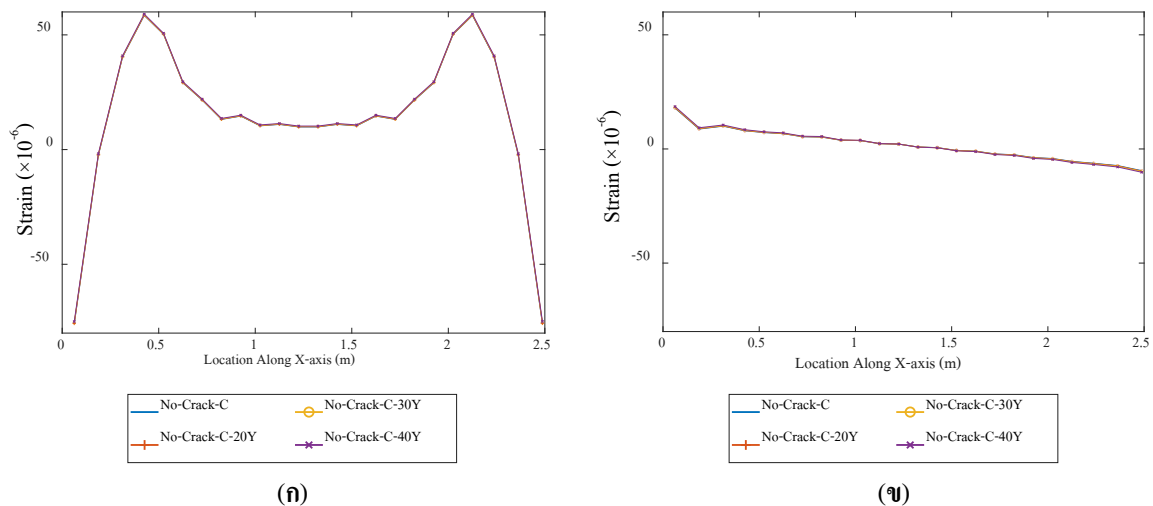


(ก)



(ข)

รูปที่ 14 ค่าความเครียดใต้แผ่นพื้นจากการจำลองรอยแตก (ก) น้ำหนักบรรทุกบริเวณกึ่งกลาง (ข) น้ำหนักบรรทุกบนเลน



รูปที่ 15 เปรียบเทียบค่าความเครียดใต้แผ่นพื้นจากการจำลองการกักร่อนของสนิม (ก) น้ำหนักบรรทุกบริเวณกึ่งกลาง (ข) น้ำหนักบรรทุกบนเลน

5 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้นำสะพานคานเหล็กกล่อง (Steel box girder bridge) มาวิเคราะห์ โดยการสร้างโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE Model) ขึ้น และจำลองรูปแบบความเสียหายซึ่งประกอบด้วยการจำลองรอยแตกต่าง ๆ และการกักร่อนของสนิม เพื่อแสดงถึงความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพาน โดยพบว่าความเสียหายที่เกิดจากการจำลองรอยแตกนั้นส่งผลกับค่าการโก่งตัวและค่าความเครียดมากกว่าการกักร่อนของสนิม ถึงแม้ว่าจะนำค่าจากตำแหน่งของคานที่ได้รับความเสียหายจากการกักร่อนโดยตรงมาวิเคราะห์ การจำลองรอยแตกก็ยังส่งผลต่อโครงสร้างและค่าการโก่งตัวและความเครียดมากกว่า ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายต่าง ๆ ของสะพานและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นสามารถนำมาใช้ในการคาดการณ์ และการประเมินสภาพสะพานได้ ในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบสะพานนั้นเลือกใช้เกจวัดความเครียดเนื่องจากติดตั้งกับตัวป้องกันที่ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี โดยที่ตำแหน่งในการติดตั้งที่เหมาะสมอยู่ที่ตำแหน่งที่มีค่าความเครียดสูงสุดที่วิเคราะห์ได้ ซึ่งก็คือ ทุก ๆ 0.5 เมตร

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. H. Nili, H. Taghaddos and B. Zahraie, "Integrating discrete event simulation and genetic algorithm optimization for bridge maintenance planning," *Automation in Construction*, vol. 122, no. 1, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103513.
- [2] F. Ghodoosi, A. Bagchi, T. Zayed and M. R. Hosseini, "Method for developing and updating deterioration models for concrete bridge decks using GPR data," *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 133–141, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.03.014.
- [3] D. Fabianowski and P. Jakiel, "An expert fuzzy system for management of railroad bridges in use," *Automation in Construction*, vol. 106, 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.05.024.
- [4] A. Balasubramanian, "Bridges and their Types," Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore, Mysore, India, Tech. Rep. no. 6, 2017.
- [5] J. J. Jensen, "Trends in bridge design," in *History of Bridges - A philatelic review*, Trondheim, Norway: Akademika Publishing 2001, ch 3, sec. 1, p. 6.
- [6] T. Sakagami, Y. Mizokami, D. Shiozawa, T. Fujimoto, Y. Izumi, T. Hanai and A. Moriyama, "Verification of

- the repair effect for fatigue cracks in members of steel bridges based on thermoelastic stress measurement,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 183, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.05.024.
- [7] The Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Tokyo, Japan. *Recommendations for Full-scale Maintenance of Aging Roads* (2014). Accessed: Sep. 7, 2021. [Online]. Available: https://www.mlit.go.jp/road/road_e/pdf/recommendation.pdf.
- [8] A. Kaveh, T. Bakhshpoori and M. Barkhori, “Optimum design of multi-span composite box girder bridges using Cuckoo Search algorithm,” *Steel and Composite Structures*, vol. 17, no. 5, pp. 705–719, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-48012-1_3.
- [9] S. Rana, N. Islam, R. Ahsan and S. N. Ghani, “Application of evolutionary operation to the minimum cost design of continuous prestressed concrete bridge structure,” *Engineering Structures*, vol. 46, pp. 38–48, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.07.017.
- [10] S. Jang, H. Jo, S. Cho, K. Mechtov, J. A. Rice, S. H. Sim, H. J. Jung, C. B. Yun, B. F. Spencer Jr. and G. Agha, “Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: Deployment and evaluation,” *Smart Structures and Systems*, vol. 6, no. 5–6, pp. 439–459, 2010, doi: 10.12989/sss.2010.6.5_6.439.
- [11] A. E. Del Grosso, “Structural health monitoring: Research and practice,” in *Proc. Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures SMAR 2013*, Istanbul, Turkey, Sep. 9–11, no. 190.
- [12] A. E. Del Grosso, “On the reliability of smart monitored structures,” in *Proc. 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, Oct. 12–17, 2008, pp. 1–8.
- [13] N. Catbas, “Structural health monitoring: applications and data analysis,” in *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, V. M. Karbhari and F. Ansari, Eds., Sawston, U.K.: Woodhead, 2009, pp. 1–39, doi: 10.1533/9781845696825.1.
- [14] H. Xiaoya, W. Bingwen and J. Han, “A wireless sensor network-based structural health monitoring system for highway bridges,” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 193–209, 2013, doi: 10.1111/j.1467-8667.2012.00781.x.
- [15] E. Sasaki, P. Tuttipongsawat, N. Sinsamutpadung, H. Nishida and K. Takase, “Development of a remote monitoring system with wireless power-saving sensors for analyzing bridge conditions,” in *Proc. 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*, Ghent, Belgium, Oct. 28–31, 2018, pp. 1207–1215.
- [16] E. Sasaki, P. Tuttipongsawat, N. Sinsamutpadung, H. Nishida, K. Takase, “Condition Evaluation of a Highway Bridge with RC Deck Using Monitoring Data Obtained by Wireless sensors,” in *Proc. 1st International Conference on Concrete and Steel Technology, Engineering & Design (CASTED2018)*, Quezon city, Philipines, May. 24–26, pp. 98–106.
- [17] R. Chacón and R. Zorrilla, “Structural health monitoring in incrementally launched steel bridges: patch loading phenomena modeling,” *Automation in Construction*, vol. 58, pp. 60–73, 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.07.001.
- [18] Y. S. Chen and B. T. Yen, “Analysis of composite box girders,” Lehigh Preserve Institutional Repository, Bethlehem, PA, USA, Fritz Lab. Rep. no. 380.12 (80), 1980.
- [19] N. L. Braxtan, R. Whitney, Q. Wang and G. Koch, “Preliminary investigation of composite steel box girder bridges in fire,” *Bridge Structures*, vol. 11, pp. 105–114, 2015, doi: 10.3233/BRS-150089.

- [20] R. S. Nicoletti and A. S. C. Souza, "Numerical evaluation of the slab effective width in steel-concrete composite box girder bridges," *IBRACON Structures and Materials*, vol. 14, no. 1, 2021, doi: 10.1590/S1983-41952021000100010.
- [21] C. Garg and M. V. N. S. Kumar, "Study of basic design of a precast segmental box girder bridge," *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, vol. 3, no. 3, pp. 103–112, 2014.
- [22] C. Garg, and M. V. N. S. Kumar, "Prestressed tendons system in a box girder bridge," *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, vol. 3, no. 3, pp. 1–8, 2014.
- [23] K. M. Sennah and J. B. Kennedy, "Literature review in analysis of box-girder bridges," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 7, no. 2, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2002)7:2(134).
- [24] K. Germaniuk, T. Gajda, A. Sakowski, T. Wierzbicki and P. Kaminski, "Bridge structures cracks – What made that phenomena so common?," *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 4030–4039, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.500.
- [25] T. Zhang, "Analysis on the causes of cracks in bridges," *Journal of Construction Research*, vol. 1, no. 1, pp. 13–26, 2018, doi: 10.30564/jcr.v1i1.83.
- [26] M. Morcillo, D. de la Fuente, I. Díaz and H. Cano, "Atmospheric corrosion of mild steel," *Revista de Metalurgia*, vol. 47, no. 5, pp. 426–444, 2011, doi: 10.3989/revmetalm.1125.
- [27] Y. Cai, Y. Xu, Y. Zhao and X. Ma, "Atmospheric corrosion prediction: a review," *Corrosion Reviews*, vol. 38, no. 4, pp. 299–321, 2020, doi: 10.1515/corrrev-2019-0100.
- [28] H. Simillion, O. Dolgikh, H. Terry and J. Deconinck, "Atmospheric corrosion modeling," *Corrosion Reviews*, vol. 32, no. 3–4, 2014, doi: 10.1515/corrrev-2014-0023.
- [29] L. Kaplan, "AASHTO vehicle live loading," in *Concrete*, A. Spada, Ed., Chicago, IL, USA: Structure magazine, 2020, pp. 30–33. [Online]. Available: <https://issuu.com/structuremag/docs/structure-apr20-zmag>.
- [30] *AASHTO LRFD bridge design specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA, 2012, ISBN Standard 978-1-56051-523-4.
- [31] N. Sinsamutpadung and E. Sasaki, "Strain-based evaluation of bridge monitoring using numerical model analysis," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 639, Art no. 1, p. 012023, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/639/1/012023.
- [32] ABAQUS Inc., Palo Alto, CA, USA. *ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.14*. (2014). Accessed: Apr. 22, 2021. [Online]. Available: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/index.html>
- [33] W. Ren, L. H. Sneed, Y. Yang and R. He, "Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 9, pp. 45–54, 2015, doi: 10.1007/s40069-014-0091-2.
- [34] V. Krivy, V. Urban and M. Kubzova, "Thickness of corrosion layers on typical surfaces of weathering steel bridges," *Procedia Engineering*, vol. 142, pp. 56–62, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.02.013.
- [35] G. Masi, F. Matteucci, J. Tacq and A. Balbo, "State of the art study on materials and solutions against corrosion in offshore structures," *NeSSIE Project Consortium*, ch. 4, sec. 1, pp. 16–18, 2018.
- [36] V. Krivy, V. Urban and M. Kubzova, "Experimental corrosion tests on weathering steel bridges," *Solid State Phenomena*, vol. 227, pp. 537–540, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.227.537

- [37] V. Urban, V. Krivy and M. Kubzova, "Development of corrosion processes on weathering railway bridge," *Procedia Engineering*, vol. 190, pp. 275–282, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.338.
- [38] V. Krivy, M. Kubzova, K. Kreislova and V. Urban, "Characterization of corrosion products on weathering steel bridges influenced by chloride deposition," *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, vol. 7, no. 9, 2017, doi: 10.3390/met7090336.
- [39] C. H. Park, A. S. Nowak, P. C. Das and A. R. Flint, "Time-varying reliability model of steel girder bridges," *Structures and Buildings*, vol. 128, no. 4, pp. 359–367, 1998, doi: 10.1680/istbu.1998.30912.
- [40] A. A. Czarniecki and S. N. Andrzej, "Time-variant reliability profiles for steel girder bridges," *Structural Safety*, vol. 30, no. 1, pp. 49–64, 2008, doi: 10.1016/j.strusafe.2006.05.002.
- [41] S. N. Andrzej and M. S. Maria, "Reliability profiles for steel girder bridges with regard to corrosion and fatigue," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 39, no. 2, pp. 339–352, 2001.
- [42] M. Kubzova, V. Krivy, V. Urban and K. Kreislova, "Corrosive environment factors and their influence on the development of weathering steel corrosion products," *Key Engineering Materials*, vol. 832, pp. 137–146, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.832.137.
- [43] M. Kubzova, V. Krivy and K. Kreislova, "Influence of microclimate on the sustainability and reliability of weathering steel bridge," *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 143, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/143/1/012008.
- [44] Z. El-Sayegh, M. El-Gindy, I. Johansson and F. Öjjer, "Modelling tire-moist terrain interaction using advanced computational techniques," *Journal of Terramechanics*, vol. 91, pp. 23–30, 2020, doi: 10.1016/j.jterra.2020.04.004.

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบสูบน้ำบาดาลด้วยวิธีการ DMAIC กรณีศึกษา โรงพยาบาล พ่от่านคล้ายวาจาสิทธิ์ อำเภอลำปาง จังหวัดนครศรีธรรมราช

Optimization of Artesian Water Pump Systems by DMAIC Method

Case Study: Porthanklaivajasit Hospital, Chawang District, Nakhon Si Thammarat Province

ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร¹, สุชาติ จันทรมณี^{1,*}, อธิโรจน์ มะโน² และ จรรย์ ธรรมใจ³

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

²สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

³สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

Chainarong Srivabut¹, Suchart Chantaramanee^{1,*}, Atiroj Mahno² and Jaran Tamjai³

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

Bo Yang, Mueang, Songkhla, 90000, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,

Bo Yang, Mueang, Songkhla, 90000, Thailand

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education and Technology,

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Bo Yang, Mueang, Songkhla, 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: suchart.c@rmutsv.ac.th

Received: Oct 17, 2022; **Revised:** Jan 03, 2023; **Accepted:** Mar 01, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพระบบสูบน้ำบาดาลด้วยวิธีการ DMAIC กรณีศึกษา โรงพยาบาลพ่от่านคล้ายวาจาสิทธิ์ อำเภอลำปาง จังหวัดนครศรีธรรมราช ประกอบด้วย การกำหนดสภาพปัญหา การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุและรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุการปรับปรุงงาน และการควบคุมกระบวนการ วิธีการวิจัย โดยการเปรียบเทียบก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของระบบปั๊มสูบน้ำบาดาล พบว่า สามารถเพิ่มผลผลิตให้การทำงานของระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลได้ด้วยการติดตั้งเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ โดยการลดเวลาของขั้นตอนการทำงานจาก 295.45 นาที เป็น 256.95 นาที สามารถลดลงเท่ากับ 38.5 นาที สำหรับผลจากการออกแบบการทดลองก่อนปรับปรุง ปั๊มสูบน้ำบาดาลทำงาน 30.50 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ได้ 15.19 ลูกบาศก์เมตร และภายหลังการปรับปรุงระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลเวลาทำงานรวม 11.50 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ได้ 16.11 ลูกบาศก์เมตร สามารถลดเวลาของระบบได้ 19 ชั่วโมง และเพิ่มปริมาณน้ำบาดาลขึ้น 0.92 ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายได้ทั้งค่าไฟฟ้าและค่าน้ำประปาได้ กระบวนการวิเคราะห์ด้วย DMAIC ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มผลผลิตในงานอุตสาหกรรมอื่นได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ปรับปรุงการทำงาน, บั้มสูบน้ำบาดาล, คู่มือ, ระบบสูบน้ำ, ประสิทธิภาพ

Abstract

This research aims to increase the efficiency of artesian water pump systems by DMAIC method; A case study of Porthanklaivajasit Hospital, Chawang district, Nakhon Si Thammarat Province, which consists of determining the problems, measuring to determine the cause and gathering data, analyzing the problems and the causes for better work development, and controlling procedures. The result of experiment was compared before and after of the well water pumping system. The experimental results showed that it can increase the productivity of the groundwater pumping system by installing timers, automatic on-off relays, which reduce the time of the work process from 295.45 min to 256.95 min, it can be reduced to 38.5 min. Previous studies have shown that the groundwater pump works for 30.50 h and produces 15.19 cubic meters of water and after the improvement of the groundwater pumping system, the total working time was 11.50 h, the amount of obtained water was 16.11 cubic meters, which could reduce the time system for 19 h and increase the amount of groundwater by 0.92 cubic meters, respectively. Additionally, the cost of electricity and water can be reduced. The DMAIC analysis process can also be used as a guideline to increase productivity in other industries as well.

Keywords: Rework, Deep Well Pump, DMAIC, Pumping Systems, Efficiency

1. บทนำ

น้ำจืดเป็นสิ่งสำคัญต่อมนุษย์บนโลกใบนี้เพื่อใช้ในการดำรงชีวิตและอุปโภค บริโภค อุตสาหกรรม การคมนาคม การเกษตร การท่องเที่ยวและนันทนาการ อื่น ๆ โดยมีน้ำจืดเป็นจำนวน 3 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น และในขณะเดียวกันน้ำใต้ดินมีปริมาณ 30.1 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำจืดที่ 3 เปอร์เซ็นต์ ทั้งหมดบนโลก [1] หรือที่เรียกว่าน้ำบาดาล (Groundwater) น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำสำคัญอีกแหล่งหนึ่งในการนำมาใช้ในภาคนี้เนื่องจากปัจจุบันได้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำในภาวะที่มีแนวโน้มที่จะรุนแรงมากยิ่งขึ้นจากภัยแล้งที่รุนแรงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ โลกร้อน แหล่งน้ำเสื่อมโทรม ขาดการบริหารจัดการ สิ่งปนเปื้อนจากชุมชนเมือง อุตสาหกรรม เกษตรกรรม ขาดการบริหารจัดการน้ำ พฤติกรรมการใช้น้ำ และปริมาณการใช้น้ำที่มีปริมาณสูงขึ้น แม้ในชุมชนเมือง ชนบท หรือหมู่บ้าน โรงงานอุตสาหกรรม และโรงพยาบาลจะมีการใช้น้ำจากการผลิตน้ำจากระบบประปาที่ตามถึงยังไม่เพียงพอต่อการใช้น้ำจากแหล่งน้ำสำรองและในบางครั้งการหยุดจ่ายน้ำจากการเสียหายจากระบบประปา เช่น ท่อประปาแตก และยังทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นทั้งค่าไฟฟ้าและค่าน้ำประปา สำหรับโรงพยาบาลพ่อท่านคล้ายจากสิทธิ์ก็เป็นสถานที่หนึ่งให้เห็นถึงความสำคัญของน้ำจืดในการ

ใช้ภายในโรงพยาบาลจึงได้ดำเนินการขุดเจาะน้ำบาดาล ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โรงเรือนควบคุมระบบปั้มน้ำบาดาลโรงพยาบาลพ่อท่านคล้ายจากสิทธิ์

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำน้ำที่ได้มาสำรองใช้ในการอุปโภคและบริโภคในสภาวะขาดแคลนซึ่งขุดเจาะลงไปในระยะความลึก 300 เมตร จึงจะพบน้ำบาดาลมีปริมาณน้ำที่ได้ประมาณ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการสูบน้ำบาดาลของโรงพยาบาลเมื่อเปิดระบบทำงานปั้มน้ำจะสูบน้ำจากบ่อบาดาลขึ้นถึงพัก 2 ถัง ถังพักน้ำขนาด 4 ลูกบาศก์เมตร โดยมีลูกลอยเป็นตัวสั่งระบบทำงานและตัดระบบการทำงานเมื่อน้ำเต็มถึงพักแต่เนื่องด้วยน้ำใน

บ่อบาดาลมีปริมาณน้ำที่ได้น้อยโดยประมาณ 1.6–1.7 ลูกบาศก์เมตร ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง จึงจำเป็นต้องปิดระบบการทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลเพื่อให้น้ำในบ่อบาดาลมีปริมาณเพิ่มขึ้นให้มากพอในการสูบน้ำขึ้นถึงพักในครั้งต่อไป โดยมีเจ้าหน้าที่ทำการเปิดปิดและจะปิดระบบการทำงานของปั๊มสูบน้ำเป็นเวลาประมาณ 2–3 ชั่วโมง ซึ่งระบบนี้ต้องใช้เจ้าหน้าที่ควบคุมตลอดเวลา เบื้องต้นได้ทำการปรับปรุงด้วยระบบอัตโนมัติโดยการใช้เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำและเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ เข้าควบคุมการทำงานเปิดและปิดการทำงานแทนเจ้าหน้าที่แต่เมื่อเปิดระบบอัตโนมัติทำงานน้ำจะไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำเข้าถึงพักเมื่อน้ำเต็มถึงพักถูกลอยเป็นตัวสั่งตัดระบบการทำงาน ในทางตรงกันข้ามกรณีน้ำไม่เต็มถึงพักเนื่องจากน้ำในบ่อบาดาลไม่เพียงพอไม่สามารถสูบน้ำขึ้นมาได้เป็นเวลา 30 วินาที เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำก็จะสั่งตัดระบบการทำงานของปั๊มและเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ จะสั่งระบบหยุดพักปั๊มสูบน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อน้ำในบ่อบาดาลมีปริมาณเพิ่มขึ้นและเมื่อครบ 2 ชั่วโมง ระบบจะสั่งปั๊มสูบน้ำทำงานอีกครั้ง จากปัญหาดังกล่าว พบว่า ในรายงานประจำปี พ.ศ. 2563 ของกรมทรัพยากรบาดาล ได้กล่าวถึง น้ำไม่มีศักยภาพน้ำบาดาลอย่างเหมาะสม น้ำเค็ม น้ำกร่อยเค็ม และปริมาณน้ำน้อย [2] ซึ่งปริมาณน้ำน้อยสอดคล้องกับงานวิจัยกำลังดำเนินการเพื่อลดปัญหาของน้ำบาดาลไม่ต่อเนื่องปั๊มสูบน้ำทำงานตลอดเวลาจะทำให้เกิดความเสียหายกับปั๊มสูบน้ำบาดาลได้จึงนำใช้ระบบการบริหารคุณภาพในการปรับปรุงการทำงานจากนักวิจัยก่อนนี้ เช่น งานวิจัยศึกษาการลดจำนวนค่ายในคลังสินค้าโดยใช้แนวคิดของ DMAIC ในอุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป [3] พบว่า สามารถลดจำนวนค่ายในคลังสินค้าและได้แนวทางการป้องกันการเกิดจำนวนค่ายในคลังสินค้าใหม่ด้วย ต่อมาการประยุกต์ใช้หลักการของ DMAIC เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประตูเครื่องบินพาณิชย์ [4] พบว่า ของเสียจากชิ้นส่วน Door lower stop สามารถลดลงเท่ากับ 0.26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาการลดปัญหาของเสียในการผลิตเกียร์ด้วยหลักการของ DMAIC กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วน

มอเตอร์ไฟฟ้า [5] พบว่า ของเสียจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกินขนาดในการผลิตเกียร์ลดลงถึง 76.76 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาการลดของเสียผลิตภัณฑ์คอยล์เย็นในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยการประยุกต์ใช้แนวทางของซิกม่า ซิกมา (Six Sigma) [6] พบว่า สามารถลดของเสียได้ประเภทตัวงานคอยล์เย็นจาก 0.216 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 0.107 เปอร์เซ็นต์ หรือลดลง 50.46 เปอร์เซ็นต์ เช่นกันนอกจากนี้ การศึกษาระบบสูบน้ำบาดาลพลังงานแสงอาทิตย์แบบพึ่งพาตนเอง ในพื้นที่โรงเรียนอนุบาลเกาะกูด จังหวัดตราด [7] พบว่า สามารถลดค่ากระแสไฟฟ้าของโรงเรียนได้ร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาเดียวกัน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำแนวทางของซิกม่า ซิกมา โดยการนำหลักการ DMAIC มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงการทำงานของระบบสูบน้ำบาดาล กรณีศึกษาโรงพยาบาลพ่อท่านคล้ายวาจาสิทธิ์ ในการเพิ่มผลผลิตภาพ ในการลดค่าใช้จ่าย เวลาที่สูญเสียเปล่าและลดความเสียหายที่อาจจะเกิดกับชิ้นกับอุปกรณ์

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อเพิ่มผลผลิตภาพให้การทำงานของระบบปั๊มสูบน้ำบาดาล
- 2) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำประปาและการใช้ไฟฟ้าจากการปรับปรุงระบบปั๊มสูบน้ำบาดาล

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ซิกม่า ซิกมา เป็นระดับคุณภาพของกระบวนการผลิต เพื่อใช้ลดความบกพร่องที่ซ่อนไว้ของเสียในระบบการผลิตน้อยที่สุด ซึ่งมุ่งเน้นให้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบได้เพียง 3.40 หน่วยต่อล้านหน่วย และยังเป็นเครื่องมือช่วยทางด้านธุรกิจและอุตสาหกรรม ให้สามารถแก้ไข ปรับปรุงจากปัญหาคุณภาพของระบบการปฏิบัติการได้ สรุปโดยหลักแล้วเป็นแนวคิดในการป้องกันข้อบกพร่องมิให้ขั้นตอนวิธีการอย่างชัดเจน [8] ดังนี้

3.1. การกำหนดสภาพปัญหา (Define Phase)

การกำหนดสภาพปัญหาเป็นการกำหนดเป้าหมายสำคัญที่จะนำมาดำเนินการแก้ไข ปรับปรุงและหรือศึกษาปัญหานั้น

อย่างชัดเจนถ่วงน้ำหนัก โดยพิจารณาตัดสินใจเพื่อระบุปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วนำมาจัดลำดับความสำคัญของปัญหาที่ประสบอยู่และเป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดความเสียหายมากที่สุดที่เป็นอยู่ เช่น ปัญหาด้านค่าใช้จ่าย ด้านเวลาในการปฏิบัติงาน และเวลาที่สูญเปล่าจากกระบวนการ หรืออื่น ๆ ด้วยแผนภูมิพารโต (Pareto Diagram) [9]

3.2. การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุและรวบรวมข้อมูล (Measure Phase)

การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุและรวบรวมข้อมูลเป็นขั้นตอนในการสืบค้นหรือค้นหาสาเหตุที่แท้จริงที่เกิดขึ้น โดยการศึกษากระบวนการที่กำลังดำเนินการและทำการหาปัจจัยตัวแปรหรือพารามิเตอร์ สำคัญที่ทำให้กระบวนการลดประสิทธิภาพลงซึ่งสามารถนำการศึกษาการทำงาน (Work Study) ช่วยในการวัดด้วยแผนภูมิการเคลื่อนที่ (Flow Process Chart) ได้ [10]

3.3. วิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุ (Analysis Phase)

การวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุ เป็นขั้นตอนภายหลังจากการพบปัญหาหรือสาเหตุที่แท้จริงแล้วและปัญหานั้นจะถูกนำมาพร้อมประชุมด้วยกันของผู้รับผิดชอบโดยตรงใช้การประชุมระดมสมอง (Brain Storming) [3] ร่วมกับแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) [4] ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุหลาย ๆ สาเหตุที่เป็นไปได้และที่ส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาหนึ่งปัญหาที่เป็นปัญหาจริงของกระบวนการนั้น [11] หรือการนำหลักการ เช่น CP Cpk อัตราของเสีย ฯลฯ ประยุกต์ใช้

3.4. การปรับปรุงงาน (Improve Phase)

จากการวิเคราะห์ปัญหาโดยการระดมความคิดจากผู้รับผิดชอบกระทั่งเจอสาเหตุหลักแล้วดำเนินการวางแผนงานในการปรับปรุงแก้ไขเพื่อไม่ให้เกิดปัญหานั้นเกิดขึ้นต่อไปอีก

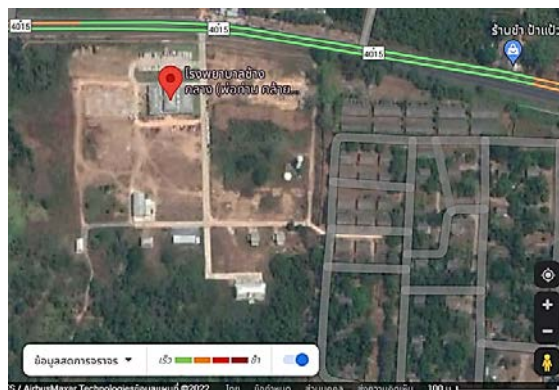
3.5. การควบคุมกระบวนการ (Control Phase)

จากข้อผิดพลาดหรือปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วเมื่อถึงขั้นตอนในการควบคุมจะต้องวางแผนในการจัดการควบคุมอย่างต่อเนื่องโดยมีการติดตามกระทั่งมั่นใจในกระบวนการควบคุมแล้วทำการจัดทำมาตรฐานในการทำงานต่อไป

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1. สถานที่ในงานวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นกรณีศึกษา ณ โรงพยาบาลฟอทานคล้ายวาจาสิทธิ์ เลขที่ 199 หมู่ 10 ตำบลหลักช้าง อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา 80250 โทรศัพท์ 075-466104 สังกัดสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดนครราชสีมา เป็นโรงพยาบาลซึ่งประกอบด้วย 12 กลุ่มงาน จำนวนเตียงผู้ป่วยใน 30 เตียง ซึ่งส่วนของระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลอยู่ในกลุ่มงานบริหารทั่วไป แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ที่ตั้งโรงพยาบาลฟอทานคล้ายวาจาสิทธิ์

4.2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

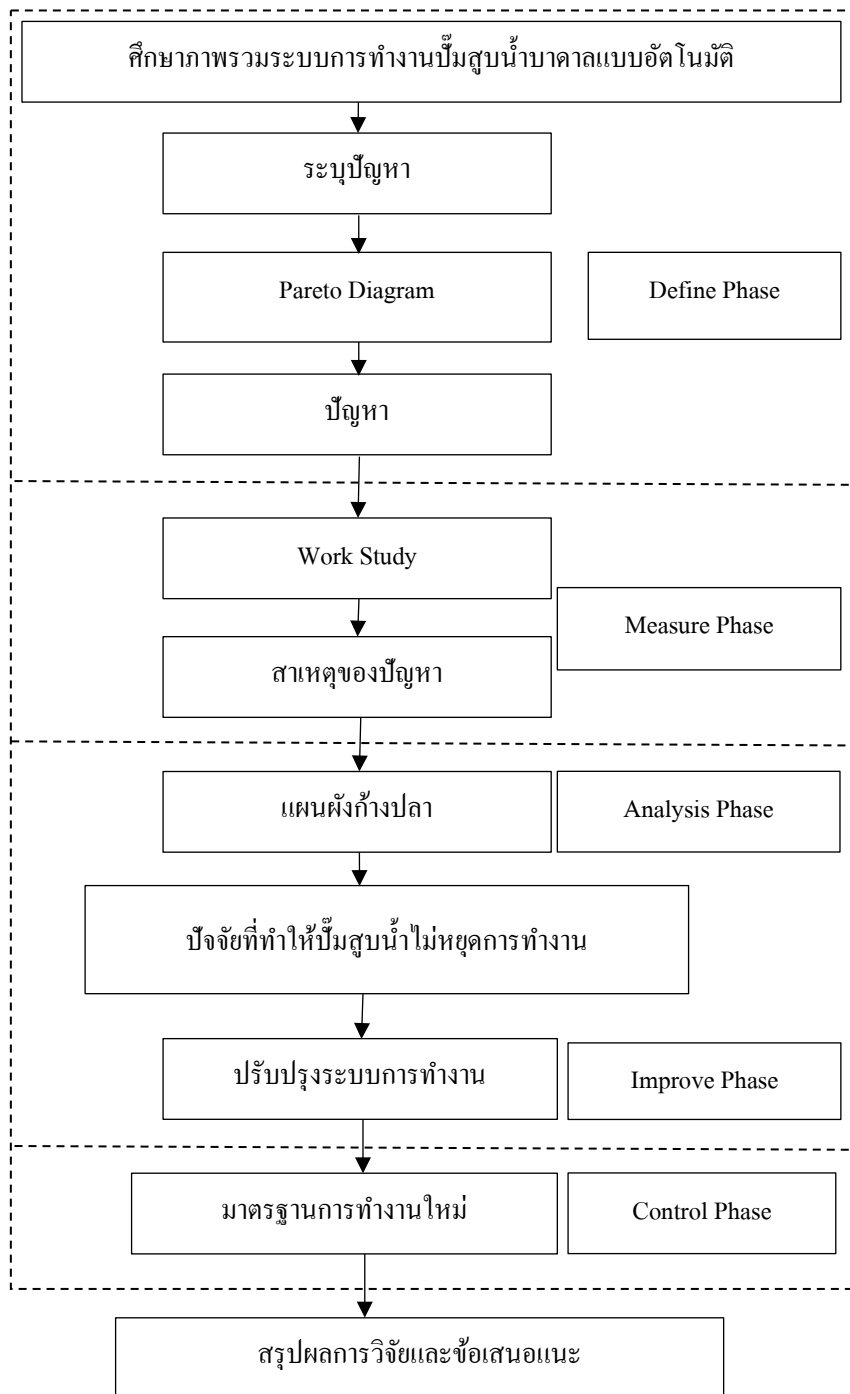
จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้นำแนวทางในการดำเนินงานใช้ตามหลักการ DMAIC ซึ่งเป็นกระบวนการทางคุณภาพและการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องเพื่อลดของเสียให้น้อยที่สุดและเพิ่มประสิทธิภาพโดยซิกส์ ซิกมา [3-6] โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนี้

4.2.1. การกำหนดสภาพปัญหา

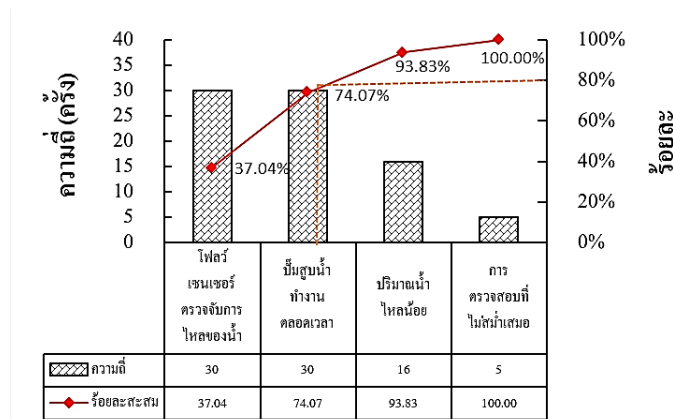
การกำหนดสภาพปัญหาได้ทำการวิเคราะห์จากข้อมูลในการใช้น้ำประปาย้อนหลังปี พ.ศ. 2564 โดยได้มีการใช้น้ำในสระน้ำของโรงพยาบาลฟอทานคล้ายวาจาสิทธิ์ และพบว่า มีค่าใช้จ่ายค่าน้ำประปารวมทั้งสิ้น 113,574.13 บาทต่อปี และมีลักษณะการทำงานในปัจจุบันของกระบวนการทำงานของระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลอัตโนมัติเป็นปัญหาที่สำคัญด้านเวลาปฏิบัติงาน โดยดำเนินการเก็บบันทึกข้อมูลสภาพปัญหาโดยใช้ใบบันทึกข้อมูลในการเก็บข้อมูล

ภายใน 1 วันทำงาน ระหว่างเปิดระบบจนกระทั่งปิดระบบ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อครั้ง จะได้รับความถี่เท่ากับ 4 ครั้ง ต่อวัน เก็บข้อมูลทั้งหมดจำนวน 30 ครั้ง จากนั้นนำข้อมูลจากการบันทึกทำการวิเคราะห์เพื่อกำหนดสภาพปัญหาโดย กฎ 80 : 20 ตามหลักการของพาเรโตโดย พบปัญหา 4 ปัญหา คือ การทำงานของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำในการตรวจจับการไหลของน้ำ บั้มสูบน้ำทำงาน

ตลอดเวลา ปริมาณน้ำไหลน้อย และมีการตรวจสอบที่ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในตารางที่ 1 เลือกปัญหาที่จะใช้ในการวัดสภาพปัญหาจากหลักการของพาเรโต ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า สาเหตุหลัก คือ การทำงานของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำในการตรวจจับการไหลของน้ำและบั้มสูบน้ำบาดาลทำงานตลอดเวลา



รูปที่ 3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 4 ปัญหาในระบบปั้มน้ำบาดาลก่อนปรับปรุง

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละสะสมของปัญหาสำคัญในระบบปั้มน้ำบาดาลก่อนปรับปรุง

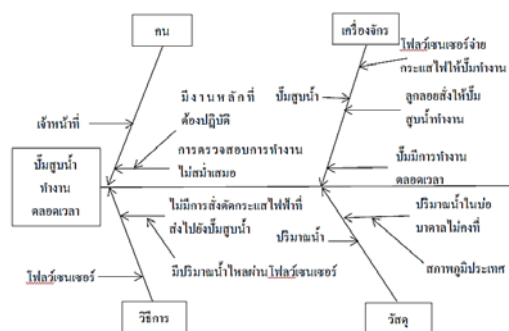
จำนวนและร้อยละสะสมของปัญหาในระบบการปั้มน้ำบาดาล				
ปัญหา/สาเหตุ	ความถี่ (ครั้ง)	ความถี่สะสม	ร้อยละ	ร้อยละสะสม
การทำงานของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำในการตรวจจัดการไหลของน้ำ	30	30	37.04	37.04
ปั้มน้ำทำงานตลอดเวลา	30	60	37.04	74.07
ปริมาณน้ำไหลน้อย	16	76	19.75	93.83
การตรวจสอบที่ไม่สม่ำเสมอ	5	81	6.17	100.00

4.2.2. การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุและรวบรวมข้อมูล

การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุและรวบรวมข้อมูล เนื่องจากกระบวนการปั้มน้ำบาดาลสามารถทำงานได้ 2 ระบบ คือ ระบบเปิดด้วยมือ (Manual) และระบบอัตโนมัติ (Automatic) ได้ทำการเปิดใช้งานทั้งสองระบบ และเก็บข้อมูลปริมาณน้ำนำมาเปรียบเทียบ เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดระบบการทำงานในกระบวนการปั้มน้ำบาดาล จำนวน 66 ครั้งได้เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เปิดระบบ ระหว่าง 30 ที่ของเวลาทำงาน 8.00–16.00 นาฬิกา ในการเก็บข้อมูลที่ให้ระดับนัยสำคัญ 95 เปอร์เซ็นต์ ค่าความคลาดเคลื่อน 0.125 พบว่า มีปริมาณน้ำระบบเปิดด้วยมือ 12.01 ลูกบาศก์เมตร และปริมาณน้ำระบบอัตโนมัติ 15.19 ลูกบาศก์เมตร และแสดงจำนวนขั้นตอนการทำงานก่อนปรับปรุง คือ การปฏิบัติงาน การเคลื่อนย้าย การรอกคอย การตรวจสอบ และการเก็บรักษา มีขั้นตอนเท่ากับ 12 9 3 1 และ 0 ขั้นตอน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

4.2.3. วิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุ

การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ปั้มน้ำบาดาลทำงานตลอดเวลา โดยการระดมสมองกับผู้รับผิดชอบเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยในการเกิดปัญหาในการทำงานผิดพลาดของกระบวนการด้วยแผนผังก้างปลา ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยหาสาเหตุของการทำงานปั้มน้ำบาดาลระบบอัตโนมัติ ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 5 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์หาสาเหตุของการทำงานปั้มน้ำบาดาลระบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 2 แผนภูมิการเคลื่อนที่ระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลก่อนปรับปรุง

แผนภูมิการเคลื่อนที่ : ☐ คน ☐ วัสดุ ☒ เครื่องจักร							
แผนภูมิหมายเลข 1	สรุปผล						
สถานที่ : โรงพยาบาลพ่อท่านคล้ายวาจาสิทธิ์	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง		
กรรมวิธี : ระบบสูบน้ำบาดาล	การปฏิบัติงาน	○	12				
☒ วิธีปัจจุบัน ☐ วิธีเสนอ	การเคลื่อนย้าย	⇒	9				
ตำแหน่งที่ตั้ง : 199 หมู่ที่ 10 ตำบลหลักช้าง อำเภอลำลูกเกด จังหวัดนครศรีธรรมราช 80250	การรอกคอย	⊐	3				
	การตรวจสอบ	□	1				
	การเก็บรักษา	▽	0				
	ระยะทาง (เมตร)	900.00					
ผู้บันทึก : ญัฐภัทร เพชรฤทธิ์	เวลา (นาทื)	295.45					
รายการ	ระยะทาง	เวลา	สัญลักษณ์				
	เมตร	นาทื	○	⇒	⊐	□	▽
1. ห้องปฏิบัติงาน	0.00	0.00	●				
2. เจ้าหน้าที่เดินไปเปิดระบบปั้มสูบน้ำบาดาล	150.00	1.25		●			
3. เปิดระบบปั้มสูบน้ำบาดาลระบบอัตโนมัติ		0.05	●				
4. ถูกลอยตรวจจับระดับน้ำบาดาล		0.02	●				
5. ปั้มสูบน้ำบาดาลทำงาน		0.02	●				
6. ตรวจสอบการทำงานของปั้มสูบน้ำบาดาล		2.00			●		
7. เจ้าหน้าที่เดินกลับห้องปฏิบัติงาน		1.25		●			
8. น้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ		2.01		●			
9. เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำตรวจจับการไหลของน้ำ		0.01	●				
10. ปั้มสูบน้ำบาดาลทำงาน		32.02	●				
11. ไม่มีน้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ		0.02	●				
12. ปั้มสูบน้ำบาดาลทำงาน		62.00	●				
13. เจ้าหน้าที่เดินปิดระบบปั้มสูบน้ำบาดาล		1.25		●			
14. ปิดระบบปั้มสูบน้ำแบบอัตโนมัติ		0.05	●				
15. เจ้าหน้าที่เดินกลับห้องปฏิบัติงาน	150.00	1.25		●			
16. รอเปิดระบบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง		120.00			●		
17. เจ้าหน้าที่เดินมาเปิดระบบปั้มสูบน้ำบาดาล	150.00	1.15		●			
18. เปิดระบบปั้มสูบน้ำอัตโนมัติ		0.05	●				
19. เจ้าหน้าที่เดินกลับห้องปฏิบัติงาน	150.00	1.25		●			
20. รอระดับน้ำในถังมากกว่าครึ่งถัง		60.00			●		
21. สูบน้ำออกบรรจุไปยังถังหลัก		5.00	●				
22. เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำตรวจจับการไหลของน้ำ		0.02	●				

ตารางที่ 2 แผนภูมิการเคลื่อนที่ระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลก่อนปรับปรุง (ต่อ)

แผนภูมิการเคลื่อนที่ : ☐ น ☐ ศ ☒ รื่องจักร							
แผนภูมิหมายเลข 1	สรุปผล						
สถานที่ : โรงพยาบาลพ่อท่านคล้ายวาจาสิทธิ์	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง		
กรรมวิธี : ระบบสูบน้ำบาดาล	การปฏิบัติงาน	○	12				
☒ วิธีปัจจุบัน ☐ วิธีเสนอ	การเคลื่อนย้าย	⇨	9				
ตำแหน่งที่ตั้ง : 199 หมู่ที่ 10 ตำบลหลักช้าง อำเภอช้างกลาง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80250	การรอกอย	D	3				
	การตรวจสอบ	□	1				
	การเก็บรักษา	▽	0				
	ระยะทาง (เมตร)	900.00					
ผู้บันทึก : ญัฐภัทร เพชรฤทธิ์	เวลา (นาท)	295.45					
รายการ	ระยะทาง	เวลา	สัญลักษณ์				
	เมตร	นาท	○	⇨	D	□	▽
23. ส่งต่อไปยังระบบกรองน้ำ		0.10					
24. ทำการกรองน้ำ		1.00					
25. ส่งต่อไปยังถังเก็บน้ำหลัก		3.11					
ไม่มีน้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำภายใน 30 วินาที ปั๊มสูบน้ำหยุดการทำงาน 1 ชั่วโมง		0.57					

ตารางที่ 3 การกรองปัญหาระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลระบบอัตโนมัติ

ปัจจัย	สาเหตุ	วิธีแก้ไข
คน	เจ้าหน้าที่ตรวจสอบการทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ไม่ทราบถึงการทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลที่แน่นอน	จัดทำตารางในการตรวจสอบชัดเจน
เครื่องจักร	การทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลที่ทำงานตลอดเวลาส่งผลให้ปั๊มสูบน้ำบาดาลอาจเสียหายและมีค่าใช้จ่ายที่สูงต่อการซ่อมแซม	หยุดพักปั๊มสูบน้ำบาดาลให้ทำงานน้อยลง
วิธีการทำงาน	เครื่องตั้งเวลาเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ ไม่มีการสั่งตัดระบบกระแสไฟที่ส่งไปยังปั๊มสูบน้ำบาดาล ส่งผลให้การทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลที่ทำงานตลอดเวลาเนื่องจากไม่มีน้ำไหลอย่างต่อเนื่อง	ติดตั้งเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ รีเลย์เพื่อสั่งให้ปั๊มสูบน้ำหยุดการทำงานตามเวลา
วัตถุดิบ	ปริมาณน้ำบาดาลที่มีปริมาณน้อยเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ	รอให้ปริมาณน้ำใต้ดินมีปริมาณเพิ่มขึ้น

4.2.4. การปรับปรุงงาน

จากการวิเคราะห์ปัญหาโดยการระดมความคิดจากผู้รับผิดชอบพบแนวทางการปรับปรุงแก้ไข โดยการนำ

วงจรรีเลย์ติดตั้งเพิ่มเติมให้ใช้งานได้ควบคู่ในขั้นตอนใช้งานระบบอัตโนมัติแบบเดิม ซึ่งเมื่อเปิดใช้งานระบบอัตโนมัติวงจรเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำและวงจร

เครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติจะทำงานพร้อมกัน โดยวงจรเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำจะสั่งหยุดพักการทำงานเมื่อไม่มีน้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำเป็นเวลา 30 วินาที และวงจรรีเลย์จะทำงานตั้งแต่เริ่มเปิดใช้งานระบบอัตโนมัติเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หากวงจรเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำไม่สั่งหยุดพักการทำงาน เมื่อปั๊มสูบน้ำทำงานครบ 2 ชั่วโมง วงจรเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติก็จะสั่งหยุดพักการทำงาน 2 ชั่วโมง แทนการสั่งหยุดพักการทำงานของปั๊มสูบน้ำด้วยเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ ทั้ง 2 ระบบจะทำงานในใหม่อีกครั้งเมื่อปั๊มสูบน้ำหยุดพักการทำงานครบ 2 ชั่วโมง และระบบจะทำงานวนซ้ำจนน้ำบาดาลเต็มถึงบรรจุ เมื่อปริมาณน้ำเต็มถึงบรรจุและไม่มีปริมาณน้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยสร้างแผนภูมิการเคลื่อนที่ทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำงานเดิม

4.2.5. การควบคุมกระบวนการ

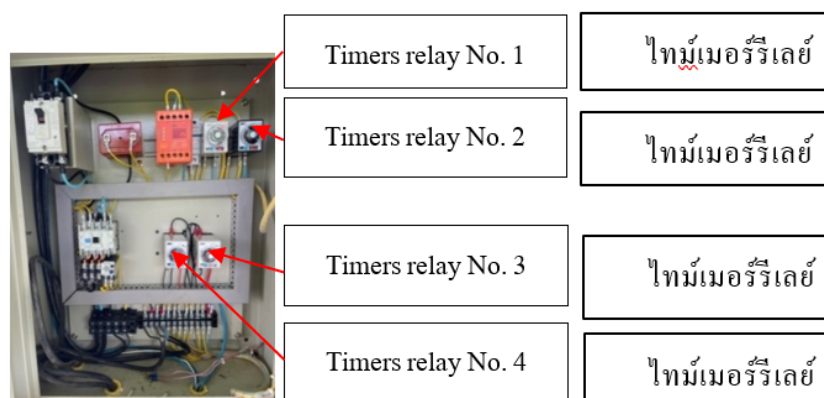
จากการปรับปรุงกระบวนการทำงานกำหนดให้มีระยะเวลาในการทำงานของปั๊มสูบน้ำจากบ่อบาดาลขึ้นสู่ถังบรรจุเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และหยุดหน่วงเวลา 2 ชั่วโมง หยุดหน่วงเวลาเมื่อปริมาณน้ำเต็มถึงบรรจุและไม่มีปริมาณน้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำและติดตามบันทึกเวลาการทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลหลังการปรับปรุง

5. ผลการวิจัย

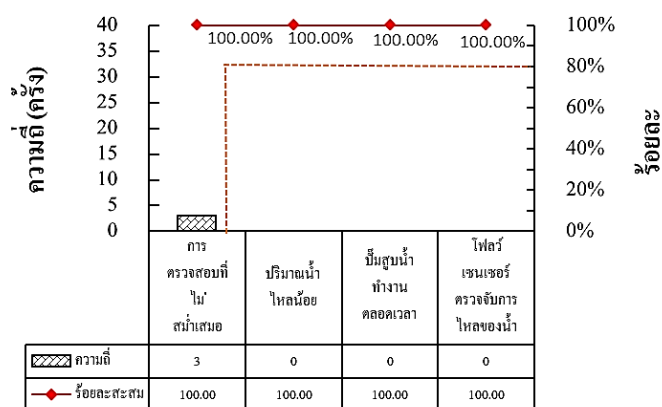
ผลการวิจัยจากการนำแนวคิด DMAIC มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบสูบน้ำบาดาลในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังนี้

5.1. ผลการปฏิบัติงานหลังปรับปรุง

ผลการดำเนินงานตามขั้นตอนหลังปรับปรุงแก้ไขกระบวนการจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างชั่วโมงปั๊มสูบน้ำบาดาลทำงานและปริมาณน้ำบาดาลก่อนปรับปรุง พบว่า การทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลและปริมาณน้ำบาดาลที่สูบได้ไม่สอดคล้องกัน โดยค่าชั่วโมงปั๊มน้ำบาดาลทำงานเท่ากับ 30.50 ชั่วโมง และปริมาณน้ำบาดาลเท่ากับ 15.19 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สาเหตุเนื่องจากปริมาณน้ำบาดาลชั้นใต้ดินไม่เพียงพอและไม่มีการหยุดพักการทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลเพื่อให้เกิดการซึมของชั้นน้ำใต้ดินกระทั่งปริมาณมากพอ จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขปัญหาโดยได้ติดตั้งวงจรเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ จำนวน 2 ตัว คือ วงจรเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติตัวที่ 3 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 6 และหลังจากการปรับปรุงจากการติดตั้งวงจรเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติและทำการจดบันทึกสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อประเมินผลภายหลังปรับปรุง พบว่า ปัญหาเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำตรวจจับการทำงานของปั๊มสูบน้ำบาดาลและปริมาณน้ำบาดาลมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 7 โดยค่าชั่วโมงปั๊มน้ำบาดาลทำงานเท่ากับ 11.50 ชั่วโมง และปริมาณน้ำบาดาลเท่ากับ 16.11 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 6 ตู้ควบคุมระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลหลังปรับปรุง



รูปที่ 7 ปัญหาในระบบป้อนน้ำบาดาลหลังปรับปรุง

ตารางที่ 4 จำนวนและร้อยละสะสมของปัญหาสำคัญในระบบป้อนน้ำบาดาลหลังปรับปรุง

จำนวนและร้อยละสะสมของปัญหาในกระบวนการป้อนน้ำบาดาล				
ปัญหา/สาเหตุ	ความถี่ (ครั้ง)	ความถี่สะสม	ร้อยละ	ร้อยละสะสม
การตรวจสอบที่ไม่สม่ำเสมอ	3	3	100.00	100.00
ปริมาณน้ำไหลน้อย	0	3	0.00	100.00
ป้อนน้ำทำงานตลอดเวลา	0	3	0.00	100.00
การทำงานของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำในการตรวจจัดการไหลของน้ำ	0	3	0.00	100.00

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบชั่วโมงการทำงานป้อนน้ำบาดาลและปริมาณน้ำบาดาลที่สูบได้ด้วยระบบอัตโนมัติก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ป้อนน้ำบาดาลทำงาน (ชั่วโมง)	30.50	11.50
ปริมาณน้ำที่ได้ (ลูกบาศก์เมตร)	15.19	16.11
อัตราของน้ำต่อเวลา (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	0.50	1.40

5.2.ผลการดำเนินงานตามขั้นตอนการควบคุม

เมื่อทำการปรับปรุงโดยติดตั้งวงจรเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติและทำการจดบันทึกกระบวนการทำงานด้วยแผนภูมิการเคลื่อนที่หลังปรับปรุงพบว่าคือ การปฏิบัติงาน การเคลื่อนย้าย การรอคอย การตรวจสอบ และการเก็บรักษามีขั้นตอนเท่ากับ 10 5 4 1 และ 0 ขั้นตอนตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 6 เนื่องจากลดขั้นตอนลำดับที่ 13, 14, 15, 17, 18 และ 19 ดังแสดงในตารางที่ 2

5.3.ผลการเปรียบเทียบการปฏิบัติงานก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

ผลจากการปรับปรุงกระบวนการทำงานของป้อนน้ำบาดาลแล้วทำการเก็บข้อมูลวิเคราะห์ผลที่ได้ เปรียบเทียบผลระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง ดังนี้

จากตารางที่ 7 พบว่า ผลการเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานของระบบก่อนปรับปรุงมี 12 ขั้นตอน ภายหลังปรับปรุงลดลง 2 ขั้นตอน เวลาการปฏิบัติงานก่อนปรับปรุง 100.26 นาที ภายหลังปรับปรุงเวลาการปฏิบัติงาน 127.08 นาที ได้เวลาการปฏิบัติงานเพิ่มขึ้น 26.83 นาที สำหรับ

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายก่อนปรับปรุงมี 9 ขั้นตอน ภายหลังปรับปรุงลดลง 4 ขั้นตอน เวลาการเคลื่อนย้ายก่อนปรับปรุง 12.62 นาที ภายหลังปรับปรุงเวลาการเคลื่อนย้าย 9.52 นาที ลดลง 3.10 นาที แต่อย่างไรก็ตาม จากการปรับปรุงระบบการทำงานได้เพิ่มการรอคอย 1 ขั้นตอน แต่เวลาการรอคอย

ลดลงถึง 60.23 นาทีเช่นกัน

สรุปได้ว่าเมื่อมีการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานจะทำให้เวลาในการทำงานของปั้มน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเคลื่อนย้าย การรอคอย และการตรวจสอบลดเวลาลงทั้งหมด

ตารางที่ 6 แผนภูมิการเคลื่อนที่ระบบสูบน้ำบาดาลหลังปรับปรุง

แผนภูมิการเคลื่อนที่ : ☐ คน ☐ วัสดุ ☒ เครื่องจักร							
แผนภูมิหมายเลข 1	สรุปผล						
สถานที่ : โรงพยาบาลพ่อท่านคล้ายวาจาสิทธิ์	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง	เพิ่มขึ้น	
กรรมวิธี : ระบบสูบน้ำบาดาล	การปฏิบัติงาน	○	12	10	2	0	
☐ วิธีปัจจุบัน ☒ วิธีเสนอ	การเคลื่อนย้าย	⇒	9	5	4	0	
ตำแหน่งที่ตั้ง : 199 หมู่ที่ 10 ตำบลหลักช้าง อำเภอช้างกลาง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80250	การรอคอย	D	3	4	0	1	
	การตรวจสอบ	□	1	1	0	0	
	การเก็บรักษา	▽	0	0	0	0	
	ระยะทาง (เมตร)	300					
ผู้บันทึก : ณัฐภัทร เพชรฤทธิ์	เวลา (นาที)	256.96					
รายการ	ระยะทาง	เวลา	สัญลักษณ์				
	เมตร	นาที	○	⇒	D	□	▽
1. ห้องปฏิบัติงาน	0.00	0.00	●				
2. เจ้าหน้าที่เดินมาเปิดระบบปั้มน้ำบาดาล	150.00	1.25		●			
3. เปิดระบบปั้มน้ำระบบอัตโนมัติ		0.02	●				
4. ลูกคอยตรวจระดับน้ำภายในถัง		0.02	●				
5. ปั้มน้ำบาดาลทำงาน		0.02	●				
6. ตรวจสอบการทำงานของปั้มน้ำบาดาล		0.02				●	
7. เจ้าหน้าที่เดินกลับไปยังห้องปฏิบัติงาน	150.00	1.25		●			
8. น้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ		2.00		●			
9. เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำตรวจจบการไหลของน้ำ		2.01	●				
10. ปั้มน้ำบาดาลทำงาน		0.01	●				
11. เครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติสั่งปั้มทำงาน 1 ชั่วโมง		60.00	●				

ตารางที่ 6 แผนภูมิการเคลื่อนที่ระบบสูบน้ำบาดาลหลังปรับปรุง (ต่อ)

แผนภูมิการเคลื่อนที่ : ☐ คน ☐ วัสดุ ☒ เครื่องจักร							
แผนภูมิตามเลข 1	สรุปผล						
สถานที่ : โรงพยาบาลพ่อท่านคล้ายวาจาสิทธิ์	สัญลักษณ์		ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง	เพิ่มขึ้น	
กรรมวิธี : ระบบสูบน้ำบาดาล	การปฏิบัติงาน	○	12	10	2	0	
☐ วิธีปัจจุบัน ☒ วิธีเสนอ	การเคลื่อนย้าย	⇒	9	5	4	0	
ตำแหน่งที่ตั้ง : 199 หมู่ที่ 10 ตำบลหลักช้าง อำเภอช้างกลาง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80250	การรอกคอย	⊖	3	4	0	1	
	การตรวจสอบ	□	1	1	0	0	
	การเก็บรักษา	▽	0	0	0	0	
	ระยะทาง (เมตร)	300					
ผู้บันทึก : ณัฐภัทร เพชรฤทธิ์	เวลา (นาฬิกา)	256.96					
รายการ	ระยะทาง	เวลา	สัญลักษณ์				
	เมตร	นาฬิกา	○	⇒	⊖	□	▽
12. เครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้า อัตโนมัติรีเลย์สั่งปั๊มสูบน้ำบาดาลหยุดทำงาน		0.02			●		
13. ปั๊มสูบน้ำบาดาลหยุดทำงาน 2 ชั่วโมง		120.00			●		
14. รอระดับน้ำในถังบรรจุมีมากกว่าครึ่ง		0.02			●		
15. สูบน้ำออกจากถังบรรจุไปถังบรรจุหลัก		60.00	●				
16. เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำตรวจจับน้ำ ไหลผ่าน		4.00	●				
17. มีน้ำผ่านส่งต่อไปยังระบบกรองน้ำ		0.02		●			
18. ทำการกรองน้ำ		1.00	●				
19. ส่งน้ำไปยังถังบรรจุหลัก		5.00		●			
20. ไม่มีน้ำไหลผ่านเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ ภายใน 30 วินาที ปั๊มน้ำหยุดทำงาน 1 ชั่วโมง		0.30			●		

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานของระบบก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

สัญลักษณ์	ความหมาย	กระบวนการทำงาน					
		ก่อนปรับปรุง (ขั้นตอน)	หลังปรับปรุง (ขั้นตอน)	จำนวน (ขั้นตอน)	เวลาก่อนปรับปรุง (นาฬิกา)	เวลาหลังปรับปรุง (นาฬิกา)	เวลา (นาฬิกา)
○	การปฏิบัติงาน	12	10	-2	100.26	127.08	+26.82
⇒	การเคลื่อนย้าย	9	5	-4	12.62	9.52	-3.10
⊖	การรอกคอย	3	4	+1	180.57	120.34	-60.23
□	การตรวจสอบ	1	1	0	2.00	0.02	-1.98

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานของระบบก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	กระบวนการทำงาน					
		ก่อนปรับปรุง (ขั้นตอน)	หลังปรับปรุง (ขั้นตอน)	จำนวน (ขั้นตอน)	เวลาก่อนปรับปรุง (นาที)	เวลาหลังปรับปรุง (นาที)	เวลา (นาที)
▽	การเก็บรักษา	0	0	0	0	0	0
เวลารวม					295.45	256.95	-38.5

5.4. ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

ผลค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ใช้งานเครื่องสูบน้ำบาดาล ใช้อัตราค่าไฟฟ้าอ้างอิงจากการคิดค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย โดยชั่วโมงการทำงานของปั๊มสูบน้ำที่ทำงานจากการออกแบบการทดลอง ก่อนปรับปรุงระบบรวมทั้ง 30.50 ชั่วโมง ใช้ปั๊มสูบน้ำขนาด 2 แรงม้า กำลัง 1,491.4 วัตต์ ได้จำนวนการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 45.4877 หน่วยเมื่อ (หน่วยที่ 1–150 หน่วยละ 3.62 บาท) แทนค่าจากค่าไฟฟ้าพื้นฐานบวกค่าไฟฟ้าแปรผันบวกภาษีมูลค่าเพิ่มเป็นเงินค่าไฟฟ้าเท่ากับ 177.18 บาท สำหรับภายหลังการปรับปรุงระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลเวลาทำงานรวม 11.50 ชั่วโมง คิดเป็นเงินค่าไฟฟ้าเท่ากับ 67.43 บาท สรุปได้ว่าเวลาในการทำงานของเครื่องสูบน้ำบาดาลลดลง 19 ชั่วโมง คิดเป็นเงินค่าไฟฟ้าเท่ากับ 109.75 บาท หรือ 5.78 บาทต่อชั่วโมง สอดคล้องกับงานวิจัย [7] สามารถลดค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้าได้

ผลค่าใช้จ่ายน้ำประปาที่ใช้งานเครื่องสูบน้ำบาดาล ใช้อัตราค่าน้ำประปาอ้างอิงจากการคิดค่าน้ำประปาส่วนภูมิภาค โดย (ปริมาณน้ำที่ใช้ × ราคาต่อหน่วยเท่ากับ 6 บาท) + ค่าบริการเท่ากับ 25 บาท + ภาษี 7 % จากปั๊มสูบน้ำที่ทำงานจากการออกแบบการทดลอง ก่อนปรับปรุงระบบรวมทั้ง 30.50 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ได้ 15.19 ลูกบาศก์เมตร ค่าใช้น้ำประปาเท่ากับ 286.80 บาท สำหรับภายหลังการปรับปรุงระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลเวลาทำงานรวม 11.50 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ได้ 16.11 ลูกบาศก์เมตร ค่าใช้น้ำประปาเท่ากับ 302.55 บาท สรุปได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำจากเครื่องสูบน้ำบาดาลได้เพิ่มขึ้น 0.92 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นเงินค่าน้ำประปาเท่ากับ 15.75 บาทหรือ 17.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น

การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของปั๊มบาดาลทำให้ลดเวลาการทำงานและปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น

6. สรุป

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบสูบน้ำบาดาลด้วยวิธีการ DMAIC กรณีศึกษา โรงพยาบาลพ้อท่านคล้ายวาจาสิทธิ์ อำเภอลำลูกเกด จังหวัด นครศรีธรรมราช นั้นสามารถสรุปได้ประเด็นสำคัญ คือ สามารถเพิ่มผลผลิตภาพให้การทำงานของระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลได้ด้วยการติดตั้งเครื่องตั้งเวลา เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ โดยการลดเวลาของขั้นตอนการทำงานจาก 295.45 นาที เป็น 256.95 นาที สามารถลดลงเท่ากับ 38.5 นาที สำหรับผลจากการออกแบบการทดลองก่อนปรับปรุง ปั๊มสูบน้ำบาดาลทำงาน 30.50 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ได้ 15.19 ลูกบาศก์เมตร และภายหลังการปรับปรุงระบบปั๊มสูบน้ำบาดาลเวลาทำงานรวม 11.50 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ได้ 16.11 ลูกบาศก์เมตร สามารถลดเวลาของระบบได้ 19 ชั่วโมง และเพิ่มปริมาณน้ำบาดาลขึ้น 0.92 ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายได้ทั้งค่าไฟฟ้าและค่าน้ำประปาได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวฉนิชนันท์ สระทอง ตำแหน่งเจ้าพนักงานพัสดุชำนาญงาน และบุคลากร โรงพยาบาลพ้อท่านคล้ายวาจาสิทธิ์ทุกท่าน ที่ได้สนับสนุนช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือ สถานที่ และข้อมูลต่าง ๆ แก่ผู้ช่วยวิจัย ขอขอบคุณ นายณัฐภัทร เพชรฤทธิ์ นายศรัณย์ ชูชื่น นายภักพล ราชทองเลิศ นายภคมินทร์ ตัวตั้ง และนายจิรวัฒน์ ชัยศรี ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล และขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุต-

สหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนด้านวิชาการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] World Wide Fund for Nature. “Freshwater.” WWF.or.th.https://www.wwf.or.th/_our_work_th/freshwater_th/ (accessed: Apr. 15, 2022).
- [2] Department of Groundwater Resource. “Groundwater.” dgr.go.th. <http://www.dgr.go.th/th/intro> (accessed: Apr. 15, 2022).
- [3] S. Sornnarindra and S. Sukto, “Reduction of Sewing Thread Stock by DMAIC Concept in Garment Industry,” in *Proc. Industrial Engineering Network Conference 2018*, Ubonratchathani, Thailand, Jul. 23–26, pp. 47–52.
- [4] C. Nakvachiratrakul, K. Pipatpanyanukul, R. Sukhasem and M. Chankham, “Implementing the DMAIC for defect reduction in the aircraft parts manufacturing,” in *Proc. Industry Engineering Network Conference 2018*, Ubonratchathani, Thailand, Jul. 23–26, pp. 227–231.
- [5] K. Wangkhahad and N. Kuptasthien, “Defect reduction in gear production: a case study of motor component manufacturing,” *Journal of Engineering, RMUTT*, vol 2, no. 2, pp. 29–41, 2014.
- [6] P. Panumpai and D. Thawesaengskulthai, “Defect reduction for evaporator product in automotive industry using six sigma approach DMAIC,” *Research and Development Journal*, vol 22, no. 2, pp. 56–64, 2011.
- [7] S. Chitphutthanakul, K. Chantasit, K. Muisee and N. Pongthong, “Solar energy borehole pumps for self-reliance in Anubankohkood school, Trat province,” *Rajabhat Rambhai Barni Research Journal*, vol 13, no. 2, pp. 5–16, 2019.
- [8] R. D. Bothe, “Statistical reason for the 1.5σ Shift,” *Quality Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 479–487, 2002, doi:10.1081/QEN-120001884
- [9] K. Ploypanichcharoen, “Graph methods for presentation,” in *Statistics for Engineering Book 1*, 10th ed., Bangkok, Thailand: Technology Promotion Association (Thai-Japan), 2011, ch. 4, sec. 4.4, pp. 51–100.
- [10] K. Pipatpanyanugoon, “Process analysis and method of works,” in *Work Study*, 2nd ed., Bangkok, Thailand: Metri Publishing House, 1992, ch. 5, sec. 5.2, pp. 55–93.
- [11] P. Saenpakdee, “Fish Bone Diagram & Mind Map®.” prachasan.com. <http://www.prachasan.com/mindmapknowledge/fishbonemm.htm>. (accessed: Aug. 18, 2022)

การทดสอบฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์แบบสองชั้นเพื่อกันความร้อน

Evaluating Double Layer Car Window Films for Heat Protection

พีระเนศ ซึ่งเกิดพงษ์ธนัน^{1,*}, ภูมิ เจือศิริภักดี¹ และสิทธิชัย รัชชชโยธิน¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, เอกเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช,
บางพูน, ปากเกร็ด, นนทบุรี, 11120

Perathanet Suengkerdpongthanant¹, Poom Juasiripukdee¹ and Sitthichai Ruchayosyothin^{1,*}

¹Industrial Technology School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University,

Bang Pood, Pak Kred, Nonthaburi, 11120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: 2629600335@stou.ac.th

Received: Sep 07, 2022; Revised: Mar 06, 2023; Accepted: Mar 27, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการต้านทานความร้อนของฟิล์มกรองแสง โดยการซ้อนทับฟิล์มในรูปแบบผิวสองชั้น เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงอุณหภูมิของฟิล์มกรองแสงชนิดต่าง ๆ ทั้งหมดสามชนิด ได้แก่ ฟิล์มกรองแสงเซรามิก ฟิล์มกรองแสงคาร์บอน และฟิล์มกรองแสงย้อมสี ถึงแม้ว่าฟิล์มกรองแสงชั้นเดียวชนิดเซรามิกจะมีคุณสมบัติการต้านทานการนำความร้อนที่ดีแต่ราคาที่สูง จึงได้ทำการทดสอบแผ่นฟิล์มกรองแสงเกรดที่มีคุณสมบัติต่ำกว่า ราคาที่ถูกกว่า โดยทำการนำแผ่นฟิล์มกรองแสงมาติดซ้อนทับกับสองชั้น แผ่นฟิล์มกรองแสงที่นำมาทดสอบติดทับซ้อนกันสองชั้น มี 2 ชนิด คือ ฟิล์มกรองแสงคาร์บอนและฟิล์มกรองแสงย้อมสี การทดสอบในครั้งนี้ได้ทำการซ้อนทับฟิล์มระหว่างกันเพื่อให้ได้ค่าความเข้มแสงสว่างอัตรา 38 Lux และ 114 Lux โดยมีค่าแสงส่องผ่าน 5% และ 20% ซึ่งพบว่าแผ่นฟิล์มกรองแสงติดทับกันสองชั้นโดยฟิล์มชั้นบนค่าแสงส่องผ่าน 35% ติดซ้อนทับด้วยฟิล์มค่าแสงส่องผ่าน 20% สามารถเพิ่มการต้านทานความร้อนได้ดีกว่าแผ่นฟิล์มกรองแสงชั้นบนค่าแสงส่องผ่าน 20% ติดซ้อนทับด้วยฟิล์มค่าแสงส่องผ่าน 35% คิดเป็น 4.24% และเมื่อพิจารณาค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อน ในกรณีฟิล์มย้อมสีติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสีที่มีค่าการต้านทานความร้อน 9.4°C/W มีอัตราการต้านทานการนำความร้อนต่อต้นทุนน้อยที่สุดที่ 533 บาทต่อหน่วยพื้นที่ต่อค่าความต้านทานการนำความร้อน ทั้งนี้ผลของลำดับการซ้อนทับกันยังมีผลต่อการต้านทานการนำความร้อน โดยเมื่อชั้นบนเป็นฟิล์มย้อมสีจะสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าหากแผ่นฟิล์มชั้นบนเป็นฟิล์มคาร์บอน นอกจากนี้ยังพบว่าการซ้อนทับฟิล์มกรองแสงสองชั้นข้างต้นมีค่าความต้านทานการนำความร้อนมากกว่าชนิดฟิล์มเซรามิกที่มีค่าแสงส่องผ่าน 5% และ 20% อีกด้วย

คำสำคัญ: ฟิล์มกรองแสง, ฟิล์มกันความร้อน, ฟิล์มกระจกรถยนต์, การต้านทานความร้อน, การนำความร้อน

Abstract

This research has studied the thermal resistance of automotive film using double-layer patterns to evaluate the thermal performance of three different types of film materials including ceramic, carbon, and dyed. Although the single-layer ceramic film filter has a good thermal conductivity resistance, but the price is high. Therefore, the lower grade and price of automotive films such as carbon and dyed films were used by overlaying them into a double layer. In this research, the films were overlapped between each other to obtain the luminous intensity of 38 Lux and 114 Lux with a light transmittance of 5% and 20%. The top layer, light

transmittance of 35%, overlaid with a light transmittance film of 20%, can increase thermal resistance better than the top layer of transmittance of 20%, overlaid with a light transmittance film of 35% by 4.24%. Considering the relative cost against thermal conductivity resistance rate, the double layer of dyed films which has the thermal resistance of $9.4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ have the least thermal conductivity resistance per unit cost of 533 bath per unit area. The overlaying order of the films also affects the thermal conductivity resistance. When the top layer is dyed film, it can prevent heat better than carbon film as a top layer. Moreover, the double-layer film patterns mentioned above have a better thermal conductivity resistance than ceramic film with a light transmittance of 5% and 20%.

Keywords: Window film, Heat protection film, Automotive window film, Thermal resistance, Thermal conductivity

1. บทนำ

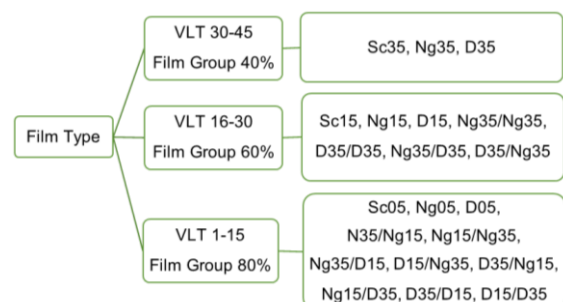
ในปัจจุบันฟิล์มกรองแสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่เจ้าของรถยนต์นิยมติดตั้งเพิ่มเติม จุดประสงค์ของการติดตั้งฟิล์มกรองแสงนั้นเพื่อเพิ่มสภาวะความรู้สึกรบายให้กับผู้ขับขี่และผู้โดยสาร กระจกเป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่นำพาความร้อนภายนอกเข้าสู่ภายในห้องโดยสาร และส่งผลให้เกิดภาระงานที่มากขึ้นของระบบปรับอากาศของรถยนต์ ฟิล์มกรองแสงในยุคปัจจุบันมีสีสวยงามและมีความเข้มแสงให้เลือกอย่างหลากหลาย และยังเป็นการช่วยเพิ่มความโดดเด่นให้กับตัวรถ นอกจากนี้ฟิล์มกรองแสงจะช่วยให้ลดอุณหภูมิความร้อนจากดวงอาทิตย์ และยังช่วยป้องกันการบาดเจ็บต่อดวงตาและผิวหนัง สามารถลดความเสี่ยงของการเป็นต่อกระจก และการเกิดมะเร็งผิวหนังได้ เนื่องจากฟิล์มกรองแสงสามารถลดยูวีได้ถึง 99–100% [1]

การศึกษาในครั้งนี้เกิดขึ้นจากผู้ประกอบการร้านค้าติดตั้งฟิล์มกรองแสง ได้มีการนำเสนอผลิตภัณฑ์โดยแนะนำให้ลูกค้าติดฟิล์มกรองแสงแบบติดทับกันสองชั้น เพื่อเพิ่มความหนา เพิ่มคุณสมบัติในการลดอุณหภูมิและลดการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งเป็นแนวคิดในการป้องกันรังสีความร้อนทะลุผ่านเข้าสู่ห้องโดยสารที่มีผลต่ออุณหภูมิในห้องโดยสาร โดยสมมุติฐานนี้ยังไม่ได้มีผลการวิจัยรองรับ จึงเป็นเหตุผลการเกิดกระบวนการทดสอบในครั้งนี้ เพื่อหาค่าสภาวะการณ์ที่เหมาะสมในการต้านทานความร้อนโดยการซ้อนทับฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ในรูปแบบผิวสองชั้น ผลการทดลองได้มีการเปรียบเทียบรูปแบบการติดฟิล์มกรองแสงที่มีความหนาและราคาที่แตกต่างกัน การศึกษาในครั้งนี้ได้ให้ความสำคัญของการตรวจวัดอุณหภูมิความร้อน ค่าส่องผ่านของแสง โดยใช้เครื่องวัดค่าโดยตรง การทดสอบ

ในครั้งนี้ ทดสอบในตู้ทดสอบที่สร้างขึ้นมาภายในตู้ทดสอบชั้นบนเปรียบเหมือนภายนอกห้องโดยสารรถยนต์ ภายในตู้ชั้นล่างเปรียบเหมือนภายในห้องโดยสารรถยนต์ ทำการทดสอบภายในห้องทดสอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดสอบไว้ที่ 28°C และการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อน

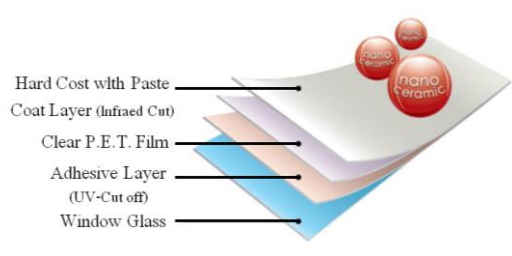
2. อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

ฟิล์มกรองแสงที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ประเภท ดังรายละเอียดที่แสดงดังรูปที่ 1 ได้แก่ ฟิล์มเซรามิก (Sc) ฟิล์มคาร์บอน (Ng) และฟิล์มย้อมสี (D) โดยฟิล์มแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบมีอัตราความเข้มของฟิล์ม 3 ระดับตามค่าความเข้มแสง ดังนี้ ค่าความเข้มแสงอัตราประมาณ 35% จัดเป็นกลุ่มฟิล์มชนิด 40% ค่าความเข้มแสงอัตราประมาณ 20% จัดเป็นกลุ่มฟิล์มชนิด 60% และค่าความเข้มแสงอัตราประมาณ 5% จัดเป็นกลุ่มฟิล์มชนิด 80% เช่น Sc35 คือ ฟิล์มเซรามิกที่มีค่าความเข้มแสงอัตราประมาณ 35% จัดเป็นกลุ่มฟิล์มชนิด 40% หรือ Ng15 คือ ฟิล์มคาร์บอนที่มีค่าความเข้มแสงอัตราประมาณ 20% จัดเป็นกลุ่มฟิล์มชนิด 60% เป็นต้น

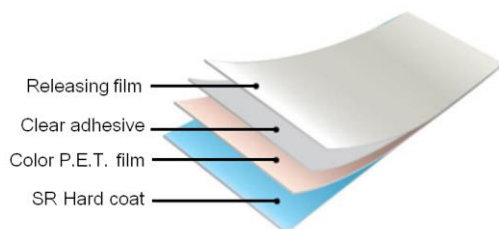


รูปที่ 1 กลุ่มชนิดฟิล์มตามอัตราความเข้มของแสงส่องผ่าน

ฟิล์มเซรามิก และ ฟิล์มคาร์บอนมีโครงสร้างเดียวกันโดยใช้นาโนเทคโนโลยีในการผลิต [2] โดยมีองค์ประกอบดังรูปที่ 2 ส่วนฟิล์มย้อมสี มีองค์ประกอบดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 โครงสร้างฟิล์มเซรามิกและฟิล์มคาร์บอน



รูปที่ 3 โครงสร้างฟิล์มย้อมสี

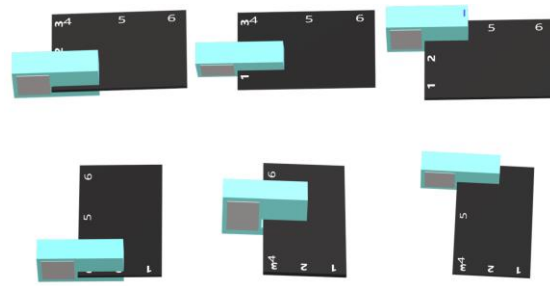
2.1.การดำเนินงานวิจัยและผลการทดสอบ

แบ่งการทดสอบฟิล์มกรองแสง ออกเป็น 2 สภาว 1) ทดสอบฟิล์มด้วยเครื่องวัดแสง และ 2) ทดสอบในตู้ทดสอบ

2.1.1.ขั้นตอนการทดสอบโดยเครื่องวัดแสง

เครื่องวัดแสง (Linshang, Ls163A) มีคุณสมบัติสามารถวัดได้ 3 สัญญาณ คือ 1.ค่าความยาวคลื่นแสง VLT (Visible Light Transmitted) วัดค่าแสงสว่างส่องผ่านในช่วง 380-760 นาโนเมตร 2.ค่าอัลตราไวโอเล็ต UVR (Ultraviolet Rejection) วัดค่าการป้องกันรังสีในช่วง 365 นาโนเมตร 3. ค่าอินฟราเรด IRR (Infrared Rejection) วัดค่าการป้องกันรังสีอินฟราเรดในช่วง 1,400 นาโนเมตร

แผ่นฟิล์มกรองแสงที่นำมาทดสอบทั้ง 9 ชนิด ได้แก่ Sc35, Ng35, D35, Sc15, Ng15, D15, Sc05, Ng05 และ D05 ขนาด 20×40 cm ทำการทดสอบแต่ละชนิด ทำการทดสอบทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบมาคำนวณหาค่าลดความร้อนรวม TSER (Total Solar Energy Rejected) [3] ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1-3



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบฟิล์มกรองแสง

แผ่นฟิล์มกรองแสงที่นำมาทดสอบทั้ง 9 ชนิด มีสองประเภท ได้แก่ ฟิล์มคาร์บอน (Ng) และฟิล์มย้อมสี (D) การทดสอบแบ่งออกเป็นกลุ่มตามค่าความเข้มแสง แบ่งเป็นกลุ่มฟิล์มชนิด 60% มีทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ Ng35/Ng35 D35/D35 Ng35/D35 และ D35/Ng35 และกลุ่มฟิล์มชนิด 80% มีทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ Ng35/Ng15, Ng15/Ng35, Ng35/D15, D15/Ng35, D35/Ng15, Ng15/D35, D35/D15 และ D15/D35 ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบมาคำนวณหาค่าลดความร้อนรวม TSER (Total Solar Energy Rejected) [3] ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1-3

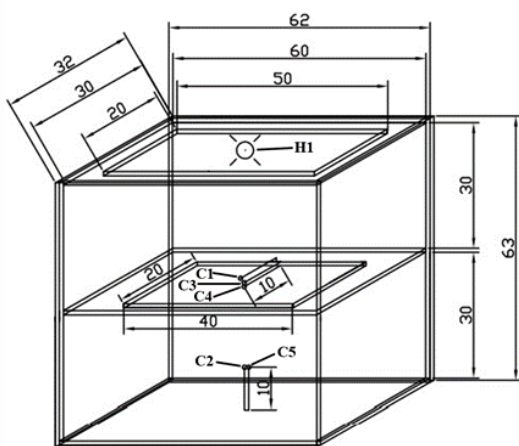
2.1.2.ขั้นตอนการทดสอบแผ่นฟิล์มในตู้ทดสอบ

ทำการทดสอบในตู้ ดังรูปที่ 5 ตู้ทดสอบที่สร้างขึ้นมาได้พัฒนามาจาก [3] ได้ทำการทดสอบแผ่นฟิล์มลดความร้อนติดรถยนต์ โดยจำลองตู้ทดสอบซึ่งเป็นตัวแทนของรถยนต์ที่มีกระจกที่ติดฟิล์มกรองแสง [4] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและปริมาณแสงผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบลูกฟูกและแผ่นสะท้อนความร้อน การทดลองโดยใช้หลอดไฟอินฟราเรด PHILIPS รุ่น 125IR กำลังไฟ 250 watt เพื่อทดแทนดวงอาทิตย์ เพื่อสร้างความร้อนและแสงสว่าง [5] ได้ศึกษาการแผ่รังสีความร้อนภายในห้องโดยสารรถ โดยการทดสอบการจำลองการฉายรังสีความร้อนด้วยแสงอาทิตย์ โดยใช้แหล่งกำเนิดจากหลอดไฟอินฟราเรด 350W ในการทดสอบครั้งนี้เลือกใช้หลอดไฟ PHILIPS InfraRed รุ่น R95 IR 100W (H1) ผลการทดสอบหลอดไฟอินฟราเรด 100W โดยไม่มีแผ่นฟิล์มกรองแสง ค่าความเข้มของแสงที่มีค่าประมาณ 756 Lux ณ ตำแหน่งจุดที่วางแผ่นฟิล์มกรองแสงที่นำมาทดสอบ (C5)

ตู้ทดสอบนี้ มีขนาด $30 \times 60 \times 60$ cm แบ่งเป็น 2 ส่วน ตู้ชั้นบนและตู้ชั้นล่างมีขนาดอย่างละ $30 \times 30 \times 60$ cm ตู้ชั้นบนเปรียบเหมือนภายนอกห้องโดยสารรถยนต์ ภายในตู้ชั้นบนได้ติดตั้งหลอดไฟอินฟราเรด 100 วัตต์ (H1) ด้านบนตรงกลางตู้ทดสอบเพื่อสร้างความร้อนแทนความร้อนจากดวงอาทิตย์ และสร้างแสงสว่างตรงกลางตู้ระหว่างตู้ชั้นบนกับตู้ชั้นล่าง มีช่องว่างขนาด 20×40 cm เพื่อไว้วางแผ่นฟิล์มกรองแสงที่ใช้ในการทดสอบ ส่วนตู้ชั้นล่างเปรียบเสมือนภายในห้องโดยสารรถยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5 ตู้ทดสอบสร้างจากวัสดุชนิดไม้ MDF ลักษณะตู้ทดสอบเป็นตู้ปิดทึบเพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดจากภายนอก

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ อุปกรณ์สำหรับวัดค่าแสง Lux meter (TENMARS, TM-202) หน่วยการวัดเป็นลักซ์ (Lux) และอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ Thermocouple (Elitech, BT-3) หน่วยการวัดเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) จำนวน 4 เครื่อง

ตู้ทดสอบมีเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบ thermocouple type K (Elitech, BT-3) จำนวน 4 ตำแหน่ง ได้แก่ เซ็นเซอร์ภายในตู้ชั้นบน (C1) เซ็นเซอร์ภายในตู้ชั้นล่าง (C2) เซ็นเซอร์ผิวแผ่นฟิล์มด้านบน (C3) และ เซ็นเซอร์ผิวแผ่นฟิล์มด้านล่าง (C4) และเซ็นเซอร์วัดค่าแสงสว่าง (TENMARS, TM-202) จำนวน 1 ตำแหน่ง ได้แก่ เซ็นเซอร์ตู้ชั้นล่าง (C5) ดังแสดงในรูปที่ 5



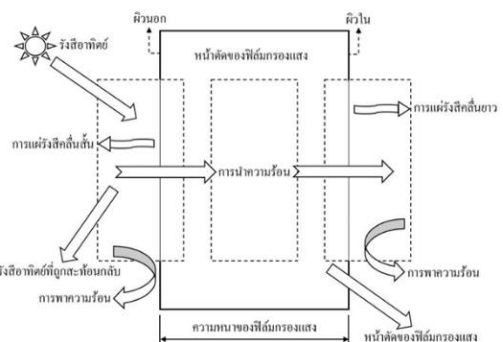
รูปที่ 5 ตู้ทดสอบพร้อมระบุตำแหน่งเซ็นเซอร์ทั้งหมด

2.2. ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบครั้งนี้ทำการทดสอบเฉพาะแผ่นฟิล์มกรองแสง โดยไม่มีการติดตั้งแผ่นฟิล์มกับแผ่นกระจก เนื่องจากต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานความร้อนของแผ่นฟิล์มกรองแสงโดยตรง การทดสอบใช้เวลาทั้งสิ้น 30 นาที โดยเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เริ่มเปิดสวิตช์ไฟส่องสว่างและเก็บข้อมูลทุก 3 นาที จนครบเวลา 30 นาที จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ้างอิงมาทำการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาสภาวะการณ์ที่เหมาะสมในการต้านทานความร้อน ได้ทำการทดสอบตัวอย่างละ 2 การทดสอบ แผ่นฟิล์มที่ใช้ในการทดสอบเป็นแผ่นฟิล์มใหม่ ทั้งแบบแผ่นฟิล์มชั้นเดียวและแผ่นฟิล์มติดทับซ้อนกันสองชั้น

3. ทฤษฎีและการคำนวณ

ทฤษฎีการนำความร้อนจากรังสีอาทิตย์ผ่านฟิล์มกรองแสง [6] ได้ศึกษาประสิทธิภาพความร้อนของฟิล์มป้องกันความร้อนต่างๆ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้เมื่อตำแหน่งสองตำแหน่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน หรือ การเคลื่อนที่ของพลังงานจากโมเลกุลหนึ่งไปอีกโมเลกุลหนึ่งซึ่งอยู่ติดกันไปเรื่อยๆ โดยเคลื่อนจากอุณหภูมิที่สูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งความร้อนที่จะถ่ายเทผ่านวัสดุโดยการนำความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับสภาพการนำความร้อน ของวัสดุและปัจจัยหรือชนิดวัสดุมีผลในการนำความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิผิวทั้งสองด้าน ความหนาของวัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุ ความชื้นของวัสดุ ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การนำความร้อนจากรังสีอาทิตย์ผ่านแผ่นฟิล์มกรองแสง

3.1.การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

จากการที่ผนังของกระบอกรถยนต์ด้านนอกมีการดูดกลืนรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ทำให้เกิดการนำความร้อนสู่ห้องโดยสารรถยนต์ภายใน ดังนั้นสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน thermal conductivity (U) ของฟิล์มกรองแสงแต่ละชนิด โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของ Fourier's law แบบ 1 มิติ ดังสมการที่ (1) [7] ดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อนำค่าการนำความร้อนฟิล์มแต่ละชนิดไปทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานความร้อนของแผ่นฟิล์มกรองแสงแต่ละชนิด

$$q = UA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

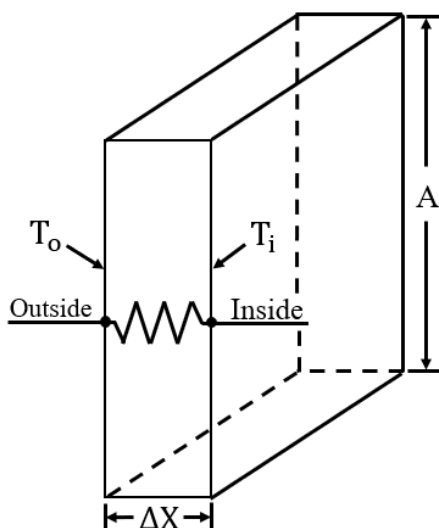
เมื่อ q = ปริมาณความร้อน, วัตต์, (W)

U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ($W/(m \cdot ^\circ C)$)

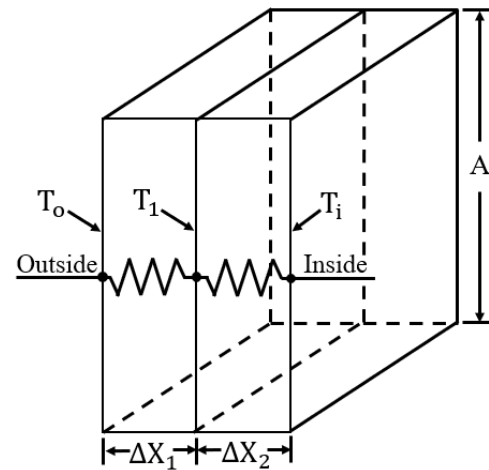
A = พื้นที่แผ่นฟิล์มกรองแสงการถ่ายเทความร้อน, ตารางเมตร (m^2)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวฟิล์มด้านนอก (T_o) ลบ อุณหภูมิผิวฟิล์มด้านใน (T_i), องศาเซลเซียส ($^\circ C$)

Δx = ความหนาของแผ่นฟิล์ม, เมตร (m)



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ตัวแบบแสดงปัญหาการต้านทานความร้อนแบบ 1 มิติ (ก) สำหรับฟิล์มกรองแสงแบบชั้นเดียว และ (ข) สำหรับฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มกรองแสงที่นำมาทดสอบแต่ละชนิดสามารถคำนวณค่าการต้านทานความร้อนของวัสดุ (R_{cd}) ของแผ่นฟิล์มกรองแสงแต่ละชนิด แผ่นฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว จากสมการที่ (2) และค่าการต้านทานความร้อนของวัสดุโดยรวม ($R_{cd,tot}$) สำหรับฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น จากสมการที่ (3)

$$R_{cd} = \frac{x}{kA} \quad (2)$$

$$R_{cd,tot} = \frac{\Delta x_1}{kA_1} + \frac{\Delta x_2}{kA_2} \quad (3)$$

เมื่อ R_{cd} = ค่าการต้านทานความร้อน, องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($^\circ C/W$)

$R_{cd,tot}$ = ค่าการต้านทานความร้อนโดยรวม, องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($^\circ C/W$)

x = ความหนาของแผ่นฟิล์มแต่ละชั้น, เมตร (m)

A = พื้นที่หน้าตัดแผ่นฟิล์มกรองแสงการถ่ายโอนความร้อน, ตารางเมตร (m^2)

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ($W/(m \cdot ^\circ C)$)

เมื่อได้ข้อมูลการทดสอบฟิล์มทุกตัวอย่างแล้ว นำข้อมูลมาทำการคำนวณหาค่าลดความร้อนรวม (Total Solar Energy Rejected, TSER) ค่า TSER หมายถึงค่าตัวเลขที่บอกถึงการต้านพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์คือ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งความยาวคลื่นต่างชนิดกันก็จะส่งพลังงานในรูปแบบที่ต่างกันโดยปกติแสงอาทิตย์ประกอบด้วยรังสี 3 ชนิด ค่าพารามิเตอร์นี้สามารถคำนวณโดยประมาณได้จากการคำนวณเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของ %VLT, %IRR และ %UVR ที่วัดได้โดยกำหนดเป็นค่าโดยประมาณไว้ว่า Solar Energy ประกอบไปด้วย แสงที่มองเห็น (VLR) 44% แสงอินฟราเรด (IRR) 53% และแสงยูวี (UVR) 3% ค่าลดความร้อนรวม [8] คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$TSER = (44 \times VLR) + (53 \times IRR) + (3 \times UVR) \quad (4)$$

เมื่อ TSER = ค่าลดความร้อนรวม, เปอร์เซ็นต์, (%)

VLR = ค่าแสงสว่างส่องผ่าน, เปอร์เซ็นต์, (%)

IRR = ค่าอินฟราเรด, เปอร์เซ็นต์, (%)

UVR = ค่ารังสีอัลตราไวโอเลต, เปอร์เซ็นต์, (%)

3.2.การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ผลการศึกษาฟิล์มกรองแสงทั้ง 3 ชนิดนำมาศึกษามีระดับคุณภาพและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้บริโภคการเลือกติดตั้งฟิล์มกรองแสง [9] เพื่อพิจารณาค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อน คำนวณหาค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนจากสมการที่ (5)

$$V = \frac{C}{R_{cd}} \quad (5)$$

เมื่อ V = ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อน, บาทต่อหน่วยพื้นที่ต่อค่าความต้านทานการนำความร้อน (Baht/(°C/W))

C = ต้นทุนค่าใช้จ่าย, บาท (Baht)

R_{cd} = ค่าการต้านทานความร้อน, องศาเซลเซียสต่อวัตต์ (°C/W)

4. ผลการการศึกษา

4.1.การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

ผลการศึกษาการทดสอบแผ่นฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว กลุ่มฟิล์มชนิด 40% พบว่าฟิล์มเซรามิก (Sc35) มีค่าความต้านทานความร้อนดีที่สุด 7.6°C/W ตามด้วยฟิล์มซอมลี (D35) ค่าความต้านทานความร้อน 7.4°C/W และฟิล์มคาร์บอน (Ng35) ค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุด 7.1°C/W กลุ่มฟิล์มชนิด 60% พบว่าฟิล์มเซรามิก (Sc15) มีค่าความต้านทานความร้อนดีที่สุด 9.1°C/W ตามด้วยฟิล์มซอมลี (D15) ค่าความต้านทานความร้อน 7.7°C/W และฟิล์มคาร์บอน (Ng15) ค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุด 6.6°C/W และกลุ่มฟิล์มชนิด 80% พบว่าฟิล์มเซรามิก (Sc05) มีค่าความต้านทานความร้อนดีที่สุด 9.1°C/W ตามด้วยฟิล์มซอมลี (D05) ค่าความต้านทานความร้อน 8.8°C/W และฟิล์มคาร์บอน (Ng05) ค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุด 5.9°C/W เนื่องจากฟิล์มคาร์บอนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่มากที่สุดซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ (2) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการทดสอบฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว

Film type	VLT (Lux)	VLT (%)	TSER (%)	Heat protection (%)	K (W/m · °C)	$R_{cd,tot}$ (°C/W)
Sc35	264	35	78	15.8	0.00063	7.6
Sc15	134	17	87	16.3	0.00052	9.1
Sc05	49	7	91	16.6	0.00052	9.1
Ng35	263	34	59	13.4	0.00067	7.1
Ng15	122	16	70	13.4	0.00072	6.6

ตารางที่ 1 ข้อมูลการทดสอบฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว (ต่อ)

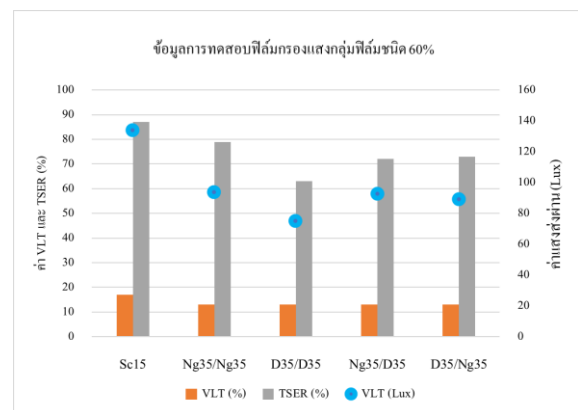
Film type	VLT (Lux)	VLT (%)	TSER (%)	Heat protection (%)	K ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)	$R_{\text{cd,tot}}$ ($^\circ\text{C/W}$)
Ng05	60	8	76	13.1	0.00081	5.9
D35	230	36	44	10.9	0.00064	7.4
D15	105	18	60	11.0	0.00062	7.7
D05	39	7	76	13.8	0.00054	8.8

ผลการศึกษาการป้องกันความร้อนแผ่นฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว กลุ่มฟิล์มชนิด 40%, 60% พบว่าฟิล์มเซรามิก (Sc) สามารถป้องกันความร้อนมากที่สุด (Heat protection) ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน (Ng) และฟิล์มย้อมสี (D) ป้องกันความร้อนได้น้อยที่สุด และกลุ่มฟิล์มชนิด 80% จากการทดสอบพบว่าฟิล์มเซรามิก (Sc05) สามารถป้องกันความร้อนมากที่สุดได้ 16.6% ตามด้วยฟิล์มย้อมสี (D05) ป้องกันความร้อนได้ 13.8% และฟิล์มคาร์บอน (Ng05) ป้องกันความร้อนได้น้อยที่สุด 13.1% เนื่องจากฟิล์มคาร์บอนมีค่าแสงส่องผ่านมากที่สุด และจากการทดสอบพบว่าอัตราความเข้มแสงมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 1

ผลการศึกษาค่าความต้านทานความร้อนแผ่นฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว พบว่าฟิล์มเซรามิกมีค่าความต้านทานความร้อนสูงสุดตามด้วยฟิล์มย้อมสี และฟิล์มคาร์บอน ดังตารางที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ พบว่าฟิล์มที่มีความเข้มแสงสูงจะมีอุณหภูมิผิวด้านในสูง ในทางกลับกันฟิล์มค่าความเข้มแสงต่ำ อุณหภูมิผิวด้านในจะมีค่าต่ำกว่า

ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มติดทับซ้อนกัน 2 ชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 60% ค่าความเข้มแสงอัตราประมาณ 20% พบว่าฟิล์มเซรามิก (Sc15) มีอัตราค่าความเข้มแสงมากที่สุด 134 Lux โดยมีค่าแสงส่องผ่าน 17% ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng35/Ng35) มีอัตราค่าความเข้มแสง 94 Lux โดยมีค่าแสงส่องผ่าน 13% และฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (D35/D35) มีอัตราค่าความเข้มแสงน้อยที่สุด 75 Lux ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 8

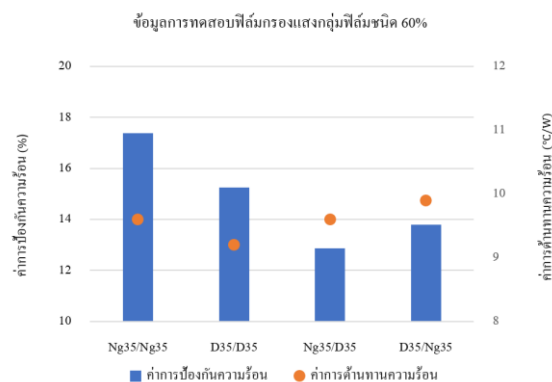
เมื่อพิจารณาค่าลดความร้อนรวม (TSER) ฟิล์มเซรามิก (Sc15) มีค่าลดความร้อนรวมมากที่สุด 87% ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng35/Ng35) มีค่าลดความร้อนรวม 79% และฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (D35/D35) มีค่าลดความร้อนรวมน้อยที่สุด 63% ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 8



รูปที่ 8 ข้อมูลการทดสอบฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น, กลุ่มฟิล์มชนิด 60%

ผลการศึกษาการป้องกันความร้อนแผ่นฟิล์มติดทับซ้อนกัน 2 ชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 60% พบว่าฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (D35/D35) สามารถป้องกันความร้อนมากที่สุดได้ 17.7% ตามด้วยฟิล์มเซรามิก (Sc15) กับฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng35/Ng35) สามารถป้องกันความร้อนเท่ากัน 16.3% และฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% สามารถป้องกันความร้อนน้อยที่สุดได้ 12.9% ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 9

ผลการศึกษาค่าความต้านทานความร้อนแผ่นฟิล์มติดทับซ้อนสองชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 60% จากการทดสอบพบว่าฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (D35/Ng35) มีค่าความต้านทานความร้อนสูงสุด 9.9 °C/W ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng35/Ng35) กับฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (Ng35/D35) มีค่าความต้านทานความร้อนเท่ากันที่ 9.6 °C/W และฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (D35/D35) มีค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุดที่ 9.2 °C/W ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 9



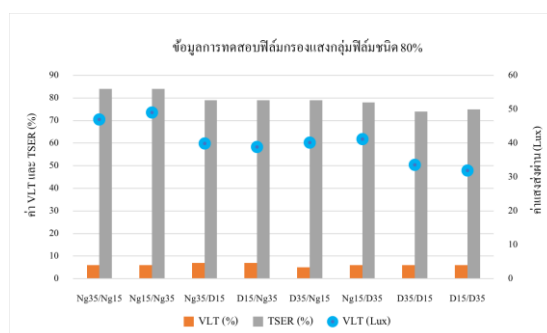
รูปที่ 9 ข้อมูลการทดสอบการป้องกันความร้อน และการต้านทานความร้อน ฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น, กลุ่มฟิล์มชนิด 60%

ตารางที่ 2 ข้อมูลการทดสอบฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น, กลุ่มฟิล์มชนิด 60%

Film type	VLT (Lux)	VLT (%)	TSER (%)	Heat protection (%)	U _{tot} (W/(m ² ·°C))	R _{cd,tot} (°C/W)
Ng35/Ng35	94	13	79	16.3	0.00100	9.6
D35/D35	75	13	63	17.4	0.00103	9.2
Ng35/D35	93	13	72	15.3	0.00100	9.6
D35/Ng35	89	13	73	12.9	0.00096	9.9

ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มติดทับซ้อนกัน 2 ชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 80% ค่าความเข้มแสงอัตราประมาณ 5% พบว่าฟิล์มเซรามิก (Sc05) มีอัตราค่าความเข้มแสงมากที่สุด 38 Lux โดยมีค่าแสงส่องผ่าน 7% ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 60% (Ng35/D15) กับฟิล์มย้อมสี 60% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (D15/Ng35) มีค่าแสงส่องผ่านเท่ากัน และย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 60% (D35/Ng15) มีค่าความเข้มแสงน้อยที่สุด 5% ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 10

เมื่อพิจารณาค่าลดความร้อนรวม (TSER) ฟิล์มเซรามิกมีค่าลดความร้อนรวมมากที่สุด 91% ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน 60% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng15/Ng35) กับฟิล์มคาร์บอน 60% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 60% (Ng35/Ng15) มีค่าลดความร้อนรวมเท่ากัน 84% และฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 60% (D35/D15) มีค่าลดความร้อนรวมน้อยที่สุด 74% ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 10



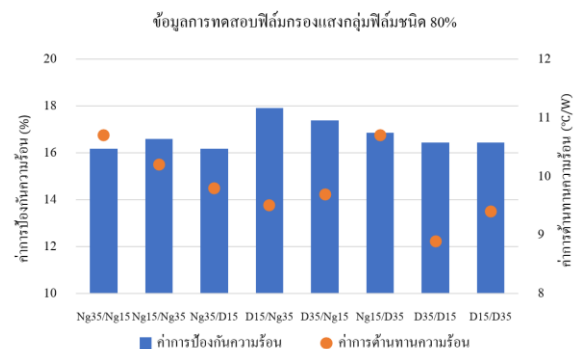
รูปที่ 10 ข้อมูลการทดสอบฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น, กลุ่มฟิล์มชนิด 80%

ผลการศึกษาการป้องกันความร้อนแผ่นฟิล์มติดทับซ้อนกัน 2 ชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 80% พบว่าฟิล์มย้อมสี 60% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (D15/Ng35) สามารถป้องกันความร้อนมากที่สุดได้ 17.9% ตามด้วยฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 60% (D35/Ng15) สามารถป้องกันความร้อนได้ 17.4%, ฟิล์มคาร์บอน 60% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (Ng15/D35) สามารถป้องกันความร้อนได้ 16.9% และฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์ม

คาร์บอน 60% (Ng35/Ng15) กับฟิล์มคาร์บอน 60% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (Ng15/D35) สามารถป้องกันความร้อนที่น้อยที่สุดเท่ากัน 16.2% ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 11

ผลการศึกษาค่าความต้านทานความร้อนแผ่นฟิล์มติดทับซ้อนสองชั้น สำหรับกลุ่มฟิล์มชนิด 80% จากการทดลองพบว่าฟิล์มคาร์บอน 60% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (Ng15/D35) กับฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 60% (Ng35/Ng15) ถึงแม้ว่าอัตราการนำความร้อนสูงสุดของการนำความร้อนผ่านฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์สองชั้นที่มีลำดับสลับกันจะไม่เท่ากัน แต่ความสามารถของการลดค่าความร้อนรวมของลำดับวัสดุมีค่าเท่ากัน ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน 60% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng15/Ng35) มีค่าความต้านทานความร้อน $10.2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ และฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 60% (D35/D15) มีค่า

ความต้านทานความร้อนน้อยที่สุด $8.9^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 11



รูปที่ 11 ข้อมูลการทดสอบการป้องกันความร้อน และการต้านทานความร้อน ฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น, กลุ่มฟิล์มชนิด 80%

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดสอบฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น, กลุ่มฟิล์มชนิด 80%

Film type	VLT (Lux)	VLT (%)	TSER (%)	Heat protection (%)	U_{tot} ($\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$)	$R_{cd,tot}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
Ng35/Ng15	47	6	84	16.2	0.00089	10.7
Ng15/Ng35	49	6	84	16.6	0.00093	10.2
Ng35/D15	40	7	79	16.2	0.00097	9.8
D15/Ng35	39	7	79	17.9	0.00101	9.5
D35/Ng15	40	5	79	17.4	0.00098	9.7
Ng15/D35	41	6	78	16.9	0.00089	10.7
D35/D15	34	6	74	16.5	0.00107	8.9
D15/D35	32	6	75	16.5	0.00102	9.4

4.2.การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ผลการศึกษาราคาทดสอบแผ่นฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว เมื่อพิจารณาค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนเทียบหน่วยพื้นที่ (C/R_{cd}) ซึ่งเป็นเกณฑ์วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าฟิล์มย้อมสีมีอัตราการต้านทานการนำความร้อนต่อต้นทุนน้อยที่สุด ตามด้วยฟิล์มคาร์บอน และฟิล์มเซรามิกมีค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนต่อค่าใช้จ่ายมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนเทียบหน่วยพื้นที่ ฟิล์มชั้นเดียว

Film type	C/R_{cd} (Baht/ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
Sc35	726
Sc15	603
Sc05	603
Ng35	496
Ng15	528
Ng05	598

ตารางที่ 4 ค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนเทียบหน่วยพื้นที่ฟิล์มชั้นเดียว (ต่อ)

Film type	C/R _{cd} (Baht/(°C/W))
D35	338
D15	326
D05	285

ผลการศึกษาค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อน (C/R_{cd}) เทียบหน่วยพื้นที่แผ่นฟิล์มกรองแสงซ้อนทับกันสองชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 60% พบว่าฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (D35/D35) มีอัตราเชิงเศรษฐศาสตร์ที่มีต้นทุนน้อยที่สุดคือ 543 บาทต่อหน่วยพื้นที่ค่าความต้านทานการนำความร้อน ส่วนฟิล์มเซรามิก 60% (Sc15) มีต้นทุนที่ 603 บาทต่อหน่วยพื้นที่ค่าความต้านทานการนำความร้อน และฟิล์มคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng35/Ng35) มีต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนต่อค่าใช้จ่ายมากที่สุด 732 บาทต่อหน่วยพื้นที่ค่าความต้านทานการนำความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนเทียบหน่วยพื้นที่ กลุ่มฟิล์มชนิด 60%

Film type	C/R _{cd} (Baht/(°C/W))
Sc15	603
Nd35/Ng35	732
D35/D35	543
Ng35/D35	628
D35/Ng35	606

ผลการศึกษาค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนเทียบหน่วยพื้นที่ แผ่นฟิล์มกรองแสงซ้อนทับกันสองชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 80% พบว่าฟิล์มย้อมสี 60% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 40% (D15/D35) มีอัตราการต้านทานการนำความร้อนต่อต้นทุนน้อยที่สุดที่ 533 บาท

ต่อหน่วยพื้นที่ต่อค่าความต้านทานการนำความร้อน ตามด้วยคาร์บอน 40% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 60% (Ng35/Ng15) มีต้นทุน 562 บาทต่อหน่วยพื้นที่ต่อค่าความต้านทานการนำความร้อน ฟิล์มเซรามิก 80% (Sc05) มีต้นทุน 603 บาทต่อหน่วยพื้นที่ค่าความต้านทานการนำความร้อน และคาร์บอน 60% ติดทับซ้อนฟิล์มคาร์บอน 40% (Ng15/Ng35) มีค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนมากที่สุด 684 บาทต่อหน่วยพื้นที่ต่อค่าความต้านทานการนำความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนเทียบหน่วยพื้นที่ กลุ่มฟิล์มชนิด 80%

Film type	C/R _{cd} (Baht/(°C/W))
Sc05	603
Ng35/Ng15	562
Ng15/Ng35	684
Ng35/D15	612
D15/Ng35	637
D35/Ng15	617
Ng15/D35	656
D35/D15	564
D15/D35	533

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบความต้านทานความร้อนแผ่นฟิล์มกรองแสงชั้นเดียว ฟิล์มเซรามิกมีค่าความต้านทานร้อนดีที่สุด และพบว่าฟิล์มย้อมสีที่มีราคาถูกกว่าฟิล์มคาร์บอนกลับมีค่าความต้านทานความร้อนดีกว่าฟิล์มคาร์บอนที่มีราคาสูงกว่า เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฟิล์มย้อมสีน้อยกว่าฟิล์มคาร์บอน

จากการทดสอบความต้านทานความร้อนแผ่นฟิล์มเซรามิกชั้นเดียวเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มกรองแสงติดทับซ้อนกันสองชั้น กลุ่มฟิล์มชนิด 60% แผ่นฟิล์มเซรามิก (Sc15) มีค่าความต้านทานร้อนน้อยกว่าแผ่นฟิล์มกรองแสงติดซ้อนทับกับสองชั้น และกลุ่มฟิล์มชนิด 80% แผ่นฟิล์ม

เซรามิก (Sc05) แผ่นฟิล์มเซรามิก (Sc05) มีค่าความต้านทานร้อนน้อยกว่าแผ่นฟิล์มกรองแสงติดซ้อนทับกับสองชั้นทุกตัวอย่าง มีเพียงตัวอย่างเดียวที่ฟิล์มเซรามิกมีค่าความต้านทานความร้อนมากกว่า คือ แผ่นฟิล์มย้อมสี 40% ติดทับซ้อนฟิล์มย้อมสี 60% (D35/D15)

เมื่อพิจารณาค่าสัมพัทธ์ต้นทุนต่ออัตราการต้านทานการนำความร้อนเทียบหน่วยพื้นที่ พบว่ากลุ่มฟิล์มชนิด 60% แผ่นฟิล์มย้อมสี 40% ติดซ้อนทับฟิล์มย้อมสี 40% (D35/D35) มีอัตราการต้านทานการนำความร้อนต่อต้นทุนน้อยที่สุดที่ 543 บาทต่อหน่วยพื้นที่ต่อค่าความต้านทานการนำความร้อน และกลุ่มฟิล์มชนิด 80% แผ่นฟิล์มย้อมสี 60% ติดซ้อนทับฟิล์มย้อมสี 40% (D15/D35) มีอัตราการต้านทานการนำความร้อนต่อต้นทุนน้อยที่สุดที่ 533 บาทต่อหน่วยพื้นที่ต่อค่าความต้านทานการนำความร้อน

เมื่อพิจารณาเรื่องการส่องผ่านของแสง(Lux) จากการทดสอบพบว่า ฟิล์มเซรามิก อาจเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่าแสงส่องผ่านมากกว่าฟิล์มกรองแสงติดซ้อนกันสองชั้นทุกตัวอย่าง ค่าแสงส่องผ่านยิ่งมากยิ่งขึ้นจะทำให้เวลาขับรถตอนเวลากลางคืนมองเห็นได้ชัดเจนมากกว่า ฟิล์มที่มีค่าแสงส่องผ่านน้อย

จากการทดลองนี้ เมื่อพิจารณาตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับความสามารถในการป้องกันความร้อน และวิทัศน์วิสัยที่ดีในการขับขี่สำหรับรถยนต์ที่ไม่ได้ติดตั้งฟิล์มกรองแสงมาก่อน ฟิล์มเซรามิก 1 ชั้น ถือได้ว่าเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าต้านทานความร้อนที่ดีและการป้องกันความร้อนได้ดี แต่สำหรับรถยนต์ที่มีการติดตั้งฟิล์มกรองแสงอยู่แล้ว การติดตั้งฟิล์มกรองแสงฟิล์มย้อมสีหรือฟิล์มคาร์บอน ในกลุ่มฟิล์มชนิด 40% และ กลุ่มฟิล์มชนิด 60% จะช่วยลดค่าใช้จ่าย และทำให้ค่าความต้านทานความร้อนมากขึ้น

การตัดสินใจการเลือกติดตั้งฟิล์มกรองแสงยังมีปัจจัยอื่นในการพิจารณา เช่น ค่าแสงส่องผ่าน สีของฟิล์มกรองแสง อายุการใช้งาน ราคา การรับประกัน การติดตั้งฟิล์มกรองแสงทับซ้อนกันสองชั้น ทางบริษัทจะถือว่าหมดประกันโดยมีผู้จัดจำหน่ายหลายบริษัทได้แจ้งไว้ในเงื่อนไข

รับประกันสินค้า เรื่องการรบกวนสัญญาณโทรศัพท์ และสัญญาณ GPS เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำรวมถึงให้กำลังใจจาก ดร.สิทธิชัย รัชชโยธิน ประธานกรรมการประจำสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูมิ เจือศิริภักดี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช และอาจารย์อัสสุรณณ์ แก้วกิตติชัย บริษัท ร็อคเวลด์ ครีเอเทอร์ จำกัด

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัย สุโขทัยธรรมาธิราช เพื่อนักศึกษาและผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ชื่องในการทำวิจัยครั้งนี้ทุกท่านที่ได้กรุณาให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และครอบคลุมที่คอยให้กำลังใจตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Window Film Association (IWFA). "About Window Film." IWFA.com. <https://www.iwfa.com/about-window-film> (accessed: Sep. 26, 2022).
- [2] Thai Window Film. "Knowledge of optical film." thaiwindowfilm.com. <https://www.thaiwindowfilm.com> (accessed: Sep. 26, 2022).
- [3] K. Wiriyaprasat, "Car Heat Reduction Film Test." chaladsue.com. <https://chaladsue.com/article/2606> (accessed Sep. 26, 2022).
- [4] T. Bunnag, R. Suwanmani and R. Sananaa, "Heat transfer and light transmission through polycarbonate corrugated and double layer reflective aluminium," *Suthiparithat Journal*, vol. 19 no. 57, pp. 94–108, 2005.
- [5] C. -Y. Tseng, Y. -A. Yan and J. C. Leong, "Thermal Accumulation in a General Car Cabin Model," *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, vol. 1, pp. 48–56, 2014, doi: 10.11159/jffhmt.2014.008.

-
- [6] T. Kiawpan, "Study of Thermal Performance of Various Heat Protection Films for Vehicles," M.E thesis, Dept. Energy Management Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2014.
- [7] T. Bunnag, "A Study of Heat and Light transmission through Windows of Building," Faculty of Engineering, Dhurakijpundit University, Bangkok, Thailand, Final Rep., 2004.
- [8] EDL Co., Ltd. "Basic film parameters/properties you should know." [kontrast.in.th. https://kontrast.in.th/technology/parameter](https://kontrast.in.th/technology/parameter) (accessed Sep. 26, 2022)
- [9] T. Srisilpsophon, "Influence of Solar Filter Film on Mean Radiant Temperature and Heat Transfer Phenomenon in Vehicle Cabin," Ph.D. Thesis, Dept. Thermal Tech., King Mongkut's Univ. of Tech. Thonburi, Bangkok, Thailand, 2006.

พฤติกรรมโก่งเดาะของคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉากที่มีจุด รองรับแบบคานยื่น

Buckling Behavior of Cantilevered Pultruded Fiber-Reinforced Plastic Angle Beams

จักษดา ฐำรงวุฒิ^{1,*}, คีตาณูชลี ชายทวีป¹, สัทธิชัย แสงอาทิตย์², ชานูชัย เจาะปก¹
ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี¹ และ จิรศักดิ์ สุพรหมวัน¹

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ในเมือง นครราชสีมา นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
สุรนารี เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

Jaksada Thumrongvut^{1,*}, Keetalchalee Chaytaweep¹, Sittichai Seangatith², Chanchai Ngohpok¹,
Saksith Pantawee¹ and Jeerasak Supromwan¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,
Nai-Muang, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Suranaree, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: jaksada.th@rmuti.ac.th

Received: Sep 30, 2022; Revised: Mar 28, 2023; Accepted: Mar 30, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉากรูปตัว L แบบขาเท่ากันที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น โดยศึกษาพฤติกรรมโก่งเดาะของคานหน้าตัดฉากภายใต้แรงกระทำแบบจุดที่ปลายคาน จากนั้นน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้จะถูกเปรียบเทียบกับน้ำหนักโก่งเดาะที่คำนวณจากสมการออกแบบของ AISC-LRFD เพื่อประเมินความเหมาะสมของสมการ ตัวอย่างคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉากที่ใช้ทดสอบถูกผลิตจากเส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ โดยวิธีพัลทูดหน้าตัดมี 3 ขนาด ได้แก่ 50×6.4 mm 76×6.4 mm และ 102×6.4 mm โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างในช่วงระหว่าง 10–50 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและระยะการแอ่นตัวพบว่า พฤติกรรมของตัวอย่างคานมีลักษณะแบบเชิงเส้นถึงค่าประมาณ 90–95% ของน้ำหนักโก่งเดาะ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเป็นการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ สมการออกแบบของ AISC-LRFD ไม่เหมาะสมสำหรับทำนายน้ำหนักโก่งเดาะของคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดฉาก สุดท้าย ตัวประกอบปรับแก้ที่เหมาะสมถูกนำเสนอสำหรับการคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะของคาน

คำสำคัญ: พลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูด, หน้าตัดฉาก, จุดรองรับแบบคานยื่น, พัลทูดชัน

Abstract

In this article, the experimental findings of cantilever beam testing of pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) angle sections are described. The buckling behaviors of PFRP angle section beams under tip concentrated loads are studied. Then, the experimental buckling loads are compared to the critical buckling loads predicted utilizing the AISC-LRFD design equation to evaluate the validity of the equation. The E-glass fiber-reinforced and polyester-resin-based PFRP angle beams tested in this investigation were produced using the pultrusion method. The beams had three different geometries: 50×6.4 mm, 76×6.4 mm, and 102×6.4 mm, and had span-to-width ratios ranging from 10 to 50. According to the load-deformation curves, the specimens have linear elastic responses to 90–95% of their buckling loads. The lateral-torsional buckling is the failure mode of the specimens. According to the findings of the tests, the AISC-LRFD equation provides an unsatisfactory prediction of the critical buckling loads of the pultruded FRP cantilever angle beams. Finally, an appropriate modification factor is provided to compute the buckling loads of PFRP angle beams.

Keywords: Pultruded Fiber-Reinforced Plastic (PFRP), Angle Section, Cantilever Beam, Pultrusion

1. บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชัน (Pultruded Fiber-reinforced Plastic; PFRP) คือ วัสดุประกอบที่ผลิตจากเส้นใยแก้วที่มีความสามารถรับแรงดึงสูง เส้นใยแก้วถูกผสมผสานเข้ากับวัสดุเชื่อมประสานจำพวกเรซิน (Resin) เช่น พลาสติกที่ถูกทำให้แข็งตัวด้วยความร้อน ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และ ไวนิลเอสเตอร์ (Vinylester) เป็นต้น โดยที่วัสดุทั้งสองชนิดยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเหมือนเดิม แต่คุณสมบัติของวัสดุผสมจะแตกต่างจากวัสดุพื้นฐานทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน [1] นอกจากนี้ วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับวัสดุประเภทที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (Linear elastic to failure) โดยมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนสูง [2–3] ดังนั้น การเลือกรูปของชิ้นส่วนโครงสร้างจึงเป็นข้อกำหนดเบื้องต้นที่ควบคุมการออกแบบ [4–5] วัสดุ PFRP มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีเชิงวิศวกรรมโยธา ได้แก่ น้ำหนักเบา อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมี ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน [6–10] สามารถออกแบบและผลิตให้เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การใช้งานในแต่ละงานได้ โดยการเลือกชนิดของเรซิน เส้นใย และกำหนดทิศทางของการวางตัวของเส้นใย

ชิ้นส่วนหน้าตัดโครงสร้าง (Structural profile) ที่ทำจากวัสดุ PFRP ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างในต่างประเทศไม่ต่ำกว่า 30 ปี โดยเฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกาและแถบยุโรป [11] วัสดุ PFRP ถูกนำไปใช้ในโครงสร้างบางประเภท ตัวอย่างเช่น โรงงานบำบัดน้ำเสีย หอทำความเย็น และโรงงานอุตสาหกรรมเคมี หรือโครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่งที่เกิดการกัดกร่อนโดยคลอไรด์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่วิศวกรผู้ออกแบบยังไม่นำวัสดุ PFRP มาทดแทนเหล็กรูปพรรณในงานเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้างมากนัก เนื่องจากเหตุผลหลายประการ เช่น ขาดความเข้าใจพฤติกรรมทางกลของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP ตลอดจนขาดวิธีการออกแบบ กฎเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนที่ได้มาตรฐาน [12–14] และหนึ่งในชิ้นส่วนหน้าตัดโครงสร้างที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม ได้แก่ หน้าตัดฉาก (Angle section) โดยถูกประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น คานชอย โครงสร้างค้ำยัน และระบบโครงข้อหมุน เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีนักวิจัยได้ทำการศึกษาความพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชันหน้าตัดรูปต่าง ๆ ภายใต้อิทธิพลแรงดึง เช่น WF (Wide flange), I และ C (Channel) เป็นต้น [15–20] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมทางโครงสร้างสำหรับคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชันหน้าตัดฉากยังมีจำนวนน้อย เมื่อเปรียบเทียบ

กับหน้าตัดอื่น ๆ [21–23] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดศึกษาตรวจสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดซ์หน้าตัดฉากที่มีจากรองรับแบบคานยื่นโดยเน้นพฤติกรรมโก่งคดภายใต้แรงดัดที่มีผู้ศึกษาไม่มากนัก

2. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

2.1 ตัวอย่างการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ พลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว ที่ถูกผลิตโดยวิธีพัลทูดซ์ หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (FRP) โดยมีส่วนประกอบหลักคือ เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างหน้าตัดฉากมี 3 ขนาด ได้แก่ 50×6.4 mm 76×6.4

mm และ 102×6.4 mm ตารางที่ 1 แสดงมิติและพิสัยของหน้าตัดฉากที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด (geometric properties) โดยตัวอย่างทดสอบจำนวน 30 ตัวอย่างมีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างจากรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b) อยู่ในช่วงระหว่าง 10–50 โดยสัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ LXX-C-YY ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการต่อไปนี้ LXX หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดฉากที่มีความกว้างในหน่วย mm C หมายถึง ลักษณะของจากรองรับแบบคานยื่น และสุดท้าย YY หมายถึง ความยาวของตัวอย่างทดสอบในหน่วย m รูปที่ 1 แสดงลักษณะหน้าตัดฉากของคาน FRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 1 รายละเอียดและสมบัติของหน้าตัดฉาก

Specimens	$b \times t$ (mm $\times$ mm)	L (m)	L/b	y_w (mm)	y_z (mm)	$I_x = I_y$ (mm ⁴)	I_z (mm ⁴)	I_w (mm ⁴)
L50-C-0.5	50.8×6.35	0.5	9.8	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-1.0	50.8×6.35	1.0	19.7	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-1.5	50.8×6.35	1.5	29.5	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-2.0	50.8×6.35	2.0	39.4	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L50-C-2.5	50.8×6.35	2.5	49.2	35.4	21.2	144,680	59,416	229,944
L76-C-1.0	76.2×6.35	1.0	13.1	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-1.5	76.2×6.35	1.5	19.7	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-2.0	76.2×6.35	2.0	26.2	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-2.5	76.2×6.35	2.5	32.8	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L76-C-3.0	76.2×6.35	3.0	39.4	53.7	30.3	517,890	200,315	835,465
L102-C-1.0	101.6×6.35	1.0	9.8	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-1.5	101.6×6.35	1.5	14.8	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-2.0	101.6×6.35	2.0	19.7	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-2.5	101.6×6.35	2.5	24.6	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107
L102-C-3.0	101.6×6.35	3.0	29.5	72.1	39.3	1,265,060	505,013	2,025,107

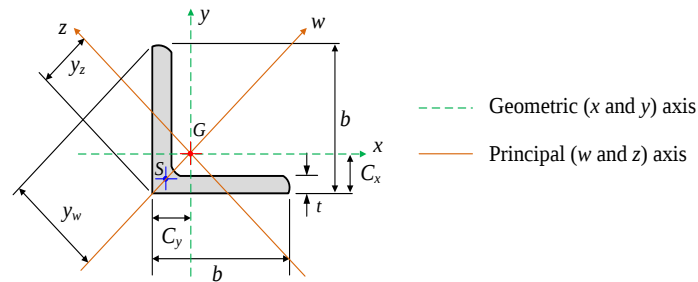
การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ FRP หน้าตัดฉากเพื่อกำหนดรับแรงดึงตามแนวแกน (F_L) และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย (E_L) กระทำตาม

มาตรฐาน ASTM D 3039 [24] จากการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงดึงตามแนวแกนเฉลี่ยและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 218 MPa และ 17.5 GPa ตามลำดับ

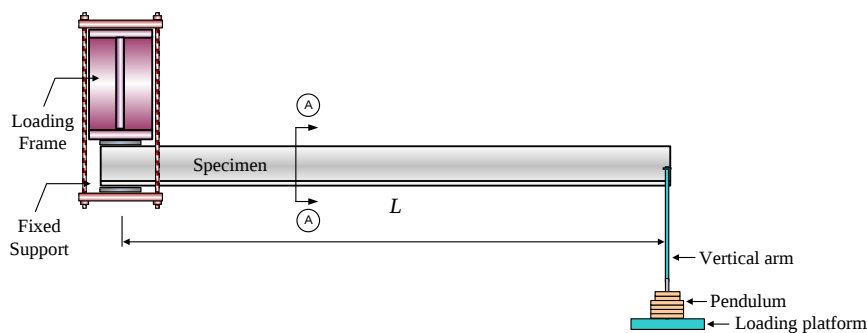
2.2 การทดสอบตัวอย่างคาน

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบคาน PFRP เข้ากับจตุรรองรับแบบคานอื่น โดยใช้แท่งไม้เซาะร่องขนาดเท่ากับหน้าตัดฉากที่ใช้ทดสอบในแต่ละขนาด เมื่อนำตัวอย่างคาน PFRP ติดตั้งเข้ากับร่องดังกล่าวและนำแท่งไม้ไปยึดเข้ากับ Universal Testing Machine (UTM) เพื่อจำลองปลายดังกล่าวให้มีลักษณะเสมือนจตุรรองรับแบบขึ้นแน่น (fixed support) ส่วนปลายด้านอื่นแบบอิสระ (free end) ติดตั้งชุดให้แรงกระทำเพื่อให้แรงกระทำผ่านเอวของหน้าตัดที่จุด S และสอดคล้องกับการก่อสร้างจริงของคาน PFRP แบบคานอื่นที่ถูกยึดต่อเข้ากับชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ ที่ปีกหรือเอวของหน้าตัดด้วยสลัก

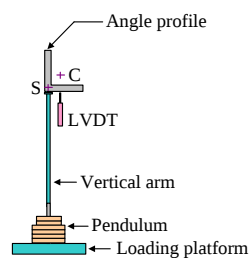
เกลียวและถูกกระทำผ่านจุดยึดดังกล่าว [1] สำหรับการแอนตัวแนวตั้งของคานถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) ติดตั้งที่ปลายคานด้านหนึ่งบริเวณปีกด้านล่างของหน้าตัด เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตรวจสอบความตรงในแนวราบของตัวอย่างคานโดยใช้ระดับน้ำเพื่อเตรียมความพร้อมของตัวอย่าง จากนั้น ทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างต่อเนื่องโดยตุ้มน้ำหนัก (ตุ้มน้ำหนักเหล็กที่ให้แรงกระทำมีค่าน้ำหนักอยู่ในช่วงระหว่าง 10, 5, 2, 1, 0.2 และ 0.1 kg) อุปกรณ์ KYOWA EDX-10 Series Data Acquisition ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลตลอดการทดสอบ จนตัวอย่างคานเกิดการวิบัติ



รูปที่ 1 ลักษณะคาน PFRP หน้าตัดฉาก



(a) Schematic view of PFRP angle beams with tip point load : Cantilever beam support



(b) Load application system (section A-A)

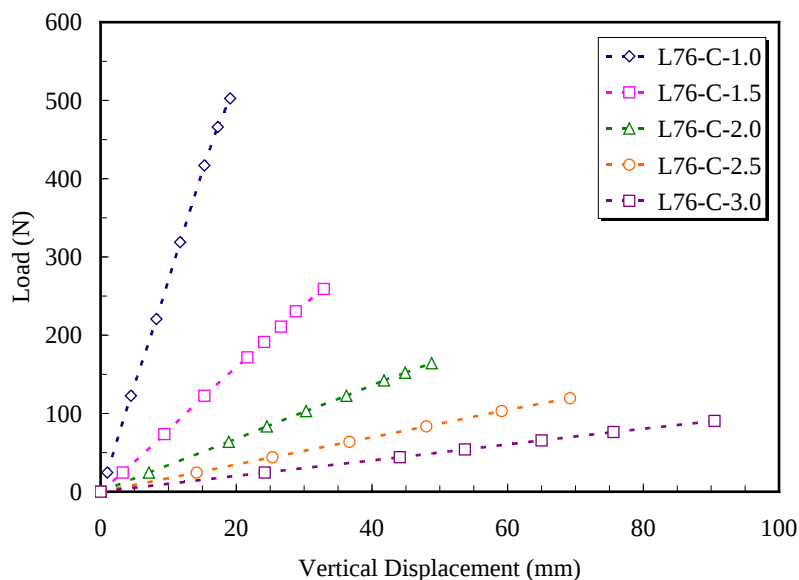
รูปที่ 2 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจตุรรองรับแบบคานอื่น

3. ผลทดสอบและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมโก่งเดาะและลักษณะการวิบัติ

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่งภายใต้แรงคด จากรูปพบว่า พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างทดสอบในแนวดิ่งมีลักษณะเชิงเส้นถึงประมาณ 90–95% ของน้ำหนักโก่งเดาะ (Buckling load) จากนั้น พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อยจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยมีลักษณะพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างคาน Pultruded Fiber-reinforced Plastic (PFRP) หน้าตัดรูปร่างนี้ที่ถูกทดสอบโดย

Thumrongvut and Seangatith [6] และ Shan and Qiao [16] ลักษณะการวิบัติโดยรวมของคาน PFRP ทั้ง 3 หน้าตัดภายใต้แรงคดเป็นการวิบัติแบบเสียดสีรภาพในรูปแบบการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด (Lateral-torsional buckling) โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างและการบิดพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบนี้สอดคล้องกับตัวอย่างทดสอบมีความชะลูด (L/b) สูง และทำให้ไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุและการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกของหน้าตัด โดยตัวอย่างคานที่มีความชะลูดมากกว่ามีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างคานที่มีความชะลูดน้อยกว่า [18],[25]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง

3.2 น้ำหนักโก่งเดาะและสมการ AISC-LRFD

ในบทความนี้กำหนดให้น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ (P_{EXP}) เป็นน้ำหนักบรรทุกสุดท้ายก่อนที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติในรูปแบบการโก่งเดาะ รูปที่ 5 แสดงแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างจุดรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b) ภายใต้แรงคด จากรูปพบว่า เมื่ออัตราส่วนระยะห่างระหว่างจุดรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b) ลดลง ส่งผลให้น้ำหนักโก่งเดาะของตัวอย่างคาน

PFRP มีค่าเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thumrongvut and Seangatith [1] และ Shan and Qiao [5]

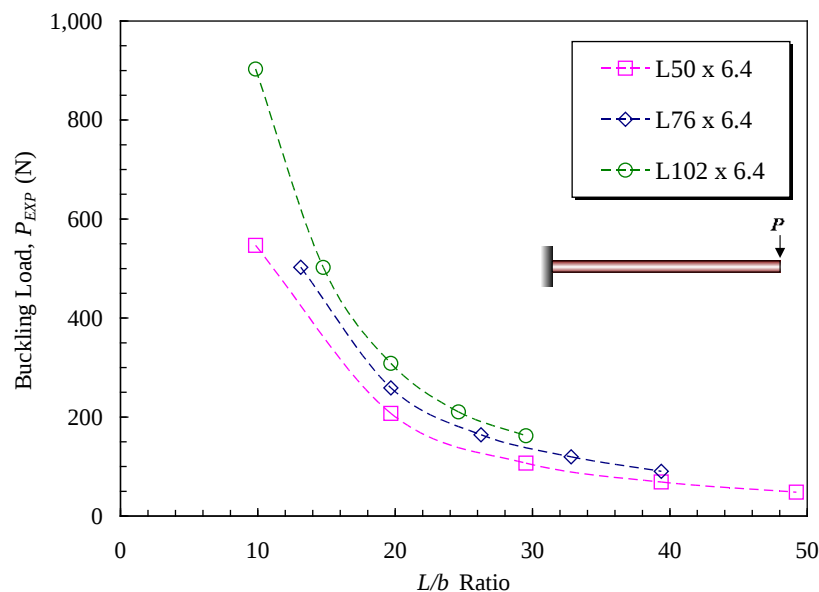
จากนั้นพิจารณาน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ (P_{EXP}) เปรียบเทียบกับสมการสำหรับคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะของชิ้นส่วนหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC) โดยวิธี Load and Resistance Factored Design (LRFD) ซึ่งสาเหตุที่ใช้สมการของ AISC-LRFD สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบ เนื่องจากวิธี LRFD มีการนำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาเป็นข้อมูลสำหรับการพิจารณาคำนวณ

ในส่วนของความต้านทาน (resistance) ของชิ้นส่วนโครงสร้างมากขึ้น (กำหนดสมการเพื่อใช้ในการคำนวณ) กล่าวคือ พฤติกรรมของโครงสร้างที่คำนวณจากวิธี LRFD มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างมากกว่าพฤติกรรมของโครงสร้างที่คำนวณจากวิธี

Allowable Stress Design (ASD) นอกจากนี้ จากวิจัยตั้งแต่ ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา ผลการทดสอบชิ้นส่วนจากวัสดุ FRP จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธี LRFD เป็นส่วนมาก [11],[22],[26],[27]



รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของคาน FRP หน้าตัดฉากที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างจุดรองรับต่อความกว้างของหน้าตัด (L/b)

มาตรฐานออกแบบของ American Institute of Steel Construction (AISC) โดยวิธี LRFD (AISC-LRFD) [26] ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะของชิ้นส่วนหน้าตัดฉาก (Single-angle member) ที่ถูกแรงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (Shear center) ของหน้าตัด โดย

น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น (Cantilevered configuration) สามารถคำนวณได้จากสมการปฏิสัมพันธ์ของผลรวมกำลังของแกนหลัก (principal axis) 2 แกน (รูปที่ 1) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$P_{LRFD} = \frac{\phi\sqrt{2}}{L} \left(\frac{1}{1/M_{nz} + 1/M_{nw}} \right) \quad (1)$$

โดยที่ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงดัด มีค่าเท่ากับ 0.90
 M_{nw} และ M_{nz} คือ กำลังรับแรงดัดรอบแกนหลัก (major axis)

และกำลังรับแรงดัดรอบแกนรอง (Minor axis) ตามลำดับ ดัง
 แสดงใน AISC-LRFD [28] (หัวข้อที่ 5.3.1) โดยน้ำหนักโก่ง
 เคาะของชิ้นส่วนหน้าตัดฉากที่คำนวณได้จากสมการ
 ออกแบบของ AISC-LRFD (P_{LRFD}) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 น้ำหนักโก่งเคาะและการเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD

Specimens	$b \times t$ (mm $\times$ mm)	L (m)	L/b	P_{EXP} (N)	P_{LRFD} (N)	$\frac{P_{EXP}}{P_{LRFD}}$
L50-C-0.5	50.8 $\times$ 6.35	0.5	9.8	546.7	1,186.3	0.46
L50-C-1.0	50.8 $\times$ 6.35	1.0	19.7	207.3	460.1	0.45
L50-C-1.5	50.8 $\times$ 6.35	1.5	29.5	106.8	248.9	0.43
L50-C-2.0	50.8 $\times$ 6.35	2.0	39.4	68.8	157.0	0.44
L50-C-2.5	50.8 $\times$ 6.35	2.5	49.2	48.1	108.3	0.44
L76-C-1.0	76.2 $\times$ 6.35	1.0	13.1	502.6	1,062.6	0.47
L76-C-1.5	76.2 $\times$ 6.35	1.5	19.7	259.0	571.9	0.45
L76-C-2.0	76.2 $\times$ 6.35	2.0	26.2	164.2	359.4	0.46
L76-C-2.5	76.2 $\times$ 6.35	2.5	32.8	119.5	247.3	0.48
L76-C-3.0	76.2 $\times$ 6.35	3.0	39.4	90.4	180.8	0.50
L102-C-1.0	101.6 $\times$ 6.35	1.0	9.8	902.9	1,968.8	0.46
L102-C-1.5	101.6 $\times$ 6.35	1.5	14.8	502.2	1,051.0	0.48
L102-C-2.0	101.6 $\times$ 6.35	2.0	19.7	308.4	656.8	0.47
L102-C-2.5	101.6 $\times$ 6.35	2.5	24.6	210.2	450.2	0.47
L102-C-3.0	101.6 $\times$ 6.35	3.0	29.5	162.2	328.2	0.49

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบและผลการคำนวณจาก
 สมการออกแบบชิ้นส่วนหน้าตัดฉากของ AISC-LRFD
 โดยเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเคาะที่ได้จากการ
 ทดสอบ (P_{EXP}) และสมการออกแบบของ AISC-LRFD
 (P_{LRFD}) จากตารางพบว่า อัตราส่วนของน้ำหนักโก่งเคาะที่
 ได้จากการทดสอบและสมการออกแบบของ AISC-LRFD
 (P_{EXP}/P_{LRFD}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.43–0.46 สำหรับ
 คาน PFRP หน้าตัด 50 $\times$ 6.4 mm ในทำนองเดียวกันสำหรับ
 คาน PFRP หน้าตัด 76 $\times$ 6.4 mm และ 102 $\times$ 6.4 mm มี
 อัตราส่วน P_{EXP}/P_{LRFD} อยู่ในช่วงระหว่าง 0.45–0.50 และ
 0.46–0.49 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสมการออกแบบของ
 AISC-LRFD ทำนายน้ำหนักโก่งเคาะสูงกว่าผลการ

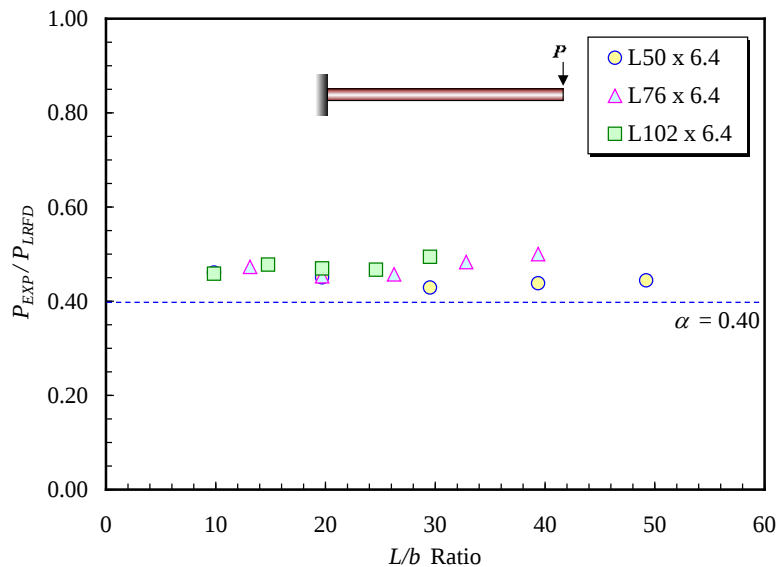
ทดสอบประมาณ 50–57% โดยหนึ่งในสาเหตุหลักมาจาก
 วัสดุ PFRP มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 17.5
 GPa ซึ่งมีความน้อยกว่าเหล็กโครงสร้างที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
 เชิงดิ่งเฉลี่ยประมาณ 200 GPa จึงทำให้มีการดัดตัวที่สูงอีก
 ด้วย จึงเป็นผลทำให้คาน PFRP เกิดการวิบัติแบบ Lateral-
 torsional buckling ได้ง่ายกว่าในเหล็กโครงสร้าง โดย
 ผลกระทบเรื่องนี้ควรได้มีการศึกษาต่อไปในอนาคต ดังนั้น
 ในเบื้องต้นนี้ สมการดังกล่าวควรถูกปรับแก้เพื่อความ
 เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในวัสดุ PFRP หน้าตัด
 ฉากภายใต้แรงดัด

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน
 P_{EXP}/P_{LRFD} และอัตราส่วน L/b จากรูปพบว่า อัตราส่วน

P_{EXP}/P_{LRFD} ทั้งหมดมีค่าในช่วงระหว่าง 0.43–0.50 เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานตัวประกอบปรับแก้ (modification factor; α) ที่เหมาะสมถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.40 ดังนั้นสมการปรับแก้ของ AISC-LRFD สามารถ

คำนวณได้ดังสมการที่ (2)

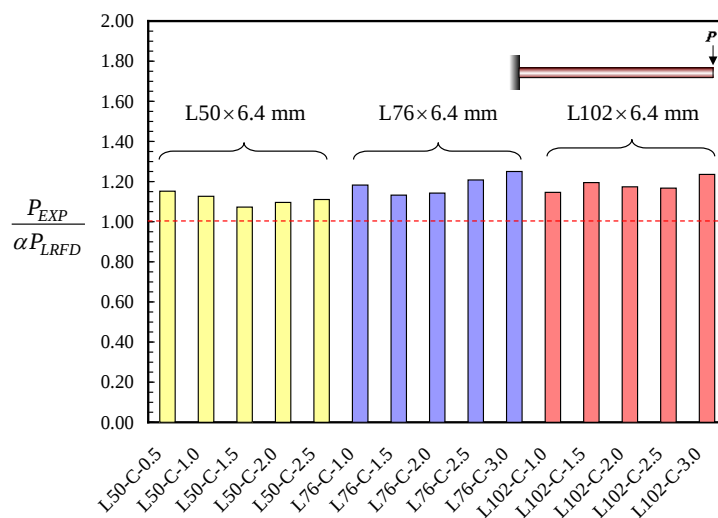
$$P_{mo,LRFD} = \alpha P_{LRFD} \quad (2)$$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน P_{EXP}/P_{LRFD} และอัตราส่วน L/b

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบและสมการปรับแก้ของ AISC-LRFD ($P_{mo,LRFD}$) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า อัตราส่วน $P_{EXP}/P_{mo,LRFD}$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.16 ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation; COV) เท่ากับ 0.043 โดยอัตราส่วน $P_{EXP}/P_{mo,LRFD}$ มีค่ามากกว่า 1.00 แสดงให้เห็น

ว่าน้ำหนักโก่งเดาะที่คำนวณได้จากสมการปรับแก้ของมาตรฐานออกแบบของ American Institute of Steel Construction (AISC) โดยวิธี LRFD ที่ถูกนำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินน้ำหนักโก่งเดาะของคาน FRP หน้าตัดฉากที่มีจุดรองรับแบบคานยื่นภายใต้แรงดัดได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 7 เปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบและสมการปรับแก้ของ AISC-LRFD

4. สรุปผล

1) พฤติกรรมรับน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แนวโค้งของตัวอย่างคาน Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) มีลักษณะแบบเชิงเส้นถึงค่าประมาณ 90-95% ของ น้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้น พฤติกรรมของตัวอย่างจะ เปลี่ยนแปลงแบบไร้เชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

2) ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคานเป็นการโก่งเดาะ ด้านข้างจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างและการบิดในเวลาเดียวกัน โดยน้ำหนักโก่งเดาะของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน L/b มีค่าเพิ่มขึ้น

3) เนื่องด้วยการทดสอบนี้มีตำแหน่งแรงกระทำที่ ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงของการก่อสร้างคาน PFRP แบบยื่น และการที่วัสดุ PFRP มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง น้อยกว่าเหล็กโครงสร้างราว 11.4 เท่า ดังนั้น สมการ ออกแบบชิ้นส่วนหน้าตัดฉากของ AISC-LRFD จึงไม่ เหมาะสำหรับทำนายน้ำหนักโก่งเดาะของคาน PFRP หน้า ตัดฉากโดยตรง ดังนั้น ในเบื้องต้น ผู้วิจัยจึงเสนอตัว ประกอบปรับแก้ที่เหมาะสม (modification factor) เท่ากับ 0.40 โดยพบว่า น้ำหนักโก่งเดาะที่คำนวณได้จากสมการ ปรับแก้ของ AISC-LRFD สามารถประเมินน้ำหนักโก่ง เดาะของคาน PFRP หน้าตัดฉากที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น ภายใต้อิทธิพลแรงคดได้อย่างปลอดภัย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน จาก สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่สัญญา FRB650059-NMA-20

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Thumrongvut and S. Seangatith, "Experimental Study on Lateral-Torsional Buckling of PFRP Cantilevered Channel Beams," *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 2438–2445, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.306.
- [2] R. J. Brooks and G. J. Turvey, "Lateral Buckling of Pultruded GRP I-Section Cantilevers," *Composite Structures*, vol. 32, no. 1–4, pp. 203–215, 1995, doi: 10.1016/0263-8223(95)00018-6.
- [3] L. Xie, Y. Bai, Y. Qi, C. Caprani and H. Wang, "Effect of Width-Thickness Ratio on Capacity of Pultruded Square Hollow Polymer Columns," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 171, no. 11, pp. 842–854, 2018, doi: 10.1680/jstbu.16.00227.
- [4] T. M. Roberts and H. Al-Ubaidi, "Flexural and Torsional Properties of Pultruded Fiber Reinforced Plastics I-Profiles," *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 1, pp. 28–34, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(28).
- [5] S. Seangatith and J. Thumrongvut, "Experimental Investigation on Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-Point Loading," *Advanced Materials Research*, vol. 335–336, pp. 1321–1326, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1321.
- [6] J. Thumrongvut and S. Seangatith, "Responses of PFRP Cantilevered Channel Beams under Tip Point Loads," *Key Engineering Materials*, vol. 471–472, pp. 578–583, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.578.
- [7] D. C. T. Cardoso, K. A. Harries and E. M. Batista, "Compressive Strength Equation for GFRP Square Tube Columns," *Composites Part B: Engineering*, vol. 59, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.057.
- [8] F. Ascione, L. Feo, M. Lamberti, F. Minghini and N. Tullini, "A Closed-Form Equation for the Local Buckling Moment of Pultruded FRP I-Beams in Major-Axis Bending," *Composites Part B:*

- Engineering*, vol. 97, pp. 292–299, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.04.069.
- [9] F. Nunes, J. R. Correia and N. Silvestre, “Structural Behaviour of Hybrid FRP Pultruded Columns. Part 1: Experimental Study,” *Composite Structures*, vol. 139, pp. 291–303, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.12.058.
- [10] F. Nunes, N. Silvestre and J. R. Correia, “Structural Behaviour of Hybrid FRP Pultruded Columns. Part 2: Numerical Study,” *Composite Structures*, vol. 139, pp. 304–319, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.12.059.
- [11] C. E. Bakis, L. C. Bank, V. L. Brown, E. Cosenza, J. F. Davalos, J. J. Lesko, A. Machida, S. H. Rizkalla and T. C. Triantafillou, “Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 2, pp. 73–87, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73).
- [12] J. Thumrongvut and S. Seangatith, “Experimental Evaluation on Fixed End Supported PFRP Channel Beams and LRFD Approach,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 105–107, pp. 1671–1676, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.105-107.1671.
- [13] S. Seangatith, J. Thumrongvut and C. Chatwivat, “Experimental Investigation on Axially Loaded PFRP Compression Members Having Double C-Sections,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 548–549, pp. 510–514, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.510.
- [14] J. Thumrongvut and S. Seangatith, “Influences of Concentric and Eccentric Loads on Buckling of Fixed-End Supported Pultruded FRP Channel Beams,” *Advanced Materials Research*, vol. 1119, pp. 721–725, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.721.
- [15] J. T. Mottram, “Lateral-Torsional Buckling of a Pultruded I-Beam,” *Composites*, vol. 23, no. 2, pp. 81–92, 1992, doi: 10.1016/0010-4361(92)90108-7.
- [16] P. Qiao, G. P. Zou and J. F. Davalos, “Flexural-Torsional Buckling of Fiber Reinforced Plastic Composite Cantilever I-Beams,” *Composite Structures*, vol. 60, no. 2, pp. 205–217, 2003, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00304-5.
- [17] L. Y. Shan and P. Z. Qiao, “Flexural-Torsional Buckling of Fiber-Reinforced Plastic Composite Open Channel Beams,” *Composite Structures*, vol. 68, no. 2, pp. 211–224, 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.03.015.
- [18] J. Thumrongvut and S. Seangatith, “An Experimental Study on The Performance of Fixed-End Supported PFRP Channel Beams under Flexure,” *Advanced Materials Research*, vol. 702, pp. 31–36, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.702.31.
- [19] Y. Pekbey and E. Ghanbari, “Flexural-Torsional Buckling of FRP Thin-Walled Composite with Various Sections,” *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 21, no. 4, pp. 537–549, 2014, doi: 10.1515/secm-2013-0227.
- [20] T. T. Nguyen, T. M. Chan and J. T. Mottram, “Lateral-Torsional Buckling Resistance by Testing for Pultruded FRP Beams under Different Loading and Displacement Boundary Conditions,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 60, pp. 306–318, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.12.025.
- [21] A. Zureick and R. Steffen, “Behavior and Design of Concentrically Loaded Pultruded Angle Struts,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, no. 3, pp. 406–416, 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:3(406).
- [22] M. B. Sirjani and Z. Razzaq, “Unsymmetric and Biaxial Bending of FRP Angle Sections,” *Journal of Reinforced*

- Plastics and Composites*, vol. 24, no. 18, pp. 1979–1984, 2005, doi: 10.1177/0731684405054377.
- [23] J. Thumrongvut, “Testing and Characterization of Simply Supported Pultruded FRP Angle Beams Using Bending Tests,” *Key Engineering Materials*, vol. 777, pp. 548–553, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.777.548.
- [24] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM D3039-08, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2008.
- [25] J. Thumrongvut, N. Pakwan and S. Krathumklang, “Flexural-torsional Buckling of Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Angle Beams Under Eccentric Loading,” *Materials Science Forum*, vol. 982, pp. 201–206, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.982.201.
- [26] J. Thumrongvut, “Lateral-Torsional Buckling of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Cantilever Angle Beams,” Presented at *8th Conference on Smart Structures and Materials (SMART 2017)*, Madrid, Spain, Jun. 5–8, 2017, pp. 471-479.
- [27] J. Qureshi, “A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures,” *Fibers*, vol. 10, no. 3, 2022, Art. no. 27, doi: 10.3390/fib10030027.
- [28] Specification for Load and Resistance Factor Design of Single-Angle Members, S351L, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL., USA, November 10, 2000.

การพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน ด้วย MIT App Inventor สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพ กระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บ กรณีศึกษาสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่

A Mobile Application Development with MIT App Inventor for an Efficiency Improvement of Receiving, Order Picking, and Put Away Processes in the Inventory Spare Parts Case Study

เจนณรงค์ ใจเกลี้ยง^{1,*} และ จุฑามาศ ชุมลักษ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Jannarong Jaikiang^{1,*} and Juthamas Choomlucksana¹

¹Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800, Thailand

*Corresponding Author E-mail: s6401052810018@email.kmutnb.ac.th

Received: Jan 07, 2023; Revised: Mar 23, 2023; Accepted: Apr 05, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ กระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บ ภายในสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ กรณีศึกษา ทำการเก็บข้อมูลด้วยการสังเกตการณ์และการสัมภาษณ์เชิงลึก ระหว่างเดือนสิงหาคม-เดือนกันยายน 2565 ทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วย Why-Why Analysis พบสาเหตุที่เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลรวมสูงสุดต่อผลการปฏิบัติงาน คือไม่มีการอัปเดตข้อมูลบนที่รับเข้า-จ่ายออกอะไหล่และอุปกรณ์ ส่งผลให้เกิดความล่าช้าของงาน ต้นทุนจม หาดอะไหล่ไม่เจอ และพบปริมาณอะไหล่หรืออุปกรณ์จริงกับในระบบไม่ตรงกัน MIT App Inventor ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการดำเนินงานจากตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า และทำการประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งาน โดยโมบายแอปพลิเคชันมีหน้าที่หลัก 3 ประการ ประกอบด้วย 1) บันทึกข้อมูลด้วยตารางฐานข้อมูลใน Google Sheet 2) กำหนดระดับสินค้าคงคลังเพื่อหลีกเลี่ยงการขาดแคลนสินค้าคงคลัง และ 3) สร้าง อ่าน และบันทึกรหัส QR ของอะไหล่สินค้าคงคลังทั้ง 3 กระบวนการ ผลการทดสอบการดำเนินงานของโมบายแอปพลิเคชันพบว่าช่วยลดเวลาและปรับปรุงระดับการบริการของทั้ง 3 กระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นผลการประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งาน โมบายแอปพลิเคชันของเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่ ทั้ง 4 ด้าน คือด้านการทำงาน ด้านความน่าเชื่อถือ ด้านประสิทธิภาพ และด้านการใช้งาน มีค่าคะแนนความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.6, 4.75, 4.83 และ 4 ตามลำดับ และค่าคะแนนความพึงพอใจของผู้ให้บริการ 10 คน อยู่ในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยทั้ง 4 ด้านเท่ากับ 4.72, 4.58, 4.62 และ 4.53 ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าโมบายแอปพลิเคชันด้วย MIT App Inventor ที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการภายในสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ได้ และสามารถตอบสนองต่อการใช้งานของผู้ใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: โมบายแอปพลิเคชัน, สินค้าคงคลังประเภทอะไหล่, MIT App Inventor

Abstract

This research is intended to improve the efficiency of receiving, order picking, and put-away processes in the case study of the inventory spare parts. Data were collected during August to September 2022 by observation and in-depth interviews. Analyzing factors of failure using why-why analysis technique showed a lack of appropriate equipment to record data causing of work delays, sunk costs, inability to find parts, and mismatch in spare parts' types and quantities. MIT App Inventor was used as the tools to develop the mobile application. Then, the mobile application's performance was compared to the warehouse management indicators and showed the user satisfaction. Three major functions of the mobile applications consist of 1) record data with database table in Google Sheets, 2) determine inventory level to avoid stock shortage, and 3) generate, read, and record QR codes of inventory spare parts for all three processes. The result revealed that the mobile application can effectively reduce lead time and improve service levels of all three processes. Moreover, results also showed great satisfaction ratings in all four aspects: function, reliability, performance, and usability by an inventory clerk and ten users. The clerks' scores were 4.6, 4.75, 4.83, and 4, and the users' scores were 4.72, 4.58, 4.62, and 4.53, respectively. Thus, the findings have implications that the use of mobile application with MIT App Inventor help to improve all three processes in the inventory spare parts and the ability to meet the users' needs effectively.

Keywords: Mobile Application, Inventory Spare Parts, MIT App Inventor

1. บทนำ

ภายใต้การทำการธุรกิจในปัจจุบัน นอกจากผู้ประกอบการดำเนินธุรกิจเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าแล้ว ยังต้องเพิ่มขีดความสามารถในการลดต้นทุน ทางด้านการผลิตและด้านโลจิสติกส์ให้น้อยที่สุด เพื่อความอยู่รอดของธุรกิจ อย่างไรก็ตามการลดต้นทุนทางด้านโลจิสติกส์ ไม่ควรมุ่งเน้นไปที่การขนส่งเพียงอย่างเดียว ควรเน้นไปที่การบริหารสินค้าคงคลังด้วย เนื่องจากสินค้าคงคลังถือเป็นสินทรัพย์ที่สำคัญที่ทุก ๆ ธุรกิจต้องทำการเก็บรักษาไว้เพื่อให้ผลการดำเนินงานบรรลุตามที่ได้ตั้งไว้ตรงเวลา และตรงตามความต้องการ การบริหารสินค้าคงคลัง คือการดูแลวางแผน และควบคุมให้มีปริมาณสินค้าที่เหมาะสมประกอบไปด้วยกิจกรรมหลัก ๆ ที่สำคัญที่ทำให้การดำเนินงานของทุกธุรกิจสำเร็จหรือล้มเหลวได้ และถือเป็นกิจกรรม 1 ใน 13 กิจกรรมที่สำคัญของระบบโลจิสติกส์ที่อาจส่งผลให้เกิดต้นทุนจม เนื่องจากมีปริมาณสินค้าเหลือมากเกินไปหรือการขาดสินค้า ทำให้ผลิตไม่ทันตามความต้องการของลูกค้า ในงานวิจัยของ Darya Plinere and Arkady Borisov [1] ได้กล่าวว่าธุรกิจจำเป็นต้องมีสินค้าคงคลัง เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า แต่ต้องแลกมา

ด้วยต้นทุนการถือครองสินค้า ดังนั้นสิ่งสำคัญคือต้องมีการจัดการหาระดับปริมาณสินค้าคงคลังที่ไม่ขาดแคลนต่อความต้องการ เพื่อหลีกเลี่ยงสินค้าขาดสต็อกหรือสิ้นสต็อก โดยในงานวิจัยของจันทร์ธิดา [2] พบปัญหาคือ กรณีศึกษา มีสินค้าคงคลังเป็นจำนวนมาก ไม่สามารถควบคุมสินค้าในสต็อกได้ จึงมีการพัฒนาระบบสารสนเทศ เพื่อช่วยในการตรวจสอบข้อมูลสินค้าคงคลังของกรณีศึกษา

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีมาช่วยในทุก ๆ กิจกรรมของกิจกรรมโลจิสติกส์ ถือเป็นสิ่งจำเป็นในปัจจุบัน เพื่ออำนวยความสะดวก เพิ่มความถูกต้อง และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในโลกธุรกิจปัจจุบัน ได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chow et al. [3] ที่ได้ทำการพัฒนาระบบการจัดการคลังสินค้าโดยใช้ RFID ส่งผลให้มีระบบการตรวจสอบปริมาณสินค้าคงคลังที่ถูกต้องมากขึ้น และในงานวิจัยของ Dinu Airinei and Daniel Homocianu [4] ได้ทำการพัฒนาและประยุกต์ใช้ภาษา Cloud Scripting ของ Google ในการเชื่อมต่อการทำงานร่วมกับ Google Drive สำหรับการบันทึกไฟล์ข้อมูลอัตโนมัติ จากงานวิจัยดังกล่าวการนำเทคโนโลยีสารสนเทศ หรือ Internet of Thing (IoT) เข้ามาช่วยในการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง

จะช่วยให้การทำงานสะดวกขึ้น และเพิ่มขีดความสามารถต่อการตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ รวมถึงการเพิ่มความสามารถในการสื่อสารและรับส่งข้อมูลภายในองค์กรได้แบบเรียลไทม์ (Real-time)

อย่างไรก็ตามการพัฒนาและออกแบบระบบการทำงานให้มีประสิทธิภาพ ถูกออกแบบโดยพิจารณาจากความต้องการ ความยากและง่ายในการพัฒนา และต้นทุนของผู้ใช้งานและผู้พัฒนาระบบ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ตรงตามความต้องการมากที่สุด โดยโทรศัพท์สมาร์ทโฟน (Smart Phone) และ แท็บเล็ต (Tablet) ปัจจุบันมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลและจัดการไฟล์ต่าง ๆ ได้เทียบเท่ากับคอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่อง ถือได้ว่ามีความคล่องตัวในการใช้งานที่สูงมาก และสามารถใช้งานได้ทุกที่ทุกเวลา ทำให้โทรศัพท์สมาร์ทโฟนและแท็บเล็ต มีบทบาทกับการใช้งานในชีวิตประจำวัน และการใช้งานในการทำธุรกิจเป็นอย่างมาก ดังเช่นในงานวิจัยของจิราณัฐ [5] ได้ทำการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน ให้สามารถบันทึกกิจกรรมการวางท่อส่งก๊าซไว้ที่ตารางฐานข้อมูลใน Google Sheets เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการบันทึกและการจัดเตรียมเอกสารประวัติการดำเนินงาน

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันและการจัดเก็บข้อมูลในระบบ Cloud ที่ช่วยให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อมูลนั้น ๆ สามารถทำงานร่วมกันได้จากทุกที่ทุกเวลา และสามารถอัปเดตข้อมูลระหว่างกันได้แบบเรียลไทม์ โดยเป็นการศึกษาและพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันด้วย MIT App Inventor เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บภายในสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้วิจัยทำการศึกษาระบบการหลักภายในสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ เทคโนโลยีต่าง ๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ ศึกษาตัวชี้วัดประสิทธิภาพ เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา การออกแบบและพัฒนาระบบฐานข้อมูลอะไหล่ และเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา

โมบายแอปพลิเคชันสำหรับการบริหารจัดการสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1. กระบวนการหลักภายในสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่

ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการ คือ กระบวนการรับเข้า (Receiving) กระบวนการจัดเก็บ (Put away / Storage) และกระบวนการจ่ายออก (Order Picking)

1) กระบวนการรับเข้า (Receiving) ประกอบด้วยขั้นตอนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละคลังสินค้า เช่น อาจเริ่มจากขั้นตอนของการแจ้งส่งสินค้า การตรวจสอบสภาพสินค้า (Identify Goods) การตรวจสอบเอกสารการส่งสินค้า (Delivery Document) และการตรวจแยกประเภทหรือทำการจัดเรียงสินค้า (Sorting Goods) โดยสินค้าที่ได้รับการตรวจเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปจัดเก็บในตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้เพื่อความสะดวกในการเบิกจ่าย

2) กระบวนการจัดเก็บ (Put away / Storage) เป็นการดำเนินการเคลื่อนย้ายสินค้าคงคลังจากพื้นที่รับสินค้าคงคลังไปยังตำแหน่งสำหรับการจัดเก็บ โดยสินค้าคงคลังที่ถูกจัดเก็บ สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท จากงานวิจัยของ คณินทร์ [6] และเอกสาร E-Book ของ Denny Hong-Mo Yeh [7] ดังนี้

- 2.1) วัตถุดิบหรืออะไหล่ (Raw Materials) เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิต สินค้ารอการประกอบหรือสินค้าสำเร็จรูป
- 2.2) สินค้ากึ่งสำเร็จรูป (Semi-finished Goods) เป็นสินค้าที่จัดเก็บไว้รอดำเนินการขั้นตอนสุดท้ายเพื่อปรับการผลิตให้ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า
- 2.3) สินค้าสำเร็จรูป (Finished Goods) เป็นสินค้าที่ผลิตหรือประกอบมาสมบูรณ์แล้ว
- 2.4) งานระหว่างการผลิต (Work in Process) หรือ WIP เป็นสินค้าที่ยังไม่สมบูรณ์ ต้องรอการประกอบหรือผลิตให้เป็นสินค้าสำเร็จรูป
- 2.5) วัสดุหรืออะไหล่สำหรับการบำรุงรักษา ซ่อมแซม และวัสดุสิ้นเปลือง (Maintenance, Repair, and Operational supplies: MRO) เป็น วัสดุ หรืออะไหล่ที่ถูกใช้เพื่อการสนับสนุนการปฏิบัติงาน และการซ่อมบำรุง เช่น อะไหล่ (spare parts) หรือ

อุปกรณ์ รวมทั้งวัสดุที่ใช้แล้วหมดไป โดยมีการสำรองไว้เพื่อคอยสนับสนุนการดำเนินงาน แต่ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์

3) กระบวนการจ่ายออกหรือหยิบออก (Order Picking) เป็นการเคลื่อนย้ายสินค้าคงคลังออกจากตำแหน่งที่จัดเก็บ เพื่อส่งออกไปตามใบสั่งจ่าย โดยมีเป้าหมายหลักคือการหยิบสินค้าได้ถูกต้อง รวดเร็ว และสะดวก ครอบคลุมตามรายการ โดยกระบวนการจ่ายออกถือเป็นกระบวนการที่มีผลต่อต้นทุนในการบริหารจัดการคลังสินค้าและสินค้าคงคลังมากที่สุด เพราะต้องใช้ทั้งแรงงาน และระยะเวลาในการดำเนินงาน รวมทั้งมีผลต่อระดับความพึงพอใจของลูกค้า สอดคล้องกับงานวิจัยของนักสรร [8] ที่อธิบายว่า การจัดเรียงสินค้าที่ไม่เป็นระบบ ส่งผลให้พนักงานใช้เวลาในการค้นหาสินค้าและหยิบสินค้ามากกว่าที่ควรจะเป็น

2.2.เทคโนโลยีสำหรับการบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่

คณะผู้วิจัยทำการศึกษา และรวบรวมงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการภายในคลังสินค้าและสินค้าคงคลัง ตัวอย่างเช่น วัชร [9] ทำการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อการขายสินค้าออนไลน์และการบริหารจัดการคลังสินค้าของร้านค้ากรณศึกษา โดยเว็บแอปพลิเคชันช่วยให้ลูกค้าสามารถตรวจสอบรายละเอียดต่าง ๆ ของสินค้าได้ และช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถตรวจสอบสินค้าขายดีและสินค้าคงคลังได้ ในงานวิจัยของ กนกวรรณ พุทธิวัต และปริญ [10] ทำการปรับปรุงการดำเนินงานภายในคลังสินค้าของบริษัทกรณศึกษา ด้วยโมบายแอปพลิเคชันและแนวคิด ECRS แอปพลิเคชันช่วยในการสแกนคิวอาร์โค้ดบันทึกข้อมูลเลขรหัสสินค้าแทนการจดบันทึกแบบเดิม ส่งผลให้ระยะเวลาเฉลี่ยรวมในการจัดสินค้า / กล่อง จากเดิมใช้เวลา 4 นาที ลดลงเป็น 3 นาที มีความพึงพอใจด้านความสะดวก ประโยชน์ และการยอมรับแอปพลิเคชัน ในระดับมากที่สุด เฉลี่ยคะแนนเท่ากับ 4.71, 4.75 และ 4.64 ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Nguyen Viet Khoa [11] และ ชัยรัตน์ [12] ได้ทำการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อการจัดการ

คลังสินค้าและสินค้าคงคลัง ส่วนงานวิจัยของ C.K.M. Lee, Yaqiong Lv, K.K.H. Ng, William Ho and K.L. Choy [13] ได้ทำการออกแบบและประยุกต์ใช้ IOT ในระบบการจัดการคลังสินค้า และงานวิจัยของ ชิบดี และสหัสรัฐ [14] ทำการพัฒนาโปรแกรม Microsoft office access เพื่อลดเวลาในการบันทึกข้อมูลสินค้าคงคลัง นอกจากนี้พบว่ามีการวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประเภทอื่น ๆ ดังเช่น กูเกิล คลาวด์ (Google Cloud) [4],[5],[15], กูเกิล ด็อก (Google Docs: Google Form และ Google Sheets) [4],[5],[15], กูเกิล แอป สคริป (Google App Script) [4], และ รหัสคิวอาร์ (QR Code) [16–19]

2.3.ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่

เนื่องจากกระบวนการหลัก ๆ ระหว่างการบริหารจัดการคลังสินค้าและการบริหารสินค้าคงคลังมีความสอดคล้องกัน ทั้งด้านการจัดเก็บ การดูแล และการติดตามสินค้า [20] โดยตัวชี้วัดประสิทธิภาพคลังสินค้าที่งานวิจัยนี้นำมาใช้ ได้มาจากการสืบค้น และถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ดังเช่นงานวิจัยของ สุจิตา และตรีทศ [21] มีการกำหนดมิติตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า ออกเป็น 4 มิติ ได้แก่ 1) มิติด้านความถูกต้อง (Accuracy) 2) มิติด้านการใช้ประโยชน์จากทรัพยากร (Resources Utilization) 3) มิติด้านผลตอบแทนด้านการเงิน (Financial Outcome) และ 4) มิติด้านการตอบสนองและความยืดหยุ่น (Responsiveness and Flexibility) อย่างไรก็ตามการวัดประสิทธิภาพ สามารถกำหนดตัวชี้วัดที่แตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับการพิจารณาวัตถุประสงค์ของแต่ละองค์กรในหนังสือ Warehouse Management [22] ได้มีการอ้างถึง Ackerman (2003) เรื่องการวัดประสิทธิภาพของคลังสินค้าว่า ควรวัดประสิทธิภาพ 4 มิติ ได้แก่ 1) มิติความน่าเชื่อถือ (Reliability): การส่งตรงเวลา อัตราการเต็มเต็มของสินค้า และความถูกต้องแม่นยำ 2) มิติความยืดหยุ่น (Flexibility): รอบการส่งสินค้า 3) มิติด้านต้นทุน (Cost): ยอดขายหรือร้อยละผลผลิตเทียบกับชั่วโมงการทำงานของพนักงาน และ 4) มิติด้านอรรถประโยชน์การใช้อุปกรณ์ (Asset utilization): การใช้พื้นที่คลังสินค้า การขนถ่ายวัสดุ (MHE) การใช้แรงงาน และการใช้อุปกรณ์จัดเก็บ

2.4.เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและการออกแบบพัฒนาระบบฐานข้อมูล

เทคนิค Why-Why Analysis แผนภาพกระแสข้อมูล และแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล ถูกนำมาศึกษาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เทคนิค Why-Why Analysis เป็นเทคนิคที่นิยมใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและนำไปสู่กระบวนการแก้ไขปัญหาย่างเป็นระบบ เช่น งานวิจัยของ ถิรดา และภูมิศิริ [15] ทำการประยุกต์ใช้เทคนิค Why-Why Analysis เพื่อหาสาเหตุที่ส่งผลต่อระบบการจัดการเอกสารที่มีความยุ่งยากและนำเสนอแนวทางการแก้ไข เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ กนกวรรณ พุทธิวัต และปริญ [10] ทำการประยุกต์ใช้เทคนิค Why-Why Analysis ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นต้นเหตุของปัญหาที่ทำให้เกิดความสูญเปล่าในกระบวนการจัดสินค้า

2) แผนภาพกระแสข้อมูล (Data Flow Diagram) นำมาใช้เพื่อแสดงการไหลของข้อมูลให้สามารถวิเคราะห์ระบบได้ง่ายขึ้น เช่น ฌฐวุฒิ และแก้วใจ [23] ทำการสร้างแผนภาพกระแสข้อมูลระดับภาพรวมและระดับที่ 1 เพื่อแสดงแผนผังการทำงานของระบบ และ วุฒิชัย [24] ทำการสร้างแผนภาพแสดงการทำงานของระบบบริหารสินค้าคงคลังของสหกรณ์การศึกษา

3) แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Entity-Relationship Diagram: E-R Diagram) นำมาใช้เพื่อช่วยในการสร้างฐานข้อมูล แสดงรายละเอียดและความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล โดย วุฒิชัย [24] ใช้ E-R Diagram ในการสร้างโครงสร้างฐานข้อมูลในระบบบริหารสินค้าคงคลังของสหกรณ์การศึกษา เช่นเดียวกับ เอก และธนชัย [25] ใช้ E-R Diagram ในการสร้างโครงสร้างฐานข้อมูลของระบบจัดการสินค้าและการขายในร้านค้าการศึกษา

2.5.เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน

MIT App Inventor เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากความร่วมมือของ Google และ MIT โดยมีการทำงานผ่านระบบเว็บเบราว์เซอร์ เพื่อการพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนและแท็บเล็ต สำหรับระบบปฏิบัติการ Android โดยโปรเจกต์ต่าง ๆ จะถูกเก็บไว้ที่เครื่องแม่ข่ายที่ให้บริการ

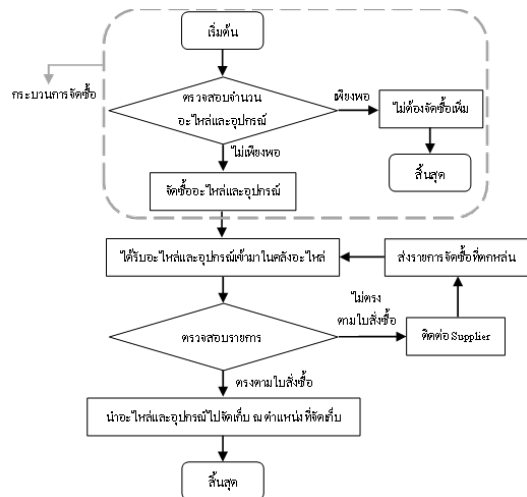
(Cloud computing) Google เปิดให้บริการ App Inventor ตั้งแต่ปี 2010-2011 หลังจากนั้น MIT เป็นผู้พัฒนาต่อ โดยเน้นไปทางด้านการศึกษา ในนามของ MIT App Inventor เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ไม่มีค่าใช้จ่ายในการพัฒนาสามารถออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันได้เอง ส่งผลให้มีผู้นิยมใช้งานเป็นจำนวนมาก ดังเช่นงานวิจัยของ ประธาน [26] ที่ทำการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อแสดงปริมาณความหนาแน่นของหมอกควันที่ส่งผลต่อสุขภาพของประชากร โดยการประยุกต์ใช้ MIT App Inventor และ จิราณัฐ [5] ได้ทำการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน โดยประยุกต์ใช้ MIT App Inventor ให้สามารถบันทึกกิจกรรมการวางท่อส่งก๊าซเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการดำเนินงาน

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลกระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บภายในสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่เครื่องมือศึกษา เพื่อนำมาวิเคราะห์หาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึก (in-depth interview) และการสังเกตวิธีการปฏิบัติงานจริง จากเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่ จำนวน 1 คน และจากผู้ใช้บริการ จำนวน 10 คน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ปัญหาที่พบในแต่ละกระบวนการ เพื่อหาแนวทางการแก้ไข และทำการเปรียบเทียบผลการดำเนินงานกับตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าจากงานวิจัยของ สุจิตา และตรีทศ [21] รวมทั้งมีการจัดทำแบบประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งานเพื่อวัดประสิทธิภาพการใช้งานของแอปพลิเคชัน

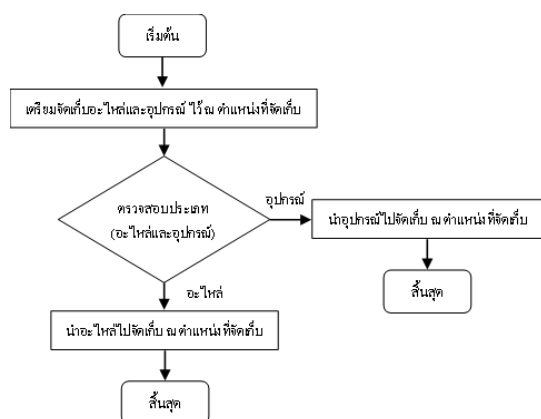
3.1.ศึกษากระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บ

1) กระบวนการรับเข้าอะไหล่และอุปกรณ์ เริ่มจากเจ้าหน้าที่มีการตรวจสอบจำนวนอะไหล่และอุปกรณ์ ว่ามีเพียงพอต่อความต้องการหรือไม่ ถ้าไม่เจ้าหน้าที่จะทำการเขียนใบสั่งซื้อ เมื่อได้รับอะไหล่และอุปกรณ์ เจ้าหน้าที่จะทำการตรวจสอบเพื่อทำการจัดเก็บต่อไป โดยแผนภาพแสดงการดำเนินงานกระบวนการรับเข้าอะไหล่และอุปกรณ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการดำเนินงานกระบวนการรับเข้า

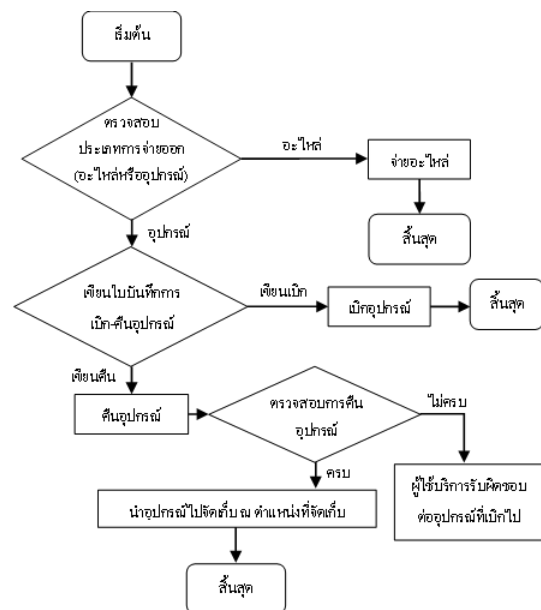
2) กระบวนการจัดเก็บขยะและอุปกรณ์ เป็นการจัดเก็บขยะและอุปกรณ์ ภายในคลังขยะ ก่อนปรับปรุงไม่มีการกำหนดตำแหน่งที่จัดเก็บ เจ้าหน้าที่ทำการจัดเก็บตามประสบการณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการดำเนินงานกระบวนการจัดเก็บ

3) กระบวนการจำหน่ายขยะและเบิก-คืนอุปกรณ์ เป็นการขายขยะหรืออุปกรณ์ให้กับผู้ใช้บริการ โดยก่อนปรับปรุงเจ้าหน้าที่จะทำการตรวจสอบว่าเป็นรายการขยะหรืออุปกรณ์ หากเป็นขยะ เจ้าหน้าที่จะขายขยะออกจากคลังให้ผู้ใช้บริการ โดยไม่มีการบันทึกข้อมูลการจำหน่ายของขยะ ในส่วนของการเบิกอุปกรณ์ จะมีแบบฟอร์มการเขียนเบิกให้ผู้ใช้บริการเขียนบันทึกรายการเบิก เพื่อเก็บประวัติการเบิก เมื่อนำอุปกรณ์มาคืน ผู้ใช้บริการต้องเขียนบันทึกการคืน ส่วนเจ้าหน้าที่จะทำการ

ตรวจสอบการคืนว่าครบตรงตามจำนวนที่ได้ทำการเบิกไปหรือไม่ แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการดำเนินงานกระบวนการจำหน่าย

3.2.ประเภทของขยะและอุปกรณ์

คณะผู้วิจัยทำการแยกประเภทของขยะและอุปกรณ์ออกเป็น 4 ประเภท 2 กลุ่มใหญ่ (อ้างอิงการแยกแต่ละประเภทตามหมวดหมู่สินค้าในเว็บไซต์โฮมโปร) โดยตัวอย่างรูปขยะและอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 4-5 ดังนี้

1) กลุ่มขยะ ได้แก่ ประเภทอุปกรณ์ยึดติด เช่น สกรู หกเหลี่ยม M8 × 20 สีขาว น็อตหกเหลี่ยม M8 สีดำ แหวนอีแปะ พุกพลาสติก และน็อตหางปลา เป็นต้น

2) กลุ่มอุปกรณ์

2.1) ประเภทอุปกรณ์เชื่อมและบัดกรี ได้แก่ หัวแร้ง ปืนปรับความร้อนสูง ตะกั่วบัดกรี ลวดเชื่อม เครื่องเชื่อม และหน้ากากเชื่อมสวมหัว เป็นต้น

2.2) ประเภทเครื่องมือไฟฟ้า ได้แก่ เครื่องเจียร แผ่นเจียรกระดาษทราย แผ่นเจียรเหล็ก ไขควงไฟฟ้า ตัวเล็ก สว่าน และดอกสว่าน เป็นต้น

2.3) ประเภทเครื่องมือช่าง ได้แก่ ประแจปากตาย 20 × 22 มม. ไขควง เกียง ตะใบ คีมตัดข้าง คีมปากนกแก้ว คีมตัดสายไฟ เวอร์เนียคาลิเปอร์ และฉากวัดไม้ เป็นต้น



รูปที่ 4 ตัวอย่างอะไหล่ในคลังอะไหล่กรณีศึกษา



รูปที่ 5 ตัวอย่างอุปกรณ์ในคลังอะไหล่กรณีศึกษา

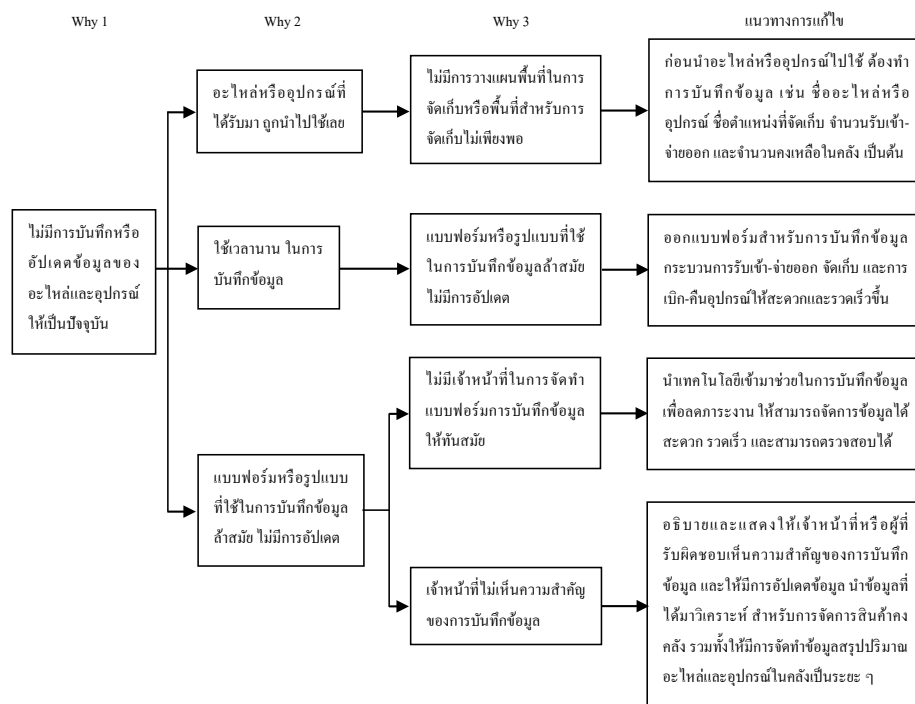
3.3. ปัญหาของการบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ก่อนปรับปรุง

เทคนิค Why-Why Analysis ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหาในแต่ละกระบวนการ

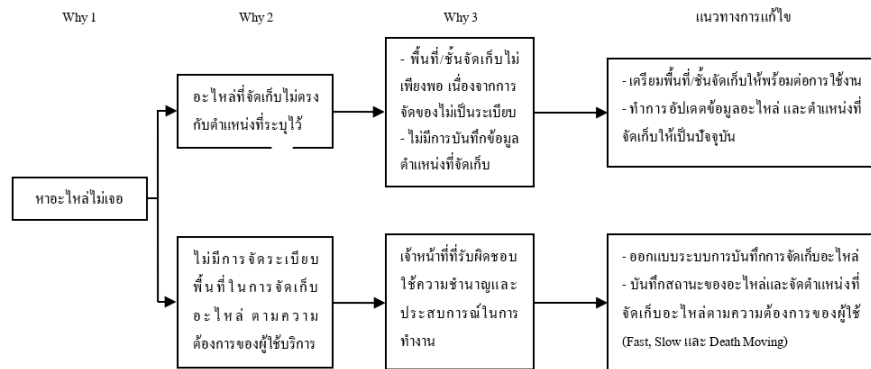
แสดงดังรูปที่ 6-8 ปัญหาที่พบในแต่ละกระบวนการแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปัญหาที่พบในกระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บ

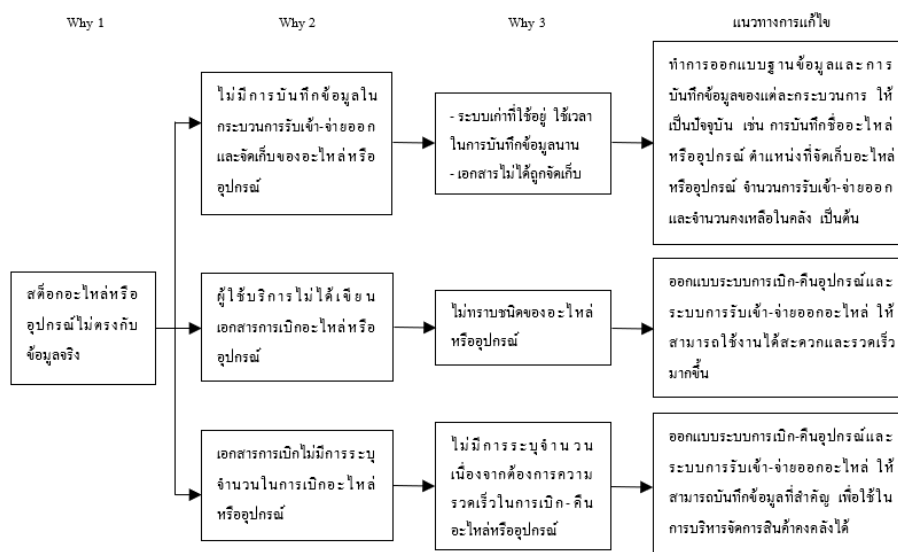
กระบวนการ	ปัญหาที่พบ	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
รับเข้า	ไม่มีการบันทึกหรืออัปเดตข้อมูลของอะไหล่และอุปกรณ์ให้เป็นปัจจุบัน	- ทำให้ไม่ทราบว่าปัจจุบันมีประเภทอะไหล่หรืออุปกรณ์อะไรบ้าง และมีปริมาณเท่าใด
จ่ายออก	หาอะไหล่ไม่เจอ	- ทำให้เสียเวลาในการเบิกจ่ายอะไหล่
จัดเก็บ	สต็อกอะไหล่หรืออุปกรณ์ไม่ตรงกับข้อมูลจริง	- ทำให้อะไหล่หรืออุปกรณ์ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน - ทำให้เกิดต้นทุนในการสั่งซื้อหรือจัดเก็บเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหากระบวนการรับเข้า



รูปที่ 7 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหากระบวนการจ่ายออก



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหากระบวนการจัดเก็บ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Why-Why Analysis ดังรูปที่ 6-8 สามารถสรุปแนวทางแก้ไขโดยการออกแบบระบบสำหรับการบันทึกข้อมูลการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บภายในสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ รวมทั้ง การเบิก-คืนอุปกรณ์ ให้ทันสมัย สะดวก และใช้งานง่าย โดยระบบควรมีการกำหนดข้อมูลสำคัญที่ต้องใช้ในการบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ เช่น ชื่ออะไหล่หรืออุปกรณ์ จำนวนการรับเข้า-จ่ายออก วันที่รับเข้า-จ่ายออก ตำแหน่งที่จัดเก็บ และจำนวนอะไหล่คงเหลือ เป็นต้น เพื่อให้เจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่สามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์สถานะของอะไหล่หรืออุปกรณ์ และวิเคราะห์การเคลื่อนไหว โดยแบ่งออกเป็น การเคลื่อนไหวเร็ว เคลื่อนไหวน้อย และไม่เคลื่อนไหว (Fast, Slow และ Death Moving) เพื่อให้การบริหารจัดการข้อมูลและ

การบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4. ผลการดำเนินงาน

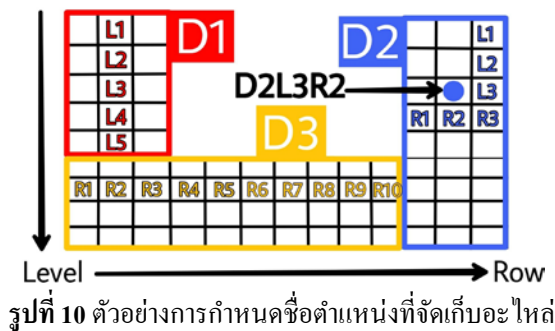
อย่างไรก็ตามก่อนการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันควรทำการกำหนดตำแหน่งที่จัดเก็บ รหัสที่จัดเก็บ ออกแบบฐานข้อมูล และออกแบบความสัมพันธ์ของข้อมูล

4.1.การกำหนดรหัสตำแหน่งที่จัดเก็บ

จากปัญหาการหาอะไหล่ไม่เจอในกระบวนการจ่ายออก คณะผู้วิจัยทำการแก้ปัญหาโดยกำหนดชื่อตำแหน่งที่จัดเก็บอะไหล่ให้เป็นระบบมากขึ้นตามหลักการกำหนดรหัสตำแหน่งที่จัดเก็บสินค้า [27] แสดงดังรูปที่ 9-10 และรูปที่ 11 แสดงผลการกำหนดรหัสก่อนและหลังการปรับปรุง



รูปที่ 9 ตำแหน่งที่จัดเก็บสินค้าคลังประเภทอะไหล่



จากรูปที่ 9 ตัวอย่างตำแหน่งที่จัดเก็บสินค้าคลังประเภทอะไหล่ คณะผู้วิจัยทำการแบ่งโซนตำแหน่งที่จัดเก็บ ออกเป็น D1, D2 และ D3 โดย D ย่อมาจาก Drawer และจากรูปที่ 10 เป็นตัวอย่างการกำหนดชื่อตำแหน่งที่จัดเก็บอะไหล่ จากมุมมอง บนลงล่าง กำหนดเป็น Level มุมมองจากซ้ายไปขวา กำหนดเป็น Row โดยจุดสีฟ้าเป็นตัวอย่างตำแหน่งที่จัดเก็บอะไหล่ เลขรหัสตำแหน่งคือ D2L3R2 มีความหมายว่า โซน D2 ระดับ L3 แถว R2



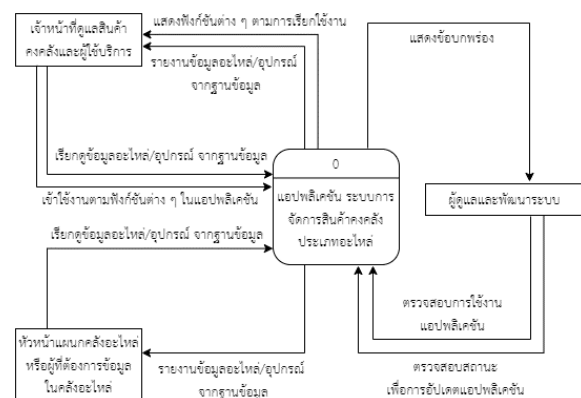
รูปที่ 11 ตัวอย่างการกำหนดรหัสตำแหน่งที่จัดเก็บ ก่อนและหลังการปรับปรุง

4.2.การออกแบบฐานข้อมูลและความสัมพันธ์ของข้อมูล

คณะผู้วิจัยทำการสอบถามความต้องการของผู้ใช้งาน เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาข้อมูลสำหรับการบันทึกและวิเคราะห์ผลต่อไป โดยทำการวิเคราะห์ระบบการบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ด้วยแผนภาพกระแสข้อมูล (Data Flow Diagram) และแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Entity-Relationship Diagram) มีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1.แผนภาพบริบท (Context Diagram)

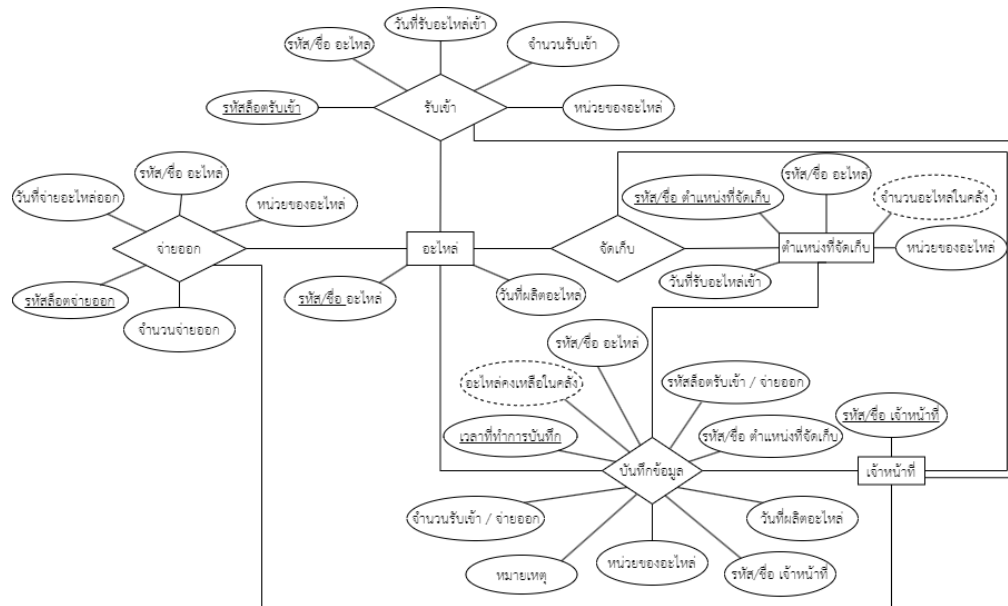
เป็นแผนภาพกระแสข้อมูลระดับสูงสุด แสดงภาพรวมการทำงานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบ ดังรูปที่ 12 แสดงการทำงานของระบบที่เกี่ยวข้องกับเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่และผู้ใช้บริการ หัวหน้าแผนกคลังอะไหล่หรือผู้ที่ต้องการข้อมูลในคลังอะไหล่ โดยสามารถเข้าใช้งานตามฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ออกแบบไว้ และเรียกดูข้อมูลอะไหล่/อุปกรณ์จากฐานข้อมูลได้ จากนั้นแอปพลิเคชันจะรายงานข้อมูลและแสดงฟังก์ชันต่าง ๆ ตามการเรียกใช้งาน ในส่วนของผู้ดูแลและพัฒนาระบบ สามารถตรวจสอบการใช้งานแอปพลิเคชัน และสามารถตรวจสอบสถานะเพื่อการอัปเดตแอปพลิเคชันเวอร์ชันให้เป็นปัจจุบัน



รูปที่ 12 แผนภาพบริบท (Context Diagram)

4.2.2.แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ (Entity-Relationship Diagram)

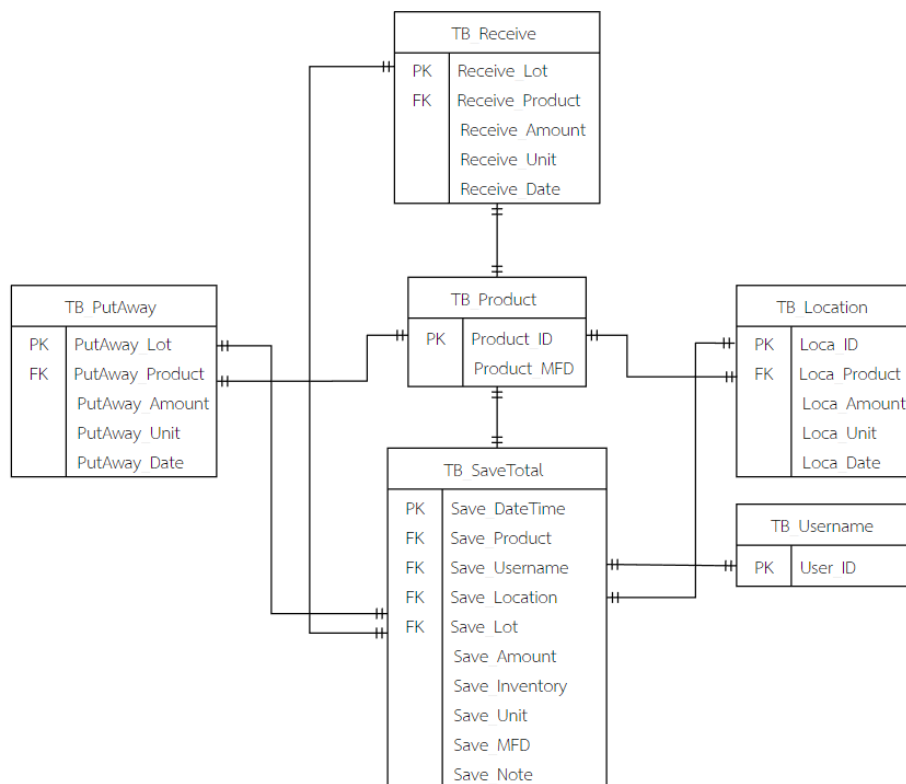
แสดงข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ของทั้ง 3 กระบวนการ โดยมีเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่ เป็นผู้ดำเนินการบันทึกข้อมูล แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล

รูปที่ 13 แสดงเอนทิตีที่น่าสนใจคือ อะไหล่ ตำแหน่งที่จัดเก็บ และเจ้าหน้าที่ โดยภายในเอนทิตีแต่ละตัว ประกอบไปด้วยแอททริบิวต์ มีคีย์หลัก หรือเรียกว่า Primary Key (ตัวที่ขีด

เส้นใต้) และแสดงรายละเอียดความสัมพันธ์ของข้อมูลแต่ละกระบวนการ ในส่วนของรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งหมดในระบบบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลในระบบ

รูปที่ 14 สามารถนำ TB_Product มาสร้างเป็นตารางการจัดเก็บข้อมูลอะไหล่ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลอะไหล่

Field Name	Data Type	Size	Description	Key	Example
Product_ID	varchar	15	รหัส / ชื่ออะไหล่	PK	01/สกรู/01สกรู
Product_MFD	date		วันที่ผลิตอะไหล่		01/06/2022

หลักการในการตั้งรหัสอะไหล่ มีรายละเอียดดังนี้ รหัสแรกคือ หมวดชื่ออะไหล่ รหัสที่สองคือ รหัสของอะไหล่ รหัสที่สามคือ ขนาดของอะไหล่ และรหัสที่สี่คือ สีของอะไหล่ ยกตัวอย่างเช่น สกรูหกเหลี่ยม $M8 \times 20$ สามารถตั้งรหัสอะไหล่ได้ดังนี้ S=สกรูหกเหลี่ยม 01=รหัสของอะไหล่ (ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่าจะให้อะไหล่ชิ้นใดเป็นลำดับแรก) $M8 \times 20$ = ขนาดของสกรูหกเหลี่ยม (M8 คือ ความโตของเกลียว 20 คือ ความยาวของสกรู) และเนื่องจากอะไหล่มีสีดําและสีเงิน คณะผู้วิจัยจึงเพิ่มรหัส W = สีของสกรูหกเหลี่ยม (สีดํา = B)

ดังนั้น สกรูหกเหลี่ยม $M8 \times 20$ จะมีรหัสอะไหล่คือ S01M820W

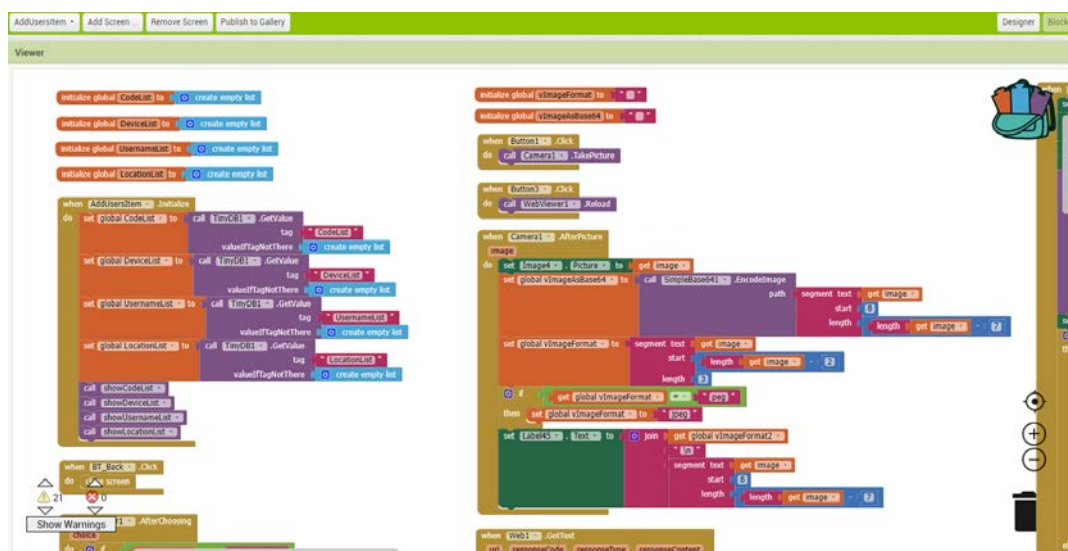
4.3.การออกแบบและพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน

การออกแบบและพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันสำหรับการบริหารสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่ ชีตหลักการของ User Interface, User Experience และ User Friendly ดังรูปที่ 15



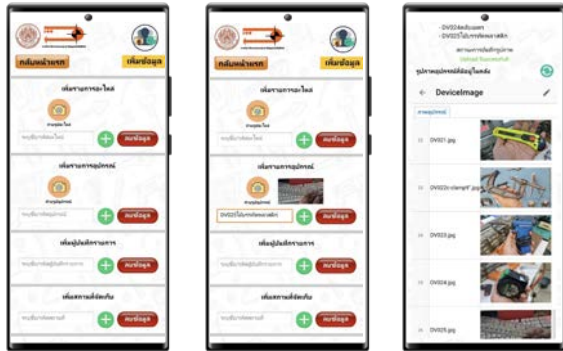
รูปที่ 15 เว็บพัฒนาแอปพลิเคชัน (ซ้าย) และภาพแสดงแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ (ขวา)

รูปที่ 15 เว็บพัฒนาแอปพลิเคชัน (ซ้าย) เป็นภาพแสดงส่วนของการ Design แอปพลิเคชัน โดยโค้ดคำสั่งจะอยู่ในส่วนของ Blocks ดังตัวอย่างในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ตัวอย่างโค้ดคำสั่งภาษา Scratch ในหน้าเพิ่มข้อมูล

รูปที่ 16 แสดงภาพโค้ดคำสั่งในหน้าเพิ่มข้อมูล และ รูปที่ 17-24 แสดงฟังก์ชันการทำงานหลักของแอปพลิเคชัน โดยเมนูการเพิ่มข้อมูล แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงเมนูการเพิ่มข้อมูลบนหน้าจอสมาร์ตโฟนหรือแท็บเล็ต

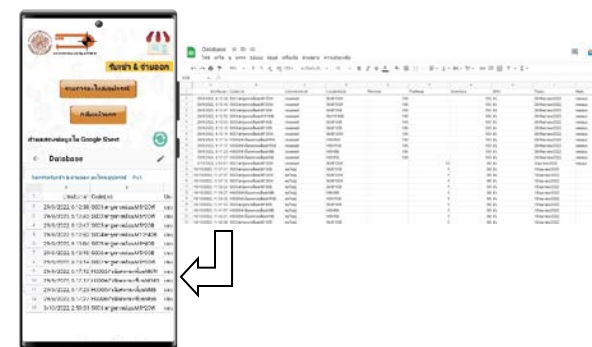


รูปที่ 19 แสดงการแจ้งเตือนเมื่อปริมาณอะไหล่คงคลังเหลือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 ตัว



รูปที่ 18 φόρมันบันทึกข้อมูลกระบวนการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บอะไหล่

รูปที่ 18 แสดงแบบฟอร์มที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลภายในแอปพลิเคชัน เมื่อบันทึกข้อมูล ข้อมูลที่ทำการบันทึกจะจัดเก็บไว้ที่ Google Sheet โดยหากอะไหล่ที่มีจำนวนคงเหลือน้อยกว่าปริมาณที่กำหนด แอปพลิเคชันจะแสดงข้อความแจ้งเตือน ดังรูปที่ 19 และแสดงรายงานข้อมูลที่ทำกรบันทึก ดังรูปที่ 20

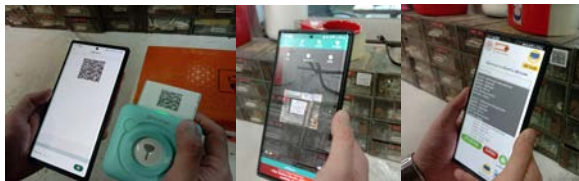


รูปที่ 20 ข้อมูลใน Google Sheet แสดงบนแอปพลิเคชัน

เจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่สามารถนำข้อมูลที่ได้นับที่มาสสร้างเป็น QR Code ได้ดังรูปที่ 21 และผู้ใช้บริการสามารถสแกนและสแกนดูข้อมูล QR Code ได้ดังรูปที่ 22

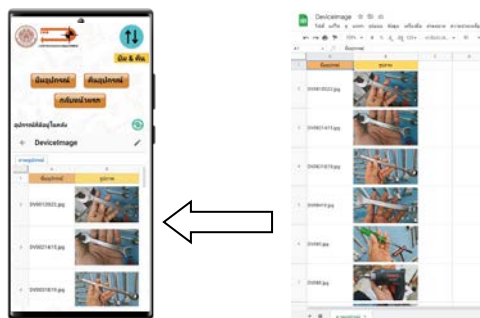


รูปที่ 21 สร้าง QR Code จากข้อมูลใน Google Sheet



รูปที่ 22 สั่งพิมพ์และสแกนดูข้อมูล QR Code

ในส่วนของการเบิก-คืนอุปกรณ์ แอปพลิเคชันสามารถแสดงรูปภาพของอุปกรณ์ เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถตรวจสอบอุปกรณ์ทั้งหมดที่มี ก่อนทำการเบิกอุปกรณ์ได้ แสดงดังรูปที่ 23 และสำหรับฟอร์มในการบันทึกข้อมูลการเบิกอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 24



รูปที่ 23 แสดงรูปภาพอุปกรณ์บนแอปพลิเคชัน



รูปที่ 24 ฟอร์มบันทึกข้อมูลการเบิกอุปกรณ์

4.4.การทดสอบการใช้งานและการประเมินประสิทธิภาพของโมบายแอปพลิเคชัน

หลังจากทำการออกแบบแอปพลิเคชัน คณะผู้วิจัยทำการทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชัน ในแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1.การทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชัน

ทำการทดสอบจับเวลา การหาและหยิบอะไหล่ก่อนและหลังการปรับปรุงตำแหน่งที่จัดเก็บอะไหล่ การใช้แอปพลิเคชันบันทึกข้อมูลกระบวนการจ่ายออกของอะไหล่ และการใช้แอปพลิเคชันบันทึกข้อมูลกระบวนการเบิกอุปกรณ์ มีผลการทดสอบดังนี้

1) การทดสอบจับเวลาการหาและหยิบอะไหล่ โดยกำหนดให้เจ้าหน้าที่ทำการเบิกอะไหล่ 3 รายการ ก่อนและหลังการปรับปรุงตำแหน่งที่จัดเก็บอะไหล่ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3 พบว่าเวลาดลดลงจากเดิมเฉลี่ย 81.91%

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาและหยิบอะไหล่ก่อนและหลังการปรับปรุง

ครั้งที่	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	เปอร์เซ็นต์
1	1:44 นาที	18.19 วินาที	82.51%
2	1:44 นาที	17.81 วินาที	82.88%
3	1:51 นาที	21.53 วินาที	80.60%
เฉลี่ย	1:46 นาที	19.18 วินาที	81.91%

2) การทดสอบจับเวลาการใช้แอปพลิเคชันบันทึกข้อมูลกระบวนการจ่ายออกของอะไหล่ หลังการปรับปรุงตำแหน่งที่จัดเก็บอะไหล่ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เวลาที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลกระบวนการจ่ายออกของอะไหล่หลังการปรับปรุง

ครั้งที่	เวลาที่ใช้
1	2:01 นาที
2	1:31 นาที
3	1:47 นาที
เฉลี่ย	1:59 นาที

จากตารางที่ 4 ไม่มีการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลก่อนการนำแอปพลิเคชันมาใช้ เนื่องจากก่อนปรับปรุงทางกรณีศึกษาไม่ได้ทำการบันทึกข้อมูลกระบวนการจ่ายออกของอะไหล่

3) การทดสอบจับเวลาการใช้แอปพลิเคชันบันทึกข้อมูลกระบวนการเบิกอุปกรณ์ ก่อนและหลังการปรับปรุงการบันทึกข้อมูล ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลกระบวนการเบิกอุปกรณ์ ก่อนและหลังการปรับปรุง

ครั้งที่	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1	59.25 วินาที	71.42 วินาที
2	40.44 วินาที	52.63 วินาที
3	38.49 วินาที	48.53 วินาที
เฉลี่ย	46.06 วินาที	57.53 วินาที

จากตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยเวลาในการบันทึกข้อมูลกระบวนการเบิกอุปกรณ์เพิ่มขึ้น จากก่อนปรับปรุง 46.06 วินาที เป็น 57.53 วินาที เนื่องจากรายละเอียดข้อมูลที่จัดเก็บมีความละเอียดมากขึ้น

4.4.2.การวิเคราะห์ผลการทดสอบและเปรียบเทียบ

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า

ทำการเปรียบเทียบความสามารถของแอปพลิเคชันกับตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า [21] พบความสอดคล้องระหว่างความสามารถของ แอปพลิเคชันกับตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความสามารถของแอปพลิเคชันกับตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า

มิติตัวชี้วัด	ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า	สอดคล้อง
มิติด้านความถูกต้อง	ความถูกต้องของจำนวนสินค้าคงคลัง	*
	ความถูกต้องในการเบิกสินค้า	*
	ความถูกต้องในการส่งสินค้า	*
	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการเคลื่อนย้ายสินค้าในระบบ	
	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของเอกสารที่ขนส่ง	
มิติด้านการใช้ประโยชน์จากทรัพยากร	การใช้ประโยชน์ในพื้นที่	*
	การใช้ประโยชน์อุปกรณ์ใช้งาน	
	ประสิทธิภาพและการใช้ประโยชน์จากแรงงาน	
มิติด้านการตอบสนองด้านการเงิน	ต้นทุนการส่งสินค้า	
	ต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง	*
	อัตราสินค้าที่เสียหาย	*
	ต้นทุนการรับประกันสินค้า	
	ต้นทุนสินค้าขาดสต็อก	*
มิติด้านการตอบสนองและความยืดหยุ่น	การตอบสนองการส่งมอบเร่งด่วน	*
	ความเร็วในการส่ง	*
	เวลาในการตอบข้อสอบถามลูกค้า	
	ความยืดหยุ่นในการเบิกจ่ายสินค้าที่มีจำนวนต่างกัน	*

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความสามารถของแอปพลิเคชันกับตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า (ต่อ)

มิติตัวชี้วัด	ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า	สอดคล้อง
มิติด้านการตอบสนอง และความยืดหยุ่น	ความยืดหยุ่นในการส่งมอบ	*
	ความยืดหยุ่นของบริการที่ลูกค้าได้รับ	*

หมายเหตุ: เครื่องหมาย “*” แสดงความสอดคล้องกับความสามารถของแอปพลิเคชัน

ตัวอย่างตัวชี้วัดที่สอดคล้อง เช่น ตัวชี้วัดความถูกต้องของจำนวนสินค้าคงคลัง แอปพลิเคชันสามารถแสดงจำนวนอะไหล่คงคลังได้ ตัวชี้วัดการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ แอปพลิเคชันสามารถแสดงเปอร์เซ็นต์การใช้พื้นที่ได้ ตัวชี้วัดต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง แอปพลิเคชันสามารถแจ้งเตือนจุดสต็อกต่ำกว่าที่กำหนด ทำให้ไม่จำเป็นต้องสั่งซื้ออะไหล่มาเติมในคลังบ่อยครั้ง เป็นต้น หลังจากนั้นทำการวัดความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ด้วยแบบประเมินความพึงพอใจ โดยแบบประเมินความพึงพอใจถือเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ใช้ในการบ่งชี้ความสามารถในการทำงานของระบบได้ ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ วุฒิชัย [24] ได้ทำการพัฒนาระบบเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการสินค้าคงคลังมีการใช้แบบประเมินความพึงพอใจ เพื่อวัดประสิทธิภาพของระบบ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของจิตติมา พชรี กุลกร และกฤติน [16] ที่ได้ใช้แบบประเมินความพึงพอใจในการประเมินการทำงานของแอปพลิเคชันการจัดการคลังอะไหล่และตรวจสอบสถานการณ์ซ่อมบำรุงกึ่งทันสมัยผลิตรถยนต์ไฟฟ้า ด้วยคิวอาร์โค้ดรวมทั้งงานวิจัยของกรวิ และเอื้อน [28] มีการจัดทำแบบประเมินความพึงพอใจในการใช้งานของระบบการขายหน้าร้านที่มีการประเมินความสามารถของระบบในการจัดการสต็อกสินค้าได้ด้วยเช่นเดียวกัน

4.4.3. การประเมินประสิทธิภาพของโมบายแอปพลิเคชัน

ทำการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้อง (Index of item objective congruence: IOC) จากผู้เชี่ยวชาญทางด้านการบริหารสินค้าคงคลัง จำนวน 3 ท่าน โดยประเมินค่าความสอดคล้องในข้อคำถาม 4 ด้าน ดังนี้

1) ด้านการทำงาน (Functionality) หมายถึง ความสามารถของแอปพลิเคชัน ที่สามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการ

ของผู้ใช้งาน ทั้งในด้านการเลือกใช้เมนูต่าง ๆ เพื่อการบันทึก ตรวจสอบ หรือดูรายงาน

2) ด้านความน่าเชื่อถือ (Reliability) หมายถึง ข้อมูลที่มีการบันทึก มีความถูกต้อง ตรวจสอบการบันทึกได้ตัวแอปพลิเคชันมีความเสถียรและใช้งานได้ต่อเนื่อง

3) ด้านประสิทธิภาพ (Efficiency) หมายถึง ความสะดวกและรวดเร็ว ของการใช้งานแอปพลิเคชัน

4) ด้านการใช้งาน (Usability) หมายถึง การออกแบบแอปพลิเคชัน ในด้านของ User friendly สามารถใช้งาน แอปพลิเคชันได้ง่าย ไม่ซับซ้อน สะดวก และมีข้อมูลสำหรับความช่วยเหลือ

ผลการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องจากผู้เชี่ยวชาญมีค่าเฉลี่ยในแต่ละด้านมากกว่า 0.5 สามารถนำแบบสอบถามการประเมินความพึงพอใจไปใช้ได้ โดยให้กับเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่ ได้ผลดังตารางในรูปที่ 25

ความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชัน	ระดับความคิดเห็น				ค่าเฉลี่ย
	5	4	3	2	1
1. ด้านการทำงาน (Functionality)					
1.1 สามารถบันทึกปริมาณการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บได้	/				
1.2 สามารถบันทึกข้อมูลการขึ้น-คืนอุปกรณ์ภายในคลังได้	/				
1.3 สามารถบันทึกภาพของอะไหล่หรืออุปกรณ์ได้	/				
1.4 สามารถรายงานสรุปข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิได้	/				
1.5 สามารถสร้างรหัสคิวอาร์โค้ด เพื่อใช้ในการตรวจสอบเช็คสต็อกได้ และสามารถสแกนอ่านรหัสคิวอาร์โค้ดได้ภายในแอปพลิเคชัน	/				
2. ด้านความน่าเชื่อถือ (Reliability)					
2.1 ข้อมูลที่บันทึกปริมาณการรับเข้า-จ่ายออก และจัดเก็บ สามารถตรวจสอบได้	/				
2.2 ข้อมูลการขึ้น-คืนอุปกรณ์ภายในคลัง สามารถตรวจสอบได้	/				
2.3 การใช้งานแอปพลิเคชันมีความเสถียร สามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง	/				
2.4 แอปพลิเคชันสามารถคำนวณรายการคงเหลือในคลังได้ตรงตามข้อมูลที่มีอยู่จริง	/				
3. ด้านประสิทธิภาพ (Efficiency)					
3.1 แอปพลิเคชันสามารถบันทึกข้อมูลได้สะดวกและรวดเร็ว	/				
3.2 แอปพลิเคชันสามารถแสดงข้อมูลได้แบบเรียลไทม์	/				
3.3 แอปพลิเคชันสามารถตรวจสอบความเคลื่อนไหวของสินค้าภายในคลังได้อย่างรวดเร็ว	/				
3.4 แอปพลิเคชันสามารถเพิ่มความสะดวกในการรับเข้า-จ่ายออกอะไหล่	/				
3.5 แอปพลิเคชันสามารถลดระยะเวลาในการเบิกอะไหล่	/				
3.6 แอปพลิเคชันสามารถเพิ่มความสะดวกในการเบิกอะไหล่	/				
4. ด้านการใช้งาน (Usability)					
4.1 การพัฒนาเมนูฟังก์ชันต่าง ๆ มีลำดับการทำงานชัดเจน ง่ายต่อการใช้งาน	/				
4.2 ขนาดและรูปแบบตัวอักษร เหมาะสมกับการใช้งาน	/				
4.3 มีคู่มือการใช้งานให้ผู้ใช้งานทราบและใช้งานแอปพลิเคชันได้เอง	/				

รูปที่ 25 ผลการประเมินความพึงพอใจ

จากเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่

หลังจากนั้นนำแบบสอบถามการประเมินความพึงพอใจให้กับผู้ให้บริการสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่จำนวน 10 คน ได้ผลดังตารางในรูปที่ 26

ความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชัน	ระดับความพึงพอใจของผู้ให้บริการ										ค่าเฉลี่ย	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1. ด้านการใช้งาน (Usability)												
1.1 สามารถใช้ระบบการรับแจ้ง-จ่ายออก และจัดเก็บได้	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	4.72	
1.2 สามารถใช้ฟังก์ชันการเพิ่มสินค้าเข้าคลังสินค้าได้	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5		
1.3 สามารถใช้ฟังก์ชันการเพิ่มสินค้าเข้าคลังสินค้าได้	4	5	3	5	5	5	5	5	5	5		
1.4 สามารถใช้ฟังก์ชันการเพิ่มสินค้าเข้าคลังสินค้าได้	4	5	4	5	4	5	5	5	5	4		
1.5 สามารถรับแจ้งคอก-ไก่-ไข่ ซึ่งใช้การวางแจ้งสินค้าได้ และสามารถเพิ่มเข้าคอก-ไก่-ไข่ได้ทั้งในแอปพลิเคชัน	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4.58	
2. ด้านความน่าเชื่อถือ (Reliability)												
2.1 ข้อมูลที่แสดงรายการรับแจ้ง-จ่ายออก และจัดเก็บ สามารถทราบได้	4	5	3	5	4	4	5	5	5	5		
2.2 ข้อมูลการเคลื่อนไหวสินค้าภายในคลัง สามารถใช้ทราบได้	4	5	3	4	4	3	5	5	5	5		
2.3 สามารถใช้ฟังก์ชันการเพิ่มสินค้าเข้าคลังสินค้าได้	4	5	4	4	4	5	5	5	5	5		
2.4 สามารถใช้ฟังก์ชันการเพิ่มสินค้าเข้าคลังสินค้าได้	4	5	4	4	5	5	5	5	5	5		
3. ด้านประสิทธิภาพ (Efficiency)												
3.1 แอปพลิเคชันสามารถใช้งานได้รวดเร็ว	4	5	4	4	5	5	5	5	5	4	4.62	
3.2 แอปพลิเคชันสามารถใช้งานได้รวดเร็ว	4	5	3	5	5	5	5	5	5	5		
3.3 แอปพลิเคชันสามารถใช้งานได้รวดเร็ว	4	5	4	5	5	5	5	5	5	4		
3.4 แอปพลิเคชันสามารถใช้งานได้รวดเร็วในการรับแจ้ง-จ่ายออก	4	5	4	5	5	5	5	4	5	5		
3.5 แอปพลิเคชันสามารถประมวลผลรายการรับแจ้ง-จ่ายออก	4	5	4	5	5	5	5	3	4	5	4.53	
3.6 แอปพลิเคชันสามารถประมวลผลรายการรับแจ้ง-จ่ายออก	4	5	3	5	5	5	5	4	5	4		
4. ด้านการบริการ (Serviceability)												
4.1 การใช้งานแอปพลิเคชัน มีฟังก์ชันการแจ้งเตือน	4	4	2	5	5	5	5	5	5	4	4.53	
4.2 สามารถใช้งานได้สะดวก และง่ายต่อการใช้งาน	4	5	3	5	5	5	5	5	5	5		
4.3 สามารถใช้งานได้สะดวก และง่ายต่อการใช้งาน	4	5	3	5	5	5	5	5	4	4		

รูปที่ 26 ผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ให้บริการ

สรุปคะแนนความพึงพอใจจากเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่ ทั้ง 4 ด้าน (ด้านการทำงาน ด้านความน่าเชื่อถือ ด้านประสิทธิภาพ และด้านการใช้งาน) อยู่ในระดับดีมาก และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.6, 4.75, 4.83 และ 4 ตามลำดับ และค่าคะแนนความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ 10 คน อยู่ในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยทั้ง 4 ด้านเท่ากับ 4.72, 4.58, 4.62 และ 4.53 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยในการบริหารสินค้าคงคลังและตอบสนองต่อการใช้งานของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. อภิปรายผลการดำเนินงานวิจัย

5.1.สรุปผลการดำเนินงาน

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [2-5], [8-28] ที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการบริหารสินค้าคงคลัง โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันให้มีความสามารถในการใช้งานตรงตามความต้องการของผู้ใช้มากที่สุด และทำการวัดผลความสามารถของแอปพลิเคชันด้วยการใช้แบบประเมินความพึงพอใจจากเจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่และผู้ให้บริการ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าแอปพลิเคชันที่ได้พัฒนาขึ้นจะสามารถใช้งานได้ตรงตามความต้องการของ

ผู้ใช้งานและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการได้ แต่เจ้าหน้าที่ดูแลคลังอะไหล่และผู้ให้บริการถือเป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่จะส่งผลให้บริการประสบความสำเร็จได้ การให้เจ้าหน้าที่ตระหนักถึงความสำคัญต่อการบันทึกข้อมูลให้เป็นปัจจุบัน และทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากข้อมูลที่ได้มา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนการดำเนินงาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก และต้องทำความเข้าใจการบริหารสินค้าคงคลังก่อนการพัฒนาหรือการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้

5.2.ข้อเสนอแนะ

แนวทางการพัฒนาต่อแอปพลิเคชันแอปพลิเคชันที่ได้พัฒนานี้ ควรมีการพัฒนาให้ฟังก์ชันการแจ้งเตือนแสดงจุดสั่งซื้อ (Reorder Point) ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความต้องการการใช้งานของอะไหล่แต่ละชนิด และผู้วิจัยควรหาแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันให้สามารถใช้งานได้ในทุกระบบปฏิบัติการ ไม่ว่าจะเป็นบนคอมพิวเตอร์ หรือระบบ IOS เพื่อเพิ่มช่องทางการใช้งานให้กับผู้ใช้ได้มากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงประลองกรณีศึกษา ในการสนับสนุนข้อมูลสำหรับการวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์ ดร.สุภัทรชัย สุดสวาท ที่ได้ให้ความรู้ และความช่วยเหลือในการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชัน เพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการรับแจ้ง-จ่ายออก และจัดเก็บสินค้าคงคลังประเภทอะไหล่

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Plinere and A. Borisov, "Case Study on Inventory Management Improvement," *Information Technology and Management Science*, vol. 18, no. 1, pp. 91-96, 2015, doi: 10.1515/itms-2015-0014.
- [2] C. Bonkhwan, "The Application of Information Technology to manage Inventory," M.S. Thesis, Information Technology Dept., Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand, 2011.

- [3] H. K. Chow, K. L. Choy, W. B. Lee, and K. C. Lau., "Design of a RFID Case-based Resource Management System for Warehouse Operations," *Expert Systems with Applications*, vol. 30, no. 4, pp. 561–576, 2006, doi: 10.1016/j.eswa.2005.07.023.
- [4] D. Airinei and D. Homocianu, "Cloud Computing Based Web Applications. Examples and Considerations on Google Apps Script," *SSRN Journal*, 2017, pp. 64–69, doi: 10.2139/ssrn.2964756.
- [5] J. Wattanapattaporn, "Application of Management Information System for Coordination in Pipeline Construction Project," M.E. Thesis, Dept. Ind., Silpakorn University, Bangkok, Thailand, 2019.
- [6] K. Teerapabolarn, "Types of Inventory," in *Basic Inventory Analysis*, Chonburi, Thailand: Burapha University, 1998, ch. 6, sec. 3, pp. 150–151.
- [7] D. Hong-Mo Yeh, "Inventory Management," in *Operations Planning and Control In ERP*, Toronto, Canada: Rotman School of Management University of Toronto, Copy Right 2003, ch. 7, sec. 2, pp. 7-2–7-4. [Online]. Available: [http://www.lancer.com.tw/attachments/367_ErpBook\(7\).pdf](http://www.lancer.com.tw/attachments/367_ErpBook(7).pdf). [Accessed: Jan. 1, 2023].
- [8] N. Sakulpradit, "Inventory Management for Producing and Distributing Factory of Frozen Products," M.E.Thesis, Dept. Ind., Thammasat University, Bangkok, Thailand, 2017.
- [9] W. Ritdetkhachon, "A Development of Racha Prathong's Web Application for Online Sale and Inventory Management," M.S. Thesis, Dept. Creative Design and Entertainment Technology, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2019.
- [10] K. Krajungduang, P. Singhdong, and P. Weerapong, "Improving Warehouse Operations with Mobile Applications and ECRS Concepts Case Study of Yusen Logistics (Thailand) Co., Ltd." *Journal of Learning Innovation and Technology (JLIT)*, vol. 1, no. 2, pp. 62–69, 2021.
- [11] N. V. Khoa, "Warehouse Management Application for Android," Bachelor's thesis, Dept. IT., Oulu University of Applied Sciences, Oulu, Finland, 2017.
- [12] C. Louklex, "iStock: An Application of Inventory Control and Management for SME Business," M.S. Thematic Paper, Dept. Web Engineering, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2013.
- [13] C. K. M. Lee, Y. Lv, K. K. H. Ng, W. Ho and K. L. Choy, "Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, pp. 2753–2768, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1394592.
- [14] T. Nimanong and S. Munkhong, "The Development of Program to Reduce The Recording Time of Inventory Data Case Study: Communication & System Solution Public Company Limited," B.E. Thesis, Dept. Logistics Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2019.
- [15] T. Lueng-aramphanich and P. Sirisut, "Mobile Application Development for Exchanging and Returning Goods Process Improvement Case Study: Government Pharmaceutical Organization (GPO)," B.E. Thesis, Dept. Logistics Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2019.
- [16] T. Chuangchai, P. Choochat, K. Buarung and K. Chaimongkon, "Stock Management Application and Check Repair Status of wind turbines by QR Code," *Journal of Industrial Education*, vol. 14, no. 2, pp. 10–23, 2020.
- [17] P. Kruepet and M. Rattanasiriwongwut, "An Office's Material Information Management System using

- RFID and QR Code,” in *Proc. ACTIS 14th*, Bangkok, Thailand, Jul. 23, 2018, pp. 76–81.
- [18] T. Uttrapornl and Y. Kaoien, “Efficiency of QR Code System: A Case Study of Mahidol University International College,” *Journal of Professional Routine to Research*, vol. 2, pp. 1–8, 2015.
- [19] K. Tawong and P. Wongkrajang, “The Application of QR CODE and Barcode on Drug Labeling,” B.E. Project, Dept. Electr. Eng., Burapha University, Chonburi, Thailand, 2017.
- [20] N. Utakrit, “Warehouse Management Vs Inventory Management.” mis.itd.kmutnb.ac.th. [Online]. Available: <https://mis.itd.kmutnb.ac.th/logistics-ep3/>. (Accessed Mar. 15, 2023).
- [21] S. Boonyarit and T. Laosirihongthong, “Dimensions of warehouse management performance indicators,” *Research and Development Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 45–55, 2013.
- [22] Gwynne Richards, “Performance management,” in *Warehouse Management*, 2nd ed, London, United Kingdom: Kogan Page Limited, 2014, ch. 13, sec. 3, pp. 294–295.
- [23] N. Natip and K. Apornpisarn, “Shop Management System: A Case Study of Yiw Sport Shop,” presented at the 2nd UTCC National Conference, Bangkok, Thailand, Jun. 8, 2018, pp. 1783–1795.
- [24] W. Inkeaw, “Development of information technology systems to manage inventory of banthungleab credit union co-operative LTD.,” Songkhla Rajabhat University, Songkhla, Thailand, Final Rep., 2014.
- [25] E. Bamrunsi and T. Keitkongkeeree, “Web Application of Product and Sales Management System of Kim & Jew Minimart,” in *the 5th KRU National Academic Conference*, Kanchanaburi, Thailand, Sep. 4, 2020, pp. 478–487.
- [26] P. Comejina, “Information System with Internet of Things for collecting the amount of smog in Muangkaen Pattana Municipality Area Chiangmai,” Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand, Final Rep., 2019.
- [27] P. Kaewsai, “Stock Locator System,” in *Warehouse Management*, 7th ed., Bangkok, Thailand: Ramkhamhaeng University Press, 2000, ch. 13, sec. 3, pp. 198–200.
- [28] K. Boonprasit and O. Pinngern, “Point of Sales (POS): A Case Stude of KPR MART,” in *the 9th STOU National Research Conference*, Nonthaburi Thailand, Nov. 29, 2019, pp. 2072–2085.

การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ PM1, PM2.5 และ PM10 จากการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร

A Comparison of PM1, PM2.5 and PM10 Concentrations from Agricultural Residue Burning

รติมา ศรีวรพันธุ์¹, ณัฐศักดิ์ บุญมี¹, ธเนศ อรุณศรี โสภณ¹ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Ratima Srivoraphantu¹, Nathasak Boonmee¹, Tanet Aroonsrisopon¹ and Ekathai Wirojsakunchai^{1,*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

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

Received: Jan 09, 2023; Revised: Apr 05, 2023; Accepted: Apr 21, 2023

บทคัดย่อ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการมาเก็บค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter, PM) จากการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรในพื้นที่โล่งพบว่าความแปรผันของข้อมูลค่อนข้างสูง เนื่องจากการเผาในที่โล่งไม่สามารถควบคุมตัวแปรได้ทั้งหมด ดังนั้นในงานนี้จึงศึกษา PM จากการเผาพืชสามชนิด ได้แก่ ฟางข้าว หญ้า และกาบมะพร้าว โดยเก็บฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 1, 2.5 และ 10 ไมครอน หรือ PM1 PM2.5 และ PM10 ตามลำดับ ที่วัดด้วยเซนเซอร์ PMS5003 ซึ่งวางที่ตำแหน่งได้ลมของถังเผาในพื้นที่โล่งที่ความเร็วลม 3 และ 4 m/s จากผลการทดลองพบว่าความเร็วลมมีอิทธิพลต่อ PM ที่วัดได้ในพืชต่างชนิดกัน โดย PM10 จากการเผาหญ้าที่ความเร็วลม 4 m/s มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าที่ 3 m/s แต่ในทางกลับกัน PM2.5 และ PM10 จากการเผาฟางข้าวที่ความเร็วลม 4 m/s นั้นมีค่าความเข้มข้นน้อยกว่าที่ 3 m/s ส่วนค่าความเข้มข้นของ PM ทั้งสามขนาดที่เก็บจากการเผา กาบมะพร้าว ในทั้งสองความเร็วลมนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็ก, การเผาเศษวัสดุทางการเกษตร, ความเร็วลม, การเผาในที่โล่ง

Abstract

Open agricultural burning has numerous factors that are not possible to control all parameters in the experiments thus this problem obviously impacts the variation of the data from literatures. Therefore, this research aims to collect and compare the three sizes of Particulate Matter (PM) concentrations which are particles less than 1, 2.5 and 10 micrometers in diameter (PM1, PM2.5 and PM10 respectively). The PM concentrations were measured by PMS5003 sensors at downstream from the smoke of burning rice straw, grass and coconut husk in the burning bucket which was set in an open area with simulated wind speeds at 3 m/s and 4 m/s. The experiment results show that PM10 concentrations from grass burning at a wind speed of 4 m/s are higher than those at a wind speed of 3 m/s. In contrast, PM10 concentrations from rice straw burning at a wind speed of 4 m/s are less than those at a wind speed of 3 m/s. Moreover, at different wind speeds, PM concentrations from coconut husk burning are nearly the same. As a result, both of wind speeds influenced to PM concentrations from selected residues.

Keywords: PM2.5, Agricultural residue burning, Wind speed, Open burning

1. บทนำ

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาคนในประเทศไทยได้ตระหนักถึงผลกระทบของปัญหาที่มาจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matters, PM) ที่ส่งผลไม่ว่าทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ทัศนวิสัย [1–2] ทางด้านสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด [3–4] และทางด้านเศรษฐกิจ เช่น ธุรกิจการท่องเที่ยว [5–6] ซึ่งปัญหา PM พบได้ในหลายพื้นที่ด้วยกัน อาทิ พื้นที่จังหวัดทางภาคเหนือ เช่น จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเชียงราย และจังหวัดลำปาง เป็นต้น และพื้นที่กรุงเทพมหานคร [7] โดยแหล่งที่มาของ PM มีอยู่หลากหลายที่มาด้วยกัน [4],[8–10] ได้แก่ การจราจร การก่อสร้าง อุตสาหกรรม และการเผาในพื้นที่โล่ง เช่น ไฟไหม้ป่า และการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาแหล่งที่มาของ PM ที่มาจากการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรในพื้นที่โล่ง โดยการเผาในพื้นที่โล่งเป็นวิธีที่เกษตรกรนิยมใช้ในการเตรียมดินเพื่อเพาะปลูก เพราะเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวกและประหยัด [11] เช่น การเผาฟางข้าว เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ทำเกษตรกรรมอยู่ในทุกภาค โดยจากตามรายงานสถิติการเกษตรของประเทศไทยของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรย้อนหลัง 5 ปี (พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2564) [12–16] พบว่าเนื้อที่การเพาะปลูกข้าวนาปรังรวมทั้งประเทศประมาณ 59 ถึง 62 ล้านไร่ เนื้อที่การเพาะปลูกข้าวนาปรังประมาณ 6 ถึง 12 ล้านไร่ โดยค่าอัตราส่วนชีวมวลต่อผลผลิต (Residue to Product Ratio, RPR) ของฟางข้าว 0.447 [17] จากการสำรวจชนิดและปริมาณวัสดุต่อชั่งในพื้นที่การเกษตรของประเทศไทยปี พ.ศ. 2541 พบว่ามีปริมาณ 29.1 ล้านตันต่อปี [11]

โดยจากงานวิจัยของ [18] ที่ทำการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรที่มาจากข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด ซึ่งทำการเผาใน Cone calorimeter พบว่าแนวโน้มของค่าความเข้มข้นของ PM ที่มาจากข้าวสาลีมีย่านมากกว่าข้าวโพดและข้าว โดยค่าความเข้มข้นของ PM ที่มาจากข้าวน้อยกว่าข้าวสาลีและข้าวโพดอย่างชัดเจน และจากงานวิจัยของ [19] ที่ทำการเก็บ PM จากการเผาในพื้นที่จริงของข้าวโพดและข้าวสาลี พบว่าแนวโน้มของ PM2.5 จากข้าวโพดมากกว่าข้าวสาลี ซึ่งทั้งสองงานวิจัยนี้

เป็นตัวอย่างที่ชี้ให้เห็นว่าพืชต่างชนิดกันส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM อีกทั้งจากอิทธิพลของความเร็วลมมีผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM เช่นเดียวกัน ดังงานวิจัยของ [20] ที่ทำการทดลองวัด PM2.5–10 ในแต่ละพื้นที่ที่สนใจพบว่าแนวโน้มค่าความเข้มข้นลดลงไปจนถึงเมื่อความเร็วลมเท่ากับ 4 เมตรต่อวินาที แต่หากความเร็วลมสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของ PM2.5–10 เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และจากงานวิจัยของ [21] ที่ศึกษาฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่ทางตะวันออกเฉียงเหนือของจีนพบว่าแนวโน้มของค่าความเข้มข้นของ PM2.5 สูงขึ้น ณ ที่ความเร็วลมต่ำ จึงเห็นได้ว่าความเร็วลมส่งผลต่อแนวโน้มของค่าความเข้มข้นของ PM ในแต่ละขนาดเช่นเดียวกัน เนื่องจากความเร็วลมช่วยในการเจือจางมลพิษ [22]

ดังนั้นจากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นทำให้ทราบว่ายังไม่พบการเปรียบเทียบการวัดค่าความเข้มข้นของ PM ที่แต่ละขนาด ได้แก่ PM1 PM2.5 และ PM10 ที่มาจากการเผาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากพืชต่างชนิดกันที่ความเร็วต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำตัวอย่างพืชต่างชนิดกันซึ่งเป็นตัวแทนของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร นำมาเผาที่ ณ ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที และ 4 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย [23] เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์แนวโน้มของค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาดที่ความเร็วลมต่างกันจากพืชต่างชนิดว่ามี ความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร โดยการทดลองแต่ละครั้งนั้นเผาพืชที่น้ำหนักเท่ากันในถังเผาที่ระบายควันออกสู่อากาศโดยรอบซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่โล่งเพื่อจำลองเสมือนการเผาในพื้นที่โล่งจริง

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

พืชที่นำมาเผาสำหรั้งการทดลองในงานวิจัยนี้มีทั้งหมดสามชนิด ได้แก่ หญ้า ฟางข้าว และกาบมะพร้าว ดังรูปที่ 1 โดยฟางข้าว คือ เศษวัสดุทางการเกษตรที่สนใจเป็นหลัก ส่วนการเลือกหญ้าและกาบมะพร้าวนั้นมาจากคุณลักษณะทางกายภาพที่เห็นได้ว่าหญ้านั้นมีความคล้ายกับข้าว เช่น ที่ใบ กาบใบ และลำต้น อันเนื่องมาจากข้าวเป็นพืชล้มลุก

ตระกูลหญ้าที่สามารถกินเมล็ดได้และเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเหมือนกันกับหญ้า [24] ซึ่งแตกต่างจากกามมะพร้าวที่มีคุณลักษณะทางกายภาพเป็นขุยและเส้นใยอย่างชัดเจนเมื่อมองเทียบกับกับฟางข้าวด้วยตาเปล่า โดยกามมะพร้าวประกอบด้วยเส้นใย (Fiber) 30% และขุยมะพร้าว (Pith) 70% [25] โดยพืชแต่ละชนิดนั้นวางตากแห้งไว้ในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส เมื่อวัดค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นแล้วมีค่าความชื้น ดังนี้ หญ้า 4.0% ฟางข้าว 12.5% และกามมะพร้าว 13.5% รวมทั้งน้ำหนักของพืชที่ต้องการนำมาเผาเท่ากันในทุกการทดลองที่ 100 กรัม จากนั้นนำไปใส่ลงในกรงตะแกรงเหล็กที่วางในถังเผา โดยค่าความเข้มข้นของ PM เริ่มต้นเก็บค่าตั้งแต่เริ่มจุดไฟเผาจนกระทั่งไฟมอดดับไม่มีควันเหลืออยู่ให้เห็น ซึ่งการวัดค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาด คือ PM1 PM2.5 และ PM10 นั้นวัดด้วยเซนเซอร์ PlanTower Laser Dust Sensor PMS5003 ที่ต่อกับ ESP32 ดังรูปที่ 2 โดยคุณสมบัติทางเทคนิคของเซนเซอร์ [26] แสดงดังตารางที่ 1

ในการทดลองนี้ใช้เซนเซอร์ PMS5003 ทั้งหมดสามตัวด้วยกันและเซนเซอร์แต่ละตัวมีการตั้งชื่อ ดังนี้ เซนเซอร์ตัวที่ 1 คือ DEV1 เซนเซอร์ตัวที่ 2 คือ DEV2 และเซนเซอร์ตัวที่ 3 คือ DEV3 ซึ่งแต่ละตัวเซนเซอร์วางอยู่บนเก้าอี้ที่ห่างกัน 1 เมตร โดยเซนเซอร์ PMS5003 ตัวแรกวางห่างจากถัง

เผาเป็นระยะ 1 เมตร ระยะที่กำหนดเป็นการจำลองระยะจากนาข้าวถึงไหล่ทาง ซึ่งความกว้างของไหล่ทางนั้นมีระยะตั้งแต่ 1 ถึง 3 เมตร [27] โดยหลักการทำงานของเซนเซอร์ PMS5003 นั้นอาศัยหลักการกระเจิงของแสงในการวัดค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาด โดยภายในของเซนเซอร์ PMS5003 มีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ซึ่งเมื่ออากาศที่ถูกดูดเข้ามาด้วยพัดลมขนาดเล็กผ่านแสงเลเซอร์ [26] ที่แสดงดังรูปที่ 3 และหน่วยของค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาด คือ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ทั้งนี้ความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมดสองค่า คือ ความเร็วลมเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที และ 4 เมตรต่อวินาที โดยความเร็วลมนี้วัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้น (Hygro-Thermo-Anemometer) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของถังเผาซึ่งเป็นตำแหน่งที่วางกรงตะแกรงเหล็กที่ใส่วัสดุตัวอย่างที่นำมาทดลอง โดยเป็นการควบคุมความเร็วลมที่กำหนดไว้ ณ ตำแหน่งนี้ตำแหน่งเดียวเท่านั้น ด้วยการปรับระยะห่างระหว่างถังเผากับพัดลมจนได้ความเร็วลมที่ต้องการ และนอกจากนี้ลมทางด้านข้างอาจส่งผลต่อความเร็วลมที่ต้องการในการทดลองและการกระจายตัวของควันจากการเผาจึงได้มีแผ่นกั้นลมด้านข้างทั้ง 2 ฝั่ง ดังรูปที่ 4 อีกทั้งในทุกๆ การทดลองมีการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 รอบ รวมจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 12 ครั้ง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเทคนิคของเซนเซอร์ PlanTower Laser Dust Sensor PMS5003

Parameter	Index	Unit
Range of measurement	0.3~1.0; 1.0~2.5; 2.5~10	Micrometer (μm)
Counting Efficiency	50% @ 0.3 μm 98% @ $\geq 0.5\mu\text{m}$	
Resolution	1	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Maximum Range (PM2.5 standard data)	≥ 1000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Maximum Consistency Error (PM2.5 standard data)	$\pm 10\%$ @ 100~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ @ 0~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Single Response Time	< 1	Second (s)
Total Response Time	≤ 10	Second (s)
Working Temperature Range	-10~+60	$^{\circ}\text{C}$



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

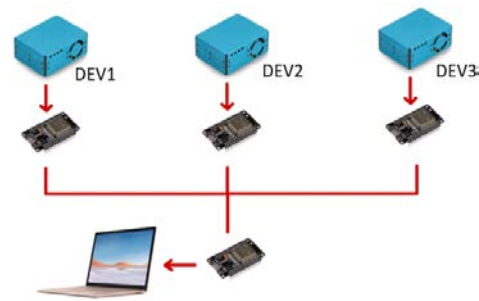
รูปที่ 1 ตัวอย่างของพืชทั้งสามชนิดที่นำมาทดลอง (ก) หญา (ข) ฟางข้าว และ (ค) กาบมะพร้าว (ง) ตัวอย่างของพืชที่ชั่งน้ำหนักให้ได้ตามที่กำหนด (จ) ตัวอย่างของพืชที่ใส่ในทรงตะแกรงเหล็กเพื่อนำไปเผา



(ก)

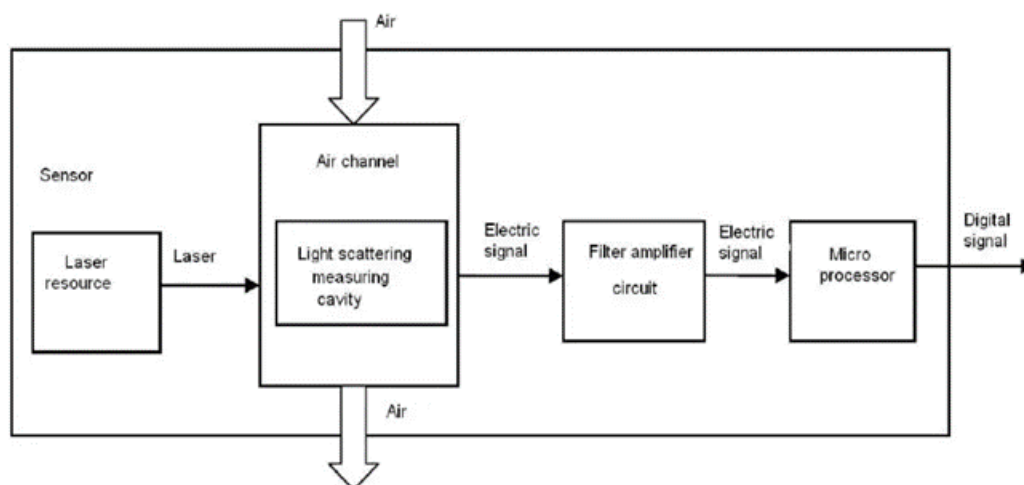


(ข)

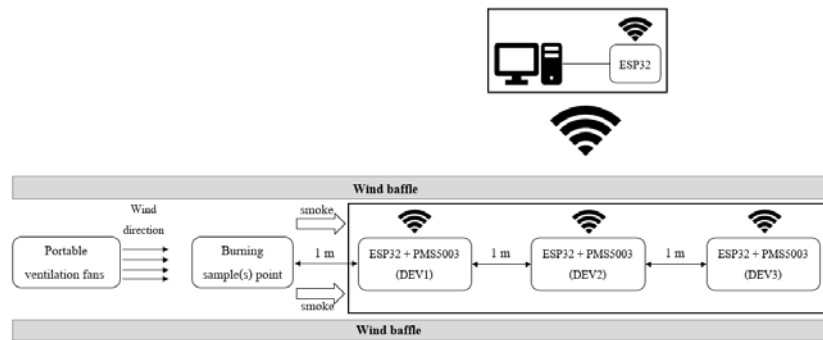


(ค)

รูปที่ 2 เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มข้นของ PM (ก) ESP32 (ข) PlanTower Laser Dust Sensor PMS5003 (ค) การต่อเซนเซอร์ PlanTower Laser Dust Sensor PMS5003 กับ ESP32



รูปที่ 3 Functional block diagram of sensor

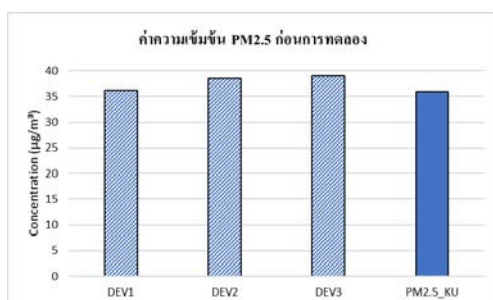


รูปที่ 4 แผนผังการทดลองที่ทำในพื้นที่บริเวณสวนหย่อมโล่งหลังอาคารวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 ที่ตำแหน่งของเซนเซอร์ต่างๆ จากการเผาพืชทดสอบแต่ละชนิด

ก่อนการทดลองเผาพืชทดสอบได้มีการเก็บค่าความเข้มข้น PM2.5 จากเซนเซอร์ทุกตัว หรือค่า PM พื้นฐานในสถานที่ทดลอง (Background) อีกทั้งเพื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้น PM2.5 จากเว็บไซต์รายงานคุณภาพอากาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้น PM2.5 ทั้งจากเซนเซอร์แต่ละตัวรวมถึงจากเว็บไซต์รายงานคุณภาพอากาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ที่แสดงในกราฟแท่ง PM2.5_KU) นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าของ PM พื้นฐานในสถานที่ทดลองมีค่าน้อยมากจนไม่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM จากการทดลองในภาพรวม



รูปที่ 5 ค่าความเข้มข้น PM2.5 ที่เก็บก่อนการทดลอง

ตัวอย่างข้อมูลค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อทำการทดลองเผาพืชเป็นค่าแบบตามเวลาจริง (real time) ซึ่งเก็บข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ดังรูปที่ 6 โดยช่วงเวลา

ที่ 1 หมายถึง ช่วงตั้งแต่การจุดไฟจนค่าของ PM จากเซนเซอร์เริ่มมากขึ้นกว่าค่า PM พื้นฐานในสถานที่ทดลอง ช่วงเวลาที่ 2 หมายถึง ช่วงที่พืชกำลังถูกเผา และช่วงเวลาที่ 3 หมายถึง ช่วงที่ PM จากเซนเซอร์เริ่มลดลงและการเผาของพืชหมดดับ จนถึงไม่มีควันให้เห็นและสิ้นสุดการเก็บข้อมูล



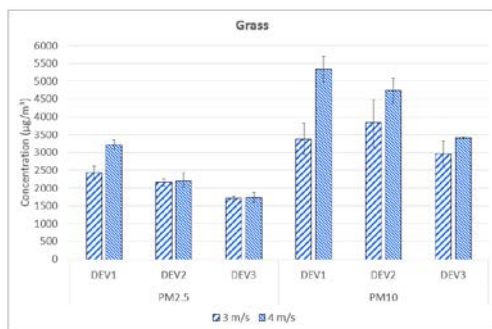
รูปที่ 6 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้ออกจากเซนเซอร์แบบตามเวลาจริง โดยจุดวงกลมแสดงถึงจุดที่เริ่มต้นและสิ้นสุดการเก็บข้อมูล

จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ในรูปที่ 6 มาหาค่าเฉลี่ยจากพื้นที่ใต้กราฟในช่วงเวลา 2 และ 3 โดยค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 จากการเผาหญ้าและฟางข้าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ของการทดลองพืชแต่ละชนิดอย่างละสองครั้งที่ความเร็วลม 3 และ 4 m/s ตามลำดับพร้อมทั้งใส่ค่าการกระจายของข้อมูล (Error bar)

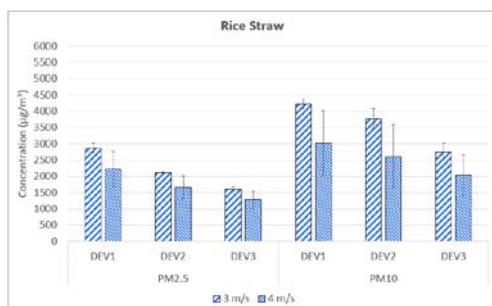
ผลจากการวัดด้วยเซนเซอร์แต่ละตัวโดยตัวแรกวางใกล้กับจุดที่เผามากที่สุดซึ่งห่างเป็นระยะ 1 เมตร เรียกว่า DEV1 และเซนเซอร์ที่อยู่ไกลจากจุดเผามากที่สุด เรียกว่า DEV3 โดยมี DEV2 วางอยู่ตรงกลาง โดยทั้งนี้แต่ละเซนเซอร์ถูกวางห่างกัน 1 เมตร พบว่าเซนเซอร์ที่วัดใกล้

จุดเผามีค่าสูงกว่าตัวที่วางห่างออกไป และมีค่า Error bar ในแต่ละการทดลองในช่วง 5–10% แสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด ซึ่งในส่วนของการทดสอบจากการเผาไหม้พริกขี้หนูไม่ได้นำเสนอในหัวข้อนี้ เนื่องจากมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับหญ้าและฟางข้าว เพียงแต่มีค่า PM ที่วัดได้น้อยกว่ามาก

ดังนั้นภาพรวมส่วนใหญ่พบว่าค่าความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดเผาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของ PM จากแต่ละเซนเซอร์สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้น จึงเลือกแสดงผล ณ ที่ตำแหน่งเซนเซอร์ตัวแรกซึ่งใกล้จุดที่เผามากที่สุด คือ DEV1



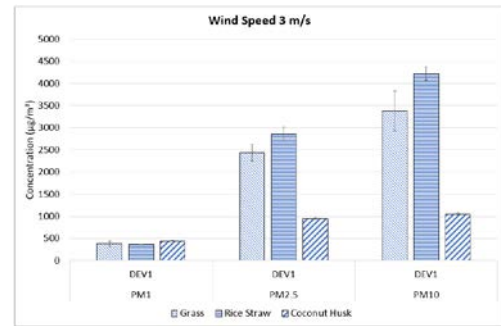
รูปที่ 7 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM2.5 และ PM10 จากเซนเซอร์แต่ละตัวจากการเผาหญ้า



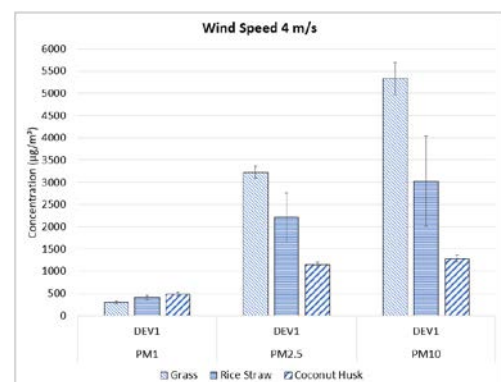
รูปที่ 8 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM2.5 และ PM10 จากเซนเซอร์แต่ละตัวจากการเผาฟางข้าว

3.2 การเผาพืชต่างชนิดกันที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาดในแต่ละความเร็วลม

ค่าความเร็วลมที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ความเร็วลมที่ 3 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 9 และ 4 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทย



รูปที่ 9 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM1 PM2.5 และ PM10 จากการเผาหญ้า ฟางข้าว และกาบมะพร้าวที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 10 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM1 PM2.5 และ PM10 จากการเผาหญ้า ฟางข้าว และกาบมะพร้าวที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที

ในภาพรวมที่แต่ละความเร็วลมนั้นเป็นดังนี้ โดยที่ ณ ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาทีพบว่าการเผาไหม้พริกขี้หนูมีค่าความเข้มข้นของ PM1 มากกว่าจากการเผาหญ้าและฟางข้าว ส่วนค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 จากการเผาไหม้พริกขี้หนูมีค่าน้อยกว่าจากการเผาหญ้าและฟางข้าวอย่างชัดเจน และจากการทดลองที่ ณ ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาทีพบว่าค่าความเข้มข้นของ PM1 จากการเผาพืชทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งการเผาหญ้าที่ ณ ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาทีนั้นมีค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ PM10 กับ PM2.5 จากการเผาไหม้พริกขี้หนูพบว่ามีค่าความเข้มข้นของ PM10 ที่มากกว่า PM2.5 อย่างชัดเจน

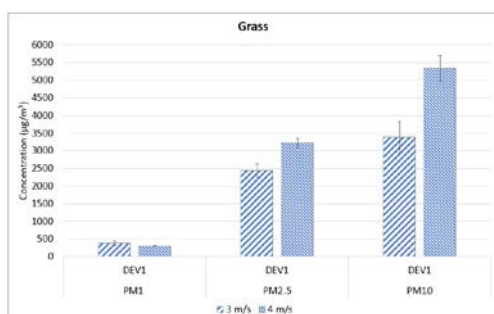
จากผลการทดลองพบว่าทั้งที่ทั้งสองความเร็วลมนั้น PM2.5 และ PM10 มีค่าความเข้มข้นจากการเผาไหม้พริกขี้หนูและ

ฟางข้าวมากกว่าจากการเผาถั่วอย่างชัดเจน แต่ในทางตรงกันข้ามค่าความเข้มข้นของ PM1 จากการเผาถั่วมีแนวโน้มที่มากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของ PM1 จากการเผาหญ้าและฟางข้าว ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมความชื้นของหญ้า ฟางข้าว และ ถั่วอย่างชัดเจน โดยเป็นการวางตากแห้งไว้ในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 25 ถึง 30 องศาเซลเซียสจึงอาจส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของ PM นั้นแตกต่างกัน และจากงานวิจัยของ [28] พบว่าความชื้นของพืชส่งผลต่อการเผาไหม้ช่วง smoldering นานขึ้น ทั้งนี้การเผาไหม้ในของแข็งในทางทฤษฎีมีทั้งหมด 3 ขั้นตอนด้วยกัน[29] ได้แก่ Ignition, Flaming และ Smoldering โดยจากงานวิจัยของ [30] และ[31] พบว่า PM2.5 จากการเผาไหม้ smoldering มากกว่าการเผาไหม้ในขั้น Flaming

ดังนั้นแนวโน้มของความชื้นของพืชส่งผลต่อแต่ละขั้นตอนของการเผาไหม้ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าของ PM เช่นเดียวกัน เห็นได้ว่าค่าของ PM จากการเผาหญ้า ฟางข้าว และถั่วมีความแตกต่างกัน

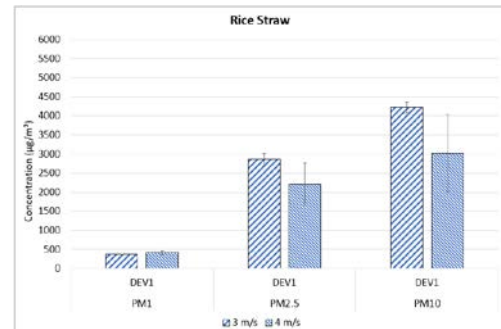
3.3 ความเร็วลมที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาดจากการเผาพืชแต่ละชนิด

ผลจากการเผาหญ้าแสดงดังรูปที่ 11 พบว่าค่าความเข้มข้น PM1 ในทั้งสองค่าความเร็วลมนั้นไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเช่นเดียวกันกับใน PM2.5 แต่ความเร็วลมส่งผลอย่างเห็นได้ชัดใน PM10 โดยที่ความเร็วลมเท่ากับ 4 เมตรต่อวินาทีมีค่าความเข้มข้นของ PM10 มากกว่าที่ความเร็วลมเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที



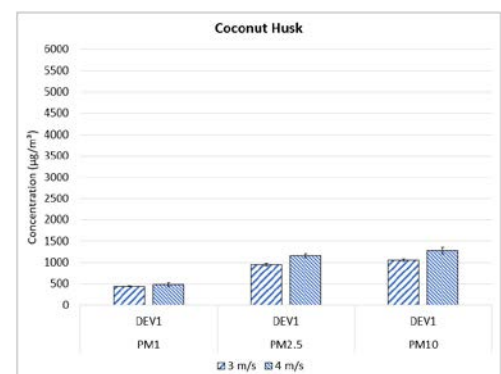
รูปที่ 11 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM1 PM2.5 และ PM10 จากการเผาหญ้า ที่ ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที และ 4 เมตรต่อวินาที

ในส่วนของผลจากการเผาฟางข้าวแสดงดังรูปที่ 12 พบว่าอิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 มีผลตรงกันข้ามกับการเผาหญ้า โดยที่ความเร็วลมที่ 4 เมตรต่อวินาทีมีค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 น้อยกว่าที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที แต่ที่ความเร็วลมทั้งสองไม่เห็นความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของ PM1



รูปที่ 12 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM1 PM2.5 และ PM10 จากการเผาฟางข้าว ที่ ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที และ 4 เมตรต่อวินาที

สำหรับผลจากการเผาถั่วได้แสดงไว้ดังรูปที่ 13 พบว่าทั้ง PM1 PM2.5 และ PM10 ในแต่ละความเร็วลมมีค่าความเข้มข้นใกล้เคียงกัน และค่าความเข้มข้นของ PM ทั้งสามขนาดจากเซนเซอร์แต่ละตัวมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงไม่อาจสรุปแนวโน้มอย่างชัดเจนได้จากอิทธิพลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM ทั้งสามขนาดจากการเผาถั่วได้



รูปที่ 13 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM1 PM2.5 และ PM10 จากการเผาถั่ว ที่ ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที และ 4 เมตรต่อวินาที

โดยจากงานวิจัยของ [32] ทำการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของ PM10 ในช่วงของฤดูหนาวจำนวน 2 เดือน ตั้งแต่ปี 2009 ถึง 2015 พบว่าที่ความเร็วลมต่ำส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM10 ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของ PM10 จากการเผาฟางข้าว ซึ่งจากงานวิจัยของ [33] ที่ศึกษาผลจากปริมาณน้ำฝนและความเร็วลมที่ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 ตั้งแต่ปี 2016 ถึง 2018 พบว่าความเร็วลมส่งผลต่อการลดลง PM2.5 และ PM10 เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นถึง 2 เมตรต่อวินาที แต่หากเมื่อความเร็วลมมากกว่า 4 เมตรต่อวินาทีจะส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของ PM10 เพิ่มขึ้น ซึ่งความเร็วลมที่กำหนดในงานวิจัยนี้ คือ ที่ 3 และ 4 เมตรต่อวินาทีโดยอยู่ในช่วงระหว่างข้อสรุปจากงานวิจัย [33] จึงอาจเป็นที่มาที่ทำให้เห็นแนวโน้มตรงกันข้ามของค่า PM2.5 และ PM10 จากการเผาหญ้าและฟางข้าวที่แตกต่างกัน

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาด ได้แก่ PM1 PM2.5 และ PM10 จากการเผาพืชต่างชนิดที่ความเร็วลมเดียวกันมีความแตกต่างกันทั้งนี้สืบเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพในการเผาไหม้ ได้แก่ เฟสในการเผาไหม้ รวมถึงความชื้นในพืชแต่ละชนิด โดยในภาพรวมค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 จากการเผาภาพมะพร้าว นั้นมีค่าน้อยที่สุด อีกทั้งความเร็วลมส่งผลโดยตรงต่อค่าความเข้มข้นของ PM เช่นกัน โดย PM2.5 และ PM10 จากการเผาหญ้าที่ความเร็วลม 4 m/s มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าที่ 3 m/s แต่ในทางกลับกัน PM2.5 และ PM10 จากการเผาฟางข้าวที่ความเร็วลม 4 m/s นั้นมีค่าความเข้มข้นน้อยกว่าที่ 3 m/s แต่ในส่วนของ PM1 นั้นในพืชทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองความเร็วลม สำหรับค่าความเข้มข้นของ PM ทั้งสามขนาดที่เก็บจากการเผาภาพมะพร้าวในทั้งสองความเร็วลมนั้นก็มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลจากการทดลองนี้จึงได้ข้อสรุปอย่างชัดเจนว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจจะทำให้ค่าความเข้มข้นของ PM แต่ละขนาดลดลงได้ตามหลักทฤษฎีการกระจายของควันทันที หากแต่ลักษณะกายภาพของการเผาพืชต่างชนิดกัน

น่าจะมีอิทธิพลที่สำคัญต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้นของ PM เช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ขอขอบคุณนายชนาธิป นิภากรพันธ์, นายพิริชญ์ เหมนแก้ว และนายพิสิฐธรณ์ สุทธิสมบุญ สำหรับการเก็บข้อมูลผลการทดลองในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนวิจัยคณะที่ 65/13/ME/D.ENG

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Zhao, H. Che, X. Zhang, Y. Ma, Y. Wang, H. Wang and Y. Wang, "Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 4, no. 4, pp. 427–434, 2013, doi: 10.5094/APR.2013.049.
- [2] T. Jeensorn, P. Apichartwivat and W. Jinsart, "PM10 and PM2.5 from Haze Smog and Visibility Effect in Chiang Mai Province Thailand," *Applied Environmental Research*, vol. 40, no. 3, pp. 1–10, 2018, doi: 10.35762/AER.2018.40.3.1.
- [3] Y. -F. Xing, Y. -H. Xu, M. -H. Shi and Y. -X. Lian, "The impact of PM2.5 on the human respiratory system," *Journal of thoracic disease*, vol. 8, no. 1, pp. E69–E74, 2016, doi: 10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19.
- [4] K. Singh and D. Tripathi, "Particulate Matter and Human Health," in *Environmental Health*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2021, ch. 3, pp. 1–15. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/79308>.
- [5] P. Srinamphon, S. Chernbumroong and K. Tippayawong, "The Effect of Small Particulate Matter on Tourism and Related SMEs in Chiang Mai, Thailand," *Sustainability*, vol. 14, no. 13, 2022, Art. no. 8147, doi: 10.3390/su14138147.
- [6] T. Namcome and R. Tansuchat, "The Impact of Fine Particulate Matter (PM 2.5) Pollution on the Number of

- Foreign Tourists in Chiang Mai and Bangkok,” *Rajabhat Chiang Mai Research Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 19–35, 2021, doi: 10.14456/rcmrj.2021.247437.
- [7] T. Supasri and S. Sampattagul, “Haze Problem in the North of Thailand and DustBoy PM 2.5 Monitoring Systems,” presented at *the LASS Annual Meeting 2019*, Hsinchu, Taiwan, 2019, Paper 1001.
- [8] N. Chuersuwana, S. Nimrat, S. Lekphet and T. Kerdumrai, “Levels and major sources of PM2.5 and PM10 in Bangkok Metropolitan Region,” *Environment international*, vol. 34, no. 5, pp. 671–677, 2008, doi: 10.1016/j.envint.2007.12.018.
- [9] N. Kanjanasiranont, T. Butburee and P. Peerakiatkhajohn, “Characteristics of PM10 Levels Monitored in Bangkok and Its Vicinity Areas, Thailand,” *Atmosphere*, vol. 13, no. 2, 2022, doi: 10.3390/atmos13020239.
- [10] W. Wimolwattanapun, P. K. Hopke and P. Pongkiatkul, “Source apportionment and potential source locations of PM2.5 and PM2.5–10 at residential sites in metropolitan Bangkok,” *Atmospheric Pollution Research*, vol. 2, no. 2, pp. 172–181, 2011, doi: 10.5094/APR.2011.022.
- [11] Pollution Control Department, “National Master Plan for Open Burning Control,” Pollution Control Department, Bangkok, Thailand, Rep. no. c.p. 03-06-066, 2020, Accessed: Mar. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.pcd.go.th/publication/4692>.
- [12] Office of Agricultural Economics, “Agricultural Statistics of Thailand 2017,” Office of Agricultural Economics, Bangkok, Thailand, 2017, Accessed: Jan. 1, 2023. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/yearbook60.pdf>.
- [13] Office of Agricultural Economics, “Agricultural Statistics of Thailand 2018,” Office of Agricultural Economics, Bangkok, Thailand, 2018, Accessed: Jan. 1, 2023. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2562/yearbook2561.pdf>.
- [14] Office of Agricultural Economics, “Agricultural Statistics of Thailand 2019,” Office of Agricultural Economics, Bangkok, Thailand, 2019, Accessed: Jan. 1, 2023. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2563/yearbook62edit.pdf>.
- [15] Office of Agricultural Economics, “Agricultural Statistics of Thailand 2020,” Office of Agricultural Economics, Bangkok, Thailand, 2020, Accessed: Jan. 1, 2023. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2564/yearbook2563.pdf>.
- [16] Office of Agricultural Economics, “Agricultural Statistics of Thailand 2021,” Office of Agricultural Economics, Bangkok, Thailand, 2021, Accessed: Jan. 1, 2023. [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2565/yearbook2564.pdf>.
- [17] B. Sajjakulnukit, R. Yingyuad, V. Maneekhao, V. Pongnarintasut, S. Bhattacharya and P. Abdul Salam, “Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Thailand,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 29, no. 3, pp. 214–224, 2005, doi: 10.1016/j.biombioe.2005.03.009.
- [18] W. Song, Y. He, Y. Wu and W. Qu, “Characterization of Burning Behaviors and Particulate Matter Emissions of Crop Straws Based on a Cone Calorimeter,” *Materials*, vol. 14, no. 12, 2021, Art. no. 3407, doi: 10.3390/ma14123407.
- [19] X. Li, S. Wang, L. Duan, J. Hao, C. Li, Y. Chen and L. Yang, “Particulate and Trace Gas Emissions from Open Burning of Wheat Straw and Corn Stover in China,” *Environmental science & technology*, vol. 41, no. 17, pp. 6052–6058, 2007, doi: 10.1021/es0705137.
- [20] R. Harrison, J. Yin, D. Mark, J. Stedman, R. S. Appleby, J. Booker and S. Moorcroft, “Studies of the

- Coarse Particle (2.5-10 μm) Component in UK Urban Atmospheres,” *Atmospheric Environment*, vol. 35, no. 21, pp. 3667–3679, 2001, doi: 10.1016/S1352-2310(00)00526-4.
- [21] M. Can, C. Tianhai, B. Fangwen, G. Xingfa, W. Jian, Z. Xin and S. Shuaiyi, “The Impact of Meteorological Factors on Fine Particulate Pollution in Northeast China,” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 20, pp. 1618–1628, 2020, doi: 10.4209/aaqr.2019.10.0534.
- [22] R. Barratt, “Understanding the Atmosphere,” in *Atmospheric Dispersion Modelling: An Introduction to Practical Applications*, 1st ed., London, UK: Routledge, 2001, ch. 3, sec. 7, pp. 30–32.
- [23] S. Chingulpitak and S. Wongwises, “Critical review of the current status of wind energy in Thailand,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 312–318, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.11.038.
- [24] Rice, Science Center Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Mar. 30, 2023 [Online]. Available: <https://dna.kps.ku.ac.th/index.php/article-rice-rsc-rgdu/45-rice>.
- [25] S. Panyakaew and S. Fotios, “New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 7, pp. 1732–1739, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.015.
- [26] Adafruit Industries LLC. *Product Data Manual of Plantower (Digital universal particle concentration sensor (PMS5003 series data manual))*, 2016. Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.digikey.jp/htmldatasheets/production/2903006/0/0/1/pms5003-series-manual.html>.
- [27] *Highway Standard*, Department of Highways, [Online] Available: <http://www.doh.go.th/content/page/page/5624>.
- [28] Y. Zhang, D. Obrist, B. Zielinska and A. Gertler, “Particulate emissions from different types of biomass burning,” *Atmospheric Environment*, vol. 72, pp. 27–35, 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.02.026.
- [29] R. Koppmann, K. Czapiewski and J. S. Reid, “A review of biomass burning emissions, Part I: Gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 5, pp. 10455–10516, 2005, doi: 10.5194/acpd-5-10455-2005.
- [30] Y. -P. Hsieh, G. Bugna and K. Robertson, “Thermochemical Properties of PM_{2.5} as Indicator of Combustion Phase of Fires,” *Atmosphere*, vol. 9, no. 6, 2018, Art. no. 230, doi: 10.3390/atmos9060230.
- [31] S. Balachandran, J. E. Pachon, S. Lee, M. M. Oakes, N. Rastogi, W. Shi, E. Tagaris, B. Yan, A. Davis, X. Zhang, *et al.*, “Particulate and gas sampling of prescribed fires in South Georgia, USA,” *Atmospheric Environment*, vol. 81, pp. 125–135, 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.08.014.
- [32] R. Cichowicz, G. Wielgosinski and W. Fetter, “Effect of wind speed on the level of particulate matter PM₁₀ concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant,” *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 77, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1007/s10874-020-09401-w.
- [33] Z. Liu, L. Shen, C. Yan, J. Du, Y. Li and H. Zhao, “Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM_{2.5} and PM₁₀ in the Atmosphere,” *Advances in Meteorology*, vol. 2020, 2020, Art. no. 5039613, doi: 10.1155/2020/5039613.

การประเมินความรุนแรงภายใต้การปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ในพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณโหลดและกำลังการผลิตสูง

Severity Assessment under Load Shedding to Thailand's Power System in High Difference of Load and Generation Capacity Areas

ชัยสิทธิ์ วันน้อย¹ และ นฤมล วันน้อย^{2,*}

¹สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ สระเดียง เมือง เพชรบูรณ์ 67000

²สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ สระเดียง เมือง เพชรบูรณ์ 67000

Chaisit Wannoi¹ and Narumon Wannoi^{2,*}

¹Department of Computer Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,

Phetchabun Rajabhat University, Sadiang, Phetchabun, 67000, Thailand

²Department of Industrial Electrical Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,

Phetchabun Rajabhat University, Sadiang, Phetchabun, 67000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: narumon.wan@pcru.ac.th

Received: Dec 16, 2022; Revised: Apr 17, 2023; Accepted: Apr 21, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินความรุนแรงภายใต้การปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณโหลดและกำลังการผลิตสูงด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1 โดยได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบใน 2 พื้นที่คือระบบไฟฟ้ากำลังภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีกำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่าปริมาณโหลดอยู่ที่ 6,072.08 MW และระบบไฟฟ้ากำลังภาคกลางซึ่งมีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิตอยู่ที่ 8,471.87 MW โดยผลการศึกษาจะพิจารณาจำนวนอุปกรณ์และปริมาณที่ละเมิดค่าควบคุมของระบบ และเปรียบเทียบผลกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่งจำนวนหนึ่งอุปกรณ์ โดยผลการศึกษาพบว่ากรณีการปลดโหลดภายใต้ระบบที่มีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิตจะทำให้ระบบเกิดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลมากกว่าระบบที่มีกำลังผลิตสูงกว่าปริมาณโหลดโดยมีจำนวนอุปกรณ์ละเมิดค่าควบคุม 11 อุปกรณ์และได้รับภาระโหลดสูงสุดที่ 260.50% นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงกลุ่มโหลดและอุปกรณ์ที่สำคัญในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าและยังสามารถจัดลำดับพื้นที่วิกฤตเพื่อใช้วางแผนปรับปรุงความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ: การปลดโหลด, ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหล, เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1, ความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลัง

Abstract

This paper presents severity assessment under load shedding to Thailand's power system in high difference of load and generation capacity areas with n-1 contingency analysis. This impact study focuses in 2 areas which are the Eastern power system with a generation capacity greater than the load capacity at 6,072.08 MW and the Central power system with

load capacity greater than the generation capacity at 8,471.87 MW. The study results will consider the number of equipment and quantity that violates the control values of the system and compare the results with the case of loss of a generator, a transformer and a transmission line. The study found that in case of load group shedding under a system with load greater than the generation capacity, the system will have higher power flow congestion than a system with higher generation capacity than the load capacity. This impact has 11 devices in violation of the control parameters and achieves a maximum load of 260.50%. In addition, it is possible to identify critical load groups and equipment in power transmission, and to rank critical areas for planning to improve power system security.

Keywords: Load shedding, Power flow congestion, N-1 contingency analysis, Power system security

1. บทนำ

การควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยทั่วไปจะมีการแบ่งพื้นที่การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบย่อย ๆ เพื่อความสะดวกในการควบคุมและการวางแผนระบบ โดยในแต่ละระบบไฟฟ้ากำลังย่อยนั้น หากพิจารณาสัดส่วนหรือข้อมูลของปริมาณกำลังผลิตไฟฟ้าและปริมาณโหลดในแต่ละระบบย่อยจะพบว่า ปริมาณกำลังผลิตและปริมาณโหลดนั้นจะมีสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งหมายความว่า บางระบบย่อยอาจมีกำลังการผลิตไฟฟ้าในพื้นที่สูงกว่าปริมาณโหลด และบางระบบก็อาจมีปริมาณโหลดในพื้นที่มากกว่ากำลังผลิตไฟฟ้าเนื่องจากในแต่ละพื้นที่หรือระบบย่อยนั้นมีความเหมาะสมในการติดตั้งหรือสร้างโรงไฟฟ้าไม่เหมือนกัน และบางพื้นที่เป็นพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในด้านการก่อสร้างหรือเป็นฐานการผลิตด้านอุตสาหกรรมจึงทำให้เกิดความแตกต่างด้านปริมาณโหลดหรือกำลังผลิตเกิดขึ้น ดังนั้นในแต่ละระบบย่อยจะถูกเชื่อมต่อกับสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ (Inter-tied lines) เพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าข้ามพื้นที่ซึ่งถือได้ว่าเป็นสายส่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมเกิดความสมดุลระหว่างปริมาณกำลังผลิตและปริมาณโหลด ซึ่ง [1] ได้นำเสนอเทคนิคในการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าข้ามพื้นที่โดยพิจารณาจากการสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ และ [2] ได้ทำการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ด้วย TCPS นอกจากนี้ยังมี [3] ได้ทำการศึกษาความมั่นคงของสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่โดยพิจารณาช่วงเวลาในการ

เชื่อมต่อ และระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยก็เช่นเดียวกัน ได้มีการแบ่งพื้นที่ควบคุมออกเป็นทั้งหมด 7 ระบบไฟฟ้ากำลังย่อย และภายใต้ความแตกต่างของกำลังการผลิตและปริมาณโหลดของแต่ละระบบย่อยนี้ การศึกษาถึงผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้เหตุการณ์ฉุกเฉิน โดยเฉพาะการสูญเสียอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานจำนวนหนึ่งอุปกรณ์ N-1 ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ซึ่งการศึกษาลักษณะภายใต้ระบบสูญเสียอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่ง [4] ได้นำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการคำนวณกำลังไฟฟ้าไหลแบบทำซ้ำในการกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสมในการติดตั้ง DRG และยังใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการประเมินความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่ง [5],[6] ได้นำไปศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังและนอกจากนี้ [7-9] ยังได้ศึกษาเพื่อนำไปวางแผนป้องกันและยกระดับความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นประกอบด้วยกลุ่มโหลดต่าง ๆ ที่เชื่อมต่ออยู่กระจายในแต่ละระบบย่อย ซึ่งหากกลุ่มโหลดเหล่านี้ถูกปลดออกโดยเฉพาะภายใต้ระบบในช่วงเวลาที่มีปริมาณโหลดสูงสุด ก็อาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังได้เช่นเดียวกันและจะมีความแตกต่างกันอย่างไรหากระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีความแตกต่างของกำลังผลิตไฟฟ้าและปริมาณโหลดที่สูง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความรุนแรง และความแตกต่างของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในพื้นที่ที่มีความแตกต่างสูงของปริมาณโหลดและกำลังการผลิต

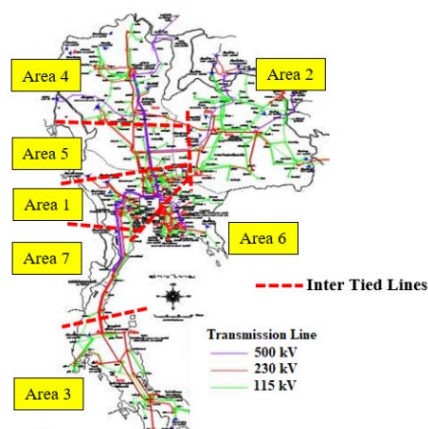
และเพื่อศึกษากลุ่มโหลดและอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงานในระบบเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนปรับปรุงความมั่นคงของระบบด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1 ซึ่งผลกระทบจากการปลดโหลดนั้นก็จะเป็นประเด็นหนึ่งที่มี [10],[11] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อความเสถียรภาพระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวางแผนป้องกันความเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง และยังมี [12],[13] ได้ทำการศึกษาเพื่อนำเสนอวิธีการในการปลดโหลดเพื่อการรักษาความถี่แรงดันไฟฟ้าในระบบ และในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบในกรณีโหลดถูกปลดออกกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง โดยการเปรียบเทียบจะพิจารณาผลกระทบจากจำนวนอุปกรณ์และขนาดที่จะเกิดต่อค่าความคุมของระบบซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์โหลดของอุปกรณ์ (%loading) ซึ่ง [14] ได้นำเสนอการระบุโหลดบัสวิกฤตและเทคนิคการคำนวณความสามารถของโหลดบัส และสำหรับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบกับผลกระทบในกรณีที่ระบบสูญเสีย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉินระดับ 1 อุปกรณ์เช่นเดียวกัน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยซึ่งมีกำลังผลิต 30,286.70 MW เป็นระบบฐานในการศึกษา และในการวิเคราะห์ผลในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม PowerWorld Simulator นอกจากนี้ผลการศึกษา

ยังทำให้ทราบถึงอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงาน และลำดับพื้นที่วิกฤตภายใต้การปลดโหลดเพื่อใช้วางแผนปรับปรุงความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังฐานในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยที่ได้มีการปรับปรุงปี 2019 ซึ่งเป็นข้อมูลช่วงที่มีปริมาณโหลดสูงสุด (Peak load) และระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยที่ใช้ในการศึกษานั้นได้แบ่งพื้นที่ที่ควบคุมออกเป็น 7 ระบบย่อย ซึ่งในแต่ละระบบย่อยนั้นถูกเชื่อมต่อด้วยสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ [15],[16] ดังแสดงในรูปที่ 1 และข้อมูลของระบบดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ภาพโดยรวมระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

ตารางที่ 1 ปริมาณกำลังผลิตและโหลดของระบบไฟฟ้าประเทศไทยปรับปรุง, 2019

Area	Name	Generation (MW)	Loads (MW)	Difference of Power (MW) (Gen.-Loads)	Losses (MW)
1	Central	2,378	10,849.87	-8,471.87	97.98
2	Northeastern	2,859.23	3,229.87	-370.64	134.28
3	Southern	2,090	2,669.37	-579.37	70.25
4	Upper Northern	3,518.59	3,010.56	508.03	133.96
5	Lower Northern	3,972.10	3,162.58	809.52	84.78
6	Eastern	10,134.06	4,061.98	6,072.08	55.79
7	Western	5,334.72	2,675.75	2,658.97	49.68
Total	-	30,286.70	29,659.98	-	626.72

จาก รูปที่ 1 และ ตารางที่ 1 จะพบว่าพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณกำลังผลิตมากกว่าปริมาณโหลดในระบบสูงสุดคือพื้นที่ 6 โดยมีความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 6,072.08 MW และพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณ

โหลดสูงกว่ากำลังผลิตในระบบสูงสุดคือพื้นที่ 1 โดยมีความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 8,471.87 MW ดังนั้นในการศึกษาจะมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบใน 2 พื้นที่ดังกล่าวนี้ โดยจำนวนโหลดบัสในพื้นที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

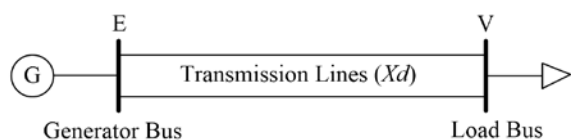
ตารางที่ 2 ปริมาณโหลดในพื้นที่ 1 และ 2 ของระบบไฟฟ้าประเทศไทยปรับปรุง, 2019

No.	Load group in Area 1					Load group in Area 6				
	Bus.No.	Bus.Name	MW	MVar	MVA	Bus.No.	Bus.Name	MW	MVar	MVA
1	1601	NB-1236	588.1	175.94	613.85	6704	WNK	46.84	17.5	50
2	1602	LPR-12	323.81	75.56	332.51	6708	BBG	77.42	46.76	90.45
3	1603	BK-12	255.27	108.91	277.53	6709	AP	312.28	257.19	404.56
4	1604	BPL-1467	339.23	81.49	348.88	6710	BL	134.87	108.51	173.1
5	1605	SB-12	448.8	199.36	491.08	6717	CT	161.85	52.92	170.28
6	1606	STB-12	321.81	152.82	356.25	6718	TR	13.16	2.24	13.35
7	1607	BN-2378	573.99	280.58	638.89	6723	BWN	549.4	280.02	616.64
8	1609	RS-1247	275.85	152.34	315.12	6724	KLM	672.77	394.91	780.11
9	1612	LPR-34	269.07	84.28	281.96	6726	PA2	278.76	137.77	310.94
10	1613	BK-34	517.31	209.09	557.97	6809	SSM	112.01	28	115.45
11	1615	SB-4	167.03	55.84	176.12	6901	MTP1	118.76	39.04	125.01
12	1616	STB-34	309.55	146.93	342.65	6902	RYB2	65.34	28.52	71.29
13	1625	SB-5	148.26	55.24	158.22	6902	RYB2	65.34	28.52	71.29
14	1640	RPS-12	444.6	185.29	481.67	6902	RYB2	65.34	28.52	71.29
15	1663	TPR-34	120.07	49.83	130	6904	RYB1	54.04	23.75	59.03
16	1704	BPL-235	650.07	285.16	709.86	6904	RYB1	109.25	23.75	111.8
17	1705	SB-3	126.12	67.78	143.18	6905	MTP2	307.42	110.84	326.79
18	1707	BN-46	205.46	13.81	205.92	6936	NPC	83.89	12.34	84.8
19	1708	SNO-12	249.44	177.73	306.29	6937	RY_LOAD	59.92	12.17	61.15
20	1709	RS-568	95.12	28.36	99.26	6938	SPR_LAOD	35.95	17.98	40.2
21	1710	NCO-456	614.39	364.68	714.47	6939	TPI_LAOD	88.69	17.98	90.49
22	1711	ON-1	354.89	99.86	368.67	6971	TPI	177.29	98.01	202.58
23	1715	SB-6	160.52	52.06	168.75	-	-	-	-	-
24	1717	CHW-12	532.34	198.28	568.07	-	-	-	-	-
25	1763	TPR-12	354.72	207.28	410.85	-	-	-	-	-
26	1802	LPR	367.49	101.37	381.21	-	-	-	-	-
27	1803	BK	443.4	39.3	445.13	-	-	-	-	-
28	1806	STB	511.33	244.81	566.91	-	-	-	-	-

2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหล

ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (Power system security) คือ การที่ระบบไฟฟ้ายังคงสามารถ จ่ายโหลดได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ได้คาดหมาย (Contingency) ขึ้นในระบบ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจเกิดจากการหลุด (Outage) ของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง หรือโหลดขนาดใหญ่ โดยทั่วไประบบไฟฟ้าจะคำนึงถึงความมั่นคงในระดับ N-1 contingency คือ การสูญเสียของอุปกรณ์ไฟฟ้า 1 อุปกรณ์ในระบบแล้วระบบยังคงมี กำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่าย โหลดได้ และในโครงการวิจัยยังได้ทำการจัดอันดับพื้นที่วิกฤตด้วยการวิเคราะห์สภาวะฉุกเฉิน (N-1) ภายได้ผลกระทบการปลดโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการศึกษานี้ได้ประเมินความรุนแรงของระบบไฟฟ้าจากผลกระทบต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลในระบบ ซึ่งหากพิจารณาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านในสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่ง จากบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังบัสโหลดนั้น โดยสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดผ่านสายส่ง

โดยการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะมีขีดจำกัดอยู่ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าส่งผ่านจากบัส E ไปยัง บัส V นั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$P_{E-V} = \frac{EV}{X_d} \sin \delta_c \quad (1)$$

โดยที่

P_{E-V} คือ กำลังไฟฟ้าส่งผ่านจากบัส E ไปยัง บัส V

E คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสของโหลด

δ_c คือ มุมโรเตอร์

X_d คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

จากสมการที่ (1) ค่าจำกัดในการควบคุมกำลังผ่านกำลังไฟฟ้าจะมีอยู่ 3 ปัจจัยด้วยกันคือในส่วนแรกค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสของโหลด ส่วนที่สองคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (X_d) และส่วนสุดท้ายคือค่ามุมโรเตอร์ (δ_c) ซึ่งหากมีการรบกวนอย่างรุนแรงเกิดขึ้นเช่น ระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า สายส่ง และกลุ่มโหลดในระบบก็จะส่งผลให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไป และอาจส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหล [9],[17] ได้โดยจะส่งผลให้แรงดันในระบบต่ำกว่าหรือมากกว่าค่าควบคุม และอาจส่งผลให้อุปกรณ์ได้รับการกระทบ ซึ่งสาเหตุให้ระบบไฟฟ้ากำลังไม่เสถียรภาพโดยค่าควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษานี้ได้กำหนดค่าจำกัดของการละเมิดการควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบไปด้วย 2 ค่าคือ ค่าจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้าและค่าจำกัดด้านภาระโหลดของอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงาน ซึ่งจะแปรผันตามค่าความต้านทานของสายส่งโดยข้อกำหนดในการวิเคราะห์ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลโดยพิจารณาจากจำนวนอุปกรณ์และขนาดที่ละเมิดค่าควบคุม โดยค่าควบคุมระบบนั้นได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 3

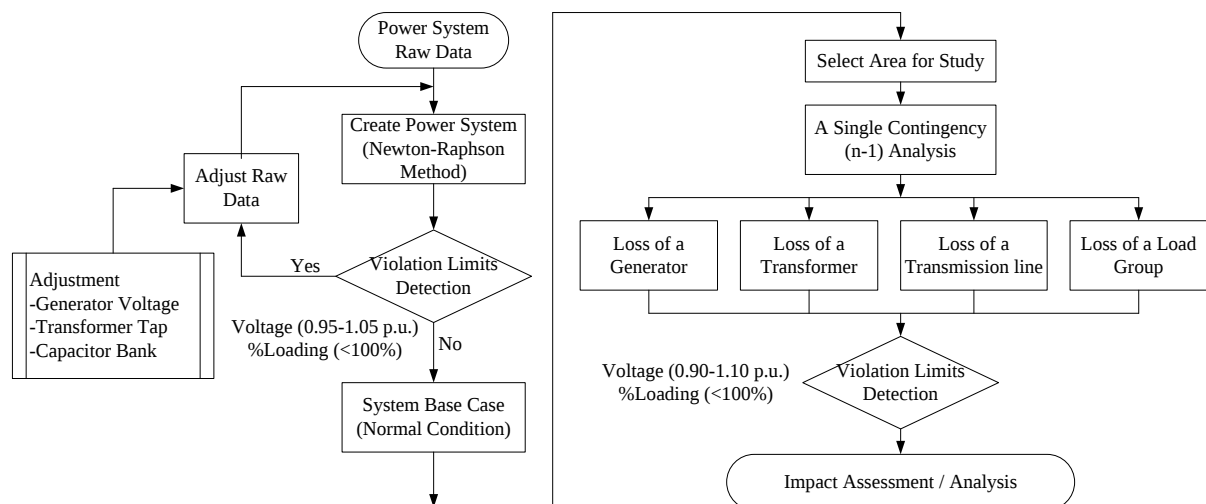
ตารางที่ 3 ค่าจำกัดการควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังฐาน

Case study	Violation Limits	Control Setting	Unit
Power system base Case	Voltage	0.95-1.05	p.u.
	%Loading	<100	%
Congestion impact assessment	Voltage	0.90-1.10	p.u.
	%Loading	<100	%

2.3 กระบวนการวิจัย

แผนผังกระบวนการในการศึกษาวิจัยสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3 โดยในการศึกษาได้เริ่มจากการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังฐานเพื่อใช้ในการศึกษา โดยในการศึกษาได้ใช้ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยปี 2019 ซึ่งในการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะใช้วิธีการคำนวณของ Newton-Raphson สำหรับค่าควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการกำหนดค่าควบคุมไว้ 2 ค่าด้วยกันซึ่งประกอบไปด้วยค่าจำกัดแรงดันไฟฟ้า และภาระโหลดของอุปกรณ์ โดยค่าควบคุมทั้งสองค่าได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งในกระบวนการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังนั้นหากพบว่าระบบมีการละเมิดค่าควบคุม จะทำการปรับฐานข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดการละเมิดค่าควบคุมจะประกอบไปด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แท็บของหม้อแปลง

และแท็บของชุดคาปาซิเตอร์ (capacitors bank) เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังไม่มีการละเมิดค่าควบคุมแล้วก็จะได้ระบบไฟฟ้ากำลังฐานในการศึกษา จากนั้นก็จะทำการกำหนดพื้นที่ในการศึกษาโดยได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบจากการปลดโหลดใน 2 พื้นที่คือ พื้นที่ 6 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณกำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่าปริมาณโหลดในระบบสูงสุด และพื้นที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณโหลดสูงกว่ากำลังผลิตในระบบสูงสุด โดยในการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบผลกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่งในระบบจำนวน 1 อุปกรณ์ โดยได้กำหนดค่าควบคุมไว้ 2 ค่าประกอบด้วยค่าควบคุมด้านแรงดัน 0.90–1.10 p.u. และค่าภาระโหลดน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาความรุนแรงที่เกิดขึ้น และการจัดลำดับพื้นที่ที่วิกฤตจากผลกระทบภายใต้การปลดโหลด



รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการประเมินผลกระทบภายใต้เหตุการณ์ฉุกเฉิน (N-1 contingency)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบภายใต้ระบบสูญเสียกลุ่มโหลด ในสองพื้นที่ที่มีความแตกต่างด้านปริมาณโหลดและกำลังผลิตสูงซึ่งผลการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบผลในกรณีที่ระบบเกิดการสูญเสียอุปกรณ์จำนวน 1 อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง พร้อม

ค้นหากลุ่มโหลดและอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงาน รวมถึงการจัดลำดับความสำคัญของอุปกรณ์ดังกล่าวโดยผลการศึกษานั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.1 ผลการศึกษาผลกระทบจากการปลดโหลด

ผลการศึกษาผลกระทบหรือความรุนแรงจากการปลดโหลด [18–21] ในแต่ละพื้นที่หรือในแต่ละระบบไฟฟ้ากำลังย่อย ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาผลกระทบภายใต้การวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉินในแต่ละกรณี (N-1 contingency) ในพื้นที่ 1

Contingency record	Type of N-1 contingency			
	Generator	Transformer	Transmission Line	Load group
Device quantity	23	162	148	28
Device quantity to impact	14	75	66	18
Impact proportion (%)	60.87	46.30	44.59	64.29
Max. Violations	9	13	18	11
Device name to highest impact	G_1013SB-T3U3	X_1908SNO-904SNO	L_1808SNO-	Lo_1710NCO-456
	G_1014SB-T4U4	X_1908SNO-905SNO	904SNO	
	G_1015SB-T5U5			
Max. Branch %	105.40	268.10	268	113.30
Device name to highest impact	G_1013SB-T3U3	X_1808SNO-142SNO	L_1708SNO-	Lo_1710NCO-456
	G_1014SB-T4U4		142SNO	
	G_1015SB-T5U5			
Min. Volt (p.u.)	-	0.72	0.72	-
Device name to highest impact	-	X_1808SNO-142SNO	L_01804BPL-	-
			6801BPK-AC1	
Max. Volt (p.u.)	-	1.14	1.14	1.15
Device name to highest impact	-	X_1803BK-113BK-	L_01711ON-	Lo_1710NCO-456
		3JC3	105ON-2JC2	

โดยจากตารางที่ 4 นั้นได้ทำการแสดงผลการศึกษาผลกระทบภายใต้การปลดโหลดและเปรียบเทียบผลกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิต โดยผลการศึกษาพบว่าประเภทอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดสถานะความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหล หากถูกปลดออกจากระบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีถึง 75 เครื่อง แต่ในกรณีการปลดกลุ่มโหลดพบว่ามี 18 กลุ่มโหลดด้วยกัน และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบพบว่ากรณีการปลดกลุ่มโหลดส่งผลกระทบมากที่สุดโดยผลการคำนวณสัดส่วนอยู่ที่ 64.29 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้หากพิจารณาจำนวนการละเมิดค่าควบคุม พบว่ากรณีระบบ

สูญเสียสายส่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลสูงสุดโดยมีจำนวนการละเมิดอยู่ที่ 18 อุปกรณ์ ภายใต้การสูญเสียสายส่งหมายเลข L_1808SNO-904SNO แต่ในกรณีการปลดโหลดมีเพียง 11 อุปกรณ์ โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือ กลุ่มโหลดหมายเลข Lo_1710NCO-456 และหากพิจารณาความรุนแรงของเหตุการณ์พบว่ากรณีระบบสูญเสียหม้อแปลงจะส่งผลให้เกิดความรุนแรงสูงสุดโดยทำให้มีอุปกรณ์ได้รับการปลดเกินสูงถึง 268.10 เปอร์เซ็นต์ และทำให้แรงดันในระบบมีพื้นที่ที่มีแรงดันต่ำถึง 0.72 p.u. ภายใต้การสูญเสียหม้อแปลง หมายเลข X_1908SNO-904SNO หรือ X_1908SNO-905SNO แต่ในกรณีปลดโหลดทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับการปลดเกินสูงถึง 113.30

เปอร์เซ็นต์โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือกลุ่มโหลด
หมายเลข Lo_1710NCO-456 และสำหรับผลการศึกษา
ผลกระทบที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าระบบสูงเกินพิกัดพบว่าผล

จากการปลดโหลดทำให้แรงดันในระบบเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่
1.15 p.u. โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือ กลุ่มโหลด
หมายเลข Lo_1710NCO-456

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาผลกระทบภายใต้การวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉินในแต่ละกรณี (N-1 contingency) ในพื้นที่ 6

Contingency record	Type of N-1 contingency			
	Generator	Transformer	Transmission line	Load group
Device quantity	109	215	150	22
Device quantity to impact	63	86	45	2
Impact proportion (%)	57.80	40.00	30.00	9.09
Max. Violations	8	7	9	5
Device name to highest impact	G_6001BPK-T1U1 G_6002BPK-T2U2	X_6801BPK- 6002BPK-T2C1	L_1804BPL- 6801BPK-AC1	Lo_6724 KLM
Max. Branch (%)	116	155	155	116.40
Device name to highest impact	G_6003BPK-T3U3 G_6004BPK-T4U4	X_6803RY2- 615RY2-6JC6	L_6734RY2-B- 615RY2-6JC6	Lo_6724 KLM
Min. Volt (p.u.)	-	-	0.89	-
Device name to highest impact	-	-	L_6704WNK- 6726PA2C1	-
Max. Volt (p.u.)	-	1.19	1.11	-
Device name to highest impact	-	X_6709AP-606AP- 1JC1	L_06717CT- 00642CT-5JC4	-

จากผลการศึกษาในตารางที่ 5 นั้นได้แสดงผลการศึกษา
และเปรียบเทียบผลกระทบภายใต้การปลดโหลดในพื้นที่ 6
กับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และ
สายส่ง ซึ่งพื้นที่ 6 นั้นเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีปริมาณ
กำลังผลิตมากกว่าปริมาณโหลดสูงสุด โดยผลการศึกษา
พบว่าประเภทของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบทำให้เกิดสภาวะ
ความหนาแน่นการไหลกำลังไฟฟ้ามากที่สุดหากถูกปลด
ออก คือ กรณีระบบสูญเสียหม้อแปลงซึ่งมีถึง 86 เครื่อง
และสำหรับในการกรณีการปลดกลุ่มโหลดนั้นส่งผลกระทบ
น้อยสุดโดยมีกลุ่มโหลดสำคัญเพียง 2 กลุ่มโหลดแต่เมื่อ

พิจารณาสัดส่วนของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบพบว่ากรณี
การปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งผลกระทบมากที่สุดโดยมี
สัดส่วนอยู่ที่ 57.80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การปลดโหลดอยู่
ที่ 9.09 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้หากพิจารณาจำนวนการละเมิดค่าควบคุม
พบว่ากรณีระบบสูญเสียสายส่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาความ
หนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลสูงสุดโดยมีจำนวนการ
ละเมิดอยู่ที่ 9 อุปกรณ์ โดยสายส่งที่มีความสำคัญนี้คือสาย
ส่งหมายเลข L_1804BPL-6801BPK-AC1 แต่กรณีการ
ปลดโหลดส่งผลให้เกิดการละเมิดเพียง 5 อุปกรณ์ โดยกลุ่ม

โหลดที่มีความสำคัญนี้คือโหลดหมายเลข Lo_6724KLM และหากพิจารณาความรุนแรงของเหตุการณ์พบว่ากรณีระบบสูญเสียหม้อแปลงจะส่งผลให้เกิดความรุนแรงสูงสุดโดยมีอุปกรณ์ที่ได้รับภาระ โหลดเกินสูงถึง 155 เปอร์เซ็นต์ และทำให้แรงดันในระบบมีพื้นที่ที่มีแรงดันต่ำถึง 0.89 p.u. แต่กรณีการปลดโหลดส่งผลกระทบทำให้มีอุปกรณ์ที่ได้รับภาระ โหลดเกินสูงถึง 116.40 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือกลุ่มโหลดหมายเลข Lo_1804BPL-6801BPK และสำหรับผลกระทบด้านแรงดันไฟฟ้าสูง พบว่ามีทั้งกรณีที่ระบบไฟฟ้าสูญเสียหม้อแปลง ภายใต้การสูญเสียหม้อแปลงหมายเลข X_6709AP-606AP-1JC1 โดยแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 1.19 p.u. แต่สำหรับกรณีปลดโหลดไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดันในระบบ

3.2 ผลการศึกษาความรุนแรงสูงสุดต่อระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การปลดโหลด

ผลการศึกษาความรุนแรงต่อระบบจากการปลดโหลดใน 2 พื้นที่ โดยในพื้นที่ 1 และจากผลการศึกษาในตารางที่ 4 พบว่ากรณีที่โหลดหมายเลข Lo_1710NCO-456 ถูกปลดออกส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลเป็นบริเวณกว้างมากที่สุดโดยพิจารณา การละเมิดค่าควบคุมของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีค่าสูงสุดที่ 11 อุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วย บัสแรงดันเกิน 3 บัส (Buses) ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่สำคัญในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 6 และทำให้

หม้อแปลงได้รับภาระโหลดเกิน 8 เครื่อง ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งผลกระทบดังกล่าวได้เรียงลำดับ (ranking) เพื่อแสดงให้เห็นถึงลำดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งสำหรับบัสที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันสูงสุดคือ บัสหมายเลข 1710 NCO-456 ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยแรงดันเพิ่มขึ้นสูงถึง 1.15 p.u. และสำหรับภาระโหลดของหม้อแปลงที่ได้รับภาระโหลดสูงสุดคือ หมายเลข 1810 NCO-192 NCO_6J และ 1710 NCO_456-192 NCO_6J โดยภาระโหลดอยู่ที่ 113.30 เปอร์เซ็นต์

และสำหรับผลการศึกษาผลกระทบจากการปลดโหลดในพื้นที่ 6 และจากผลการศึกษาในตารางที่ 5 ผลการศึกษาพบว่ากรณีที่โหลดหมายเลข Lo_6724KLM ถูกปลดออกส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลเป็นบริเวณกว้างมากที่สุดโดยพิจารณา การละเมิดค่าควบคุมของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีค่าสูงสุดที่ 5 อุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วย สายส่งได้รับภาระโหลดเกิน 1 สายส่ง และหม้อแปลงได้รับภาระโหลดเกิน 4 อุปกรณ์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่สำคัญในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งผลกระทบดังกล่าวได้เรียงลำดับ เพื่อแสดงให้เห็นถึงลำดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งสำหรับสายส่งที่ได้รับผลกระทบการรับภาระโหลดเกินสูงสุดคือ สายส่งหมายเลข 1804BPL-6801BPK_A โดยมีภาระโหลดเพิ่มขึ้นสูงถึง 116.40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลกระทบด้านแรงดันพบว่าจากการปลดโหลดในพื้นที่ 6 นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบ

ตารางที่ 6 ผลการจัดลำดับบัสที่วิกฤตด้านแรงดันในพื้นที่ 1

Ranking	Number	Name	Area Name	PU Volt	Volt (kV)
1	1710	NCO-456	1	1.15	132.04
2	192	NCO-6J	1	1.11	127.76
3	160	NCO-5J	1	1.11	127.69

ตารางที่ 7 ผลการจัดลำดับอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่ได้รับภาระโหลดเกินในพื้นที่ 1

Ranking	From Number	From Name	To Number	To Name	Used Limiting Flow	Limit (MVA)	%Loading
1	1810	NCO	192	NCO-6J	260.50	230	113.30
2	1710	NCO-456	192	NCO-6J	260.50	230	113.30

ตารางที่ 7 ผลการจัดลำดับอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่ได้รับภาระโหลดเกินในพื้นที่ 1 (ต่อ)

Ranking	From Number	From Name	To Number	To Name	Used Limiting Flow	Limit (MVA)	%Loading
3	1810	NCO	160	NCO-5J	258.40	230	112.40
4	1710	NCO-456	160	NCO-5J	258.40	230	112.40
5	1810	NCO	155	NCO-4J	241.20	220	109.60
6	1710	NCO-456	155	NCO-4J	242.20	225	107.60
7	4701	BB	401	BB-1J	117.60	115	102.30
8	4701	BB	402	BB-4J	117.60	115	102.30

ตารางที่ 8 ผลการจัดลำดับบัสที่วิกฤตด้านแรงดันในพื้นที่ 6

Ranking	From Number	From Name	To Number	To Name	Used Limiting Flow	Limit (MVA)	%Loading
1	1804	BPL	6801	BPK-A	1110	953.70	116.40
2	4701	BB	402	BB-4J	118.10	115	102.70
3	4701	BB	401	BB-1J	118.10	115	102.70
4	4801	BB	401	BB-1J	120.10	120	100.10
5	4801	BB	402	BB-4J	120.10	120	100.10

ดังนั้นจากข้อมูลของผลการศึกษาที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6-8 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงจำนวนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังและการจัดลำดับของบัสและอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่ได้รับผลกระทบภายใต้การปลดโหลด ซึ่งอุปกรณ์หรือพื้นที่ที่เหล่านี้ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงานและรองรับการถ่ายโอนพลังงาน และมีจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการวางแผนปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบเพื่อป้องกันไม่ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความความล้มเหลวขึ้นได้

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลการศึกษาวิจัยความรุนแรงภายใต้การปลดโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความแตกต่างของปริมาณโหลดและกำลังผลิตสูงโดยใช้การวิเคราะห์ระบบสูญเสียอุปกรณ์ในระบบระดับ 1 อุปกรณ์ (n-1 contingency) ซึ่งผลการศึกษา

นี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลกระทบจากกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ซึ่งเป็นข้อกำหนดพื้นฐานในการศึกษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากผลการศึกษาในพื้นที่หรือระบบไฟฟ้ากำลังย่อยที่มีปริมาณโหลดน้อยกว่ากำลังผลิตมาก ๆ (พื้นที่ 1) ซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวนี้ต้องอาศัยการส่งถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากระบบอื่นเข้ามาช่วยจ่ายโหลดในพื้นที่หรือระบบผ่านสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ ซึ่งหากเกิดเหตุการณ์กลุ่มโหลดถูกปลดออกจะส่งผลกระทบรุนแรงต่อระบบไฟฟ้าทั้งด้านภาระโหลดของอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานและผลกระทบต่อความเสถียรภาพแรงดันในระบบซึ่งดูจากปริมาณการละเมิดค่าควบคุมของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบจากกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงและสายส่งและหากพิจารณาจากสัดส่วนของจำนวนอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลใน

ระบบพบว่ามีส่วนที่สูง และสำหรับในพื้นที่หรือระบบที่มีปริมาณกำลังผลิตที่มากกว่าปริมาณโหลดมากๆ ซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวนี้ต้องส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปจ่ายให้ระบบอื่นผ่านสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ จะพบว่ากรณีเกิดเหตุการณ์กลุ่มโหลดถูกปลดออกในพื้นที่ที่จะส่งผลกระทบรุนแรงต่อระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะด้านภาระโหลดของอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานถึงแม้ผลกระทบด้านแรงดันจะไม่มีรวมถึงสัดส่วนของจำนวนอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลในระบบมีสัดส่วนที่น้อยกว่ากรณีอื่นๆ แต่ก็ส่งผลกระทบทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลได้ซึ่งพิจารณาได้จากอุปกรณ์ได้รับการโหลดเกินได้เช่นเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบจากกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง เช่นเดียวกัน ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าระบบหรือพื้นที่ที่มีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิตมากๆ หากเกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิดจนทำให้ระบบเกิดการสูญเสียอุปกรณ์จำนวนหนึ่งอุปกรณ์จะส่งผลกระทบทำให้ระบบเกิดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลมากกว่าระบบที่กำลังผลิตสูงกว่าปริมาณโหลดมาก ๆ

ดังนั้นผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงผลกระทบและความแตกต่างที่เกิดขึ้นในกรณีที่โหลดถูกปลดออกใน 2 พื้นที่ที่มีความแตกต่างด้านปริมาณโหลดและกำลังผลิตสูงในระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ผลกระทบต่อความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลที่เกิดขึ้นภายใต้การปลดโหลดนี้ทำให้ทราบถึงกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง หากถูกปลดออกจะส่งผลกระทบรุนแรงต่อความมั่นคงของระบบ และขณะเดียวกันยังสามารถชี้และลำดับอุปกรณ์หรือพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด ซึ่งข้อมูลจากผลการศึกษาดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่สามารถนำไปวางแผนเพื่อการปรับปรุงความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในอนาคตได้

5. ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของการปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในพื้นที่ที่มี

ความแตกต่างสูงของปริมาณโหลดและกำลังการผลิตเพื่อการปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1 ซึ่งได้เปรียบเทียบกับกรณีที่ระบบสูญเสียอุปกรณ์เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง โดยใช้การวิเคราะห์ระดับการสูญเสีย จำนวน 1 อุปกรณ์ (contingency n-1) เท่านั้น ซึ่งหากต้องศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มระดับการวิเคราะห์ที่สูงกว่าได้เช่น Contingency n-2 เป็นต้น และในการพิจารณากำลังผลิตในพื้นที่ยังสามารถพิจารณาความสามารถคงเหลือของสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ว่ามีมากน้อยเพียงไรซึ่งจะมีผลในการส่งผ่านพลังงานข้ามพื้นที่หากกำลังผลิตไม่เพียงพอ

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ผลหาระบบไฟฟ้ากำลังใดที่มีความยืดหยุ่นของระบบในการรองรับการสูญเสียอุปกรณ์ในระบบได้น้อย นั้นสามารถปรับหรือลดค่าควบคุม (violation limit) ของระบบลงได้เพื่อใช้ในการค้นหาหรือระบุพื้นที่วิกฤตที่ได้รับผลกระทบรวมถึงอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงานในระบบเพื่อใช้ในการวางแผนปรับปรุงความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังได้มากยิ่งขึ้น และที่สำคัญกระบวนการในการศึกษาวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยเท่านั้นแต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังระบบอื่นๆ ได้ และผลกระทบภายใต้การศึกษาน-1 contingency จากการปลดโหลด สามารถนำไปประกอบกับผลกระทบภายใต้การศึกษาน-1 contingency ทั้ง 3 กรณี กล่าวคือผลกระทบภายใต้การสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำการศึกษาในการค้นหาพื้นที่วิกฤตและจัดเรียงพื้นที่หรืออุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบบ่อยครั้งในแต่ละกรณีหรือจากทุกกรณีเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน อุปกรณ์ FACTS หรือแม้แผนการปลดโหลดที่เหมาะสมเพื่อการวางแผนปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังต่อไปได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิจัยนี้ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและ

เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยสนับสนุนห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการดำเนินการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และคณาจารย์สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาพร้อมคำแนะนำในการทำงานวิจัย นอกจากนี้ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณทุกคำแนะนำและทุกผลการตอบกลับที่ช่วยให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Wannoi and N. Wannoi, "Techniques for Assessment Inter-area Power Transfer Capacity for Large Power Systems to Improve System Stability," *SNRU Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 126–134, 2021.
- [2] N. S. Deepika, I. Tejaswini, K. Naveen and Dr. J. Ravindra, "Multi Area Frequency and Tie Line Power Flow Control with TCPS," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol.7, no. 6, pp. 1809–1814, 2020.
- [3] W. Lin, Z. Yang, J. Yu, K. Xie, X. Wang and W. Li, "Tie-Line Security Region Considering Time Coupling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.36, no. 2, pp. 1274–1284, 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3015483.
- [4] N. Wannoi, N. Jirsuwankul, P. Sarikprueck, C. Chompoo-inwai and C. Wannoi, "A Novel Technique to Identify Proper Locations for Distributed Renewable Generation Integration to Minimize Contingency Impact," presented at the 2020 Int. Conf. IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia Technical Conference, Weihai, China, Jul. 13–16, 2020, Paper 20007169.
- [5] A. R. A. Wafa, A. F. E. Garably and S. Nasser, "Power System Security Assessment under N-1 and N-1-1 Contingency Conditions," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 12, no. 11, pp.1854–1863, 2019.
- [6] Z. Lu, L. He, D. Zhang, B. Zhao, J. Zhang and Hao Zhao, "A Security Level Classification Method for Power Systems under N-1 Contingency," *Energies*, vol. 10, no. 12, 2017, Art. no. 2055, doi: 10.3390/en10122055.
- [7] R. Kumar, R. Singh, H. Ashfaq, S. K. Singh and M. Badoni, "Power System Stability Enhancement by Damping and Control of Sub-synchronous Torsional Oscillations using Whale Optimization Algorithm based Type-2 Wind Turbines," *ISA Transactions*, vol. 108, pp. 240–256, 2021, doi: 10.1016/j.isatra.2020.08.037.
- [8] K. Teeparthi and D. M. V. Kumar, "Power System Security Assessment and Enhancement: A Bibliographical Survey," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 101, pp. 163–176, 2020, doi: 10.1007/s40031-020-00440-1.
- [9] A. Kanchanaharuthail and E. Mujjalinvimut, "Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation for Power Systems with Statcom via a Backstepping-Like Scheme," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 17, no. 2, pp. 701–714, 2021.
- [10] J. Liu, Y. Zhang, K. Meng, Z. Y. Dong, Y. Xu and S. Han, "Real-time Emergency Load Shedding for Power System Transient Stability Control: A Risk-Averse Deep Learning Method," *Applied Energy*, vol. 307, 2022, Art. no. 118211.
- [11] R. H. Al-Rubayi and M. K. Abd, "Emergency Load Shedding for Voltage Stability Enhancement: With Particular Reference to the Iraqi National Power

- Grid,” *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 52–62, 2020, doi: 10.22266/ijies2020.0430.06.
- [12] S. F. A. Shukor, I. Musirin, Z. A. Hamid, M. K. M. Zamani, M. Zellagui and H. Suyono, “Intelligent Based Technique for Under Voltage Load Shedding in Power Transmission Systems,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 17, no. 1, pp. 110–117, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v17.i1.pp110-117.
- [13] O. T. Amusan, N. I. Nwulu and S. L. Gbadamosi, “Identification of Weak Buses for Optimal Load Shedding Using Differential Evolution,” *Sustainability*, vol. 14, no. 6, 2022, Art. no. 3146, doi: 10.3390/su14063146.
- [14] N. Wannoi, N. Jirsuwankul, C. Chompoo-inwai, C. Chompoo-inwai and C. Wannoi, “Novel Techniques for Critical Load Buses Identification and Load Bus’s Available Capacity Calculation to Improve Power System Stability,” presented at the 2020 Int. Conf. IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia Technical Conference, Weihai, China, Jul. 13–16, 2020, Paper 20007335.
- [15] B. Taheri and A. Safdarian, “Tie-line Planning for Resilience Enhancement in Unbalanced Distribution Networks,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 5, pp. 1030–1046, 2022, doi: 10.1049/gtd2.12347.
- [16] N. Suganthi, “Tie line power control of Two Area System using Tie-line bias Controller,” *International Journal of Advances in Engineering and Management*, vol. 2, no. 6, pp. 630–633, 2020, doi: 10.35629/5252-0206630633.
- [17] A. A. J. Basha, M. Anitha and E. B. Elanchezhian, “Optimal Placement of TCSC for Congestion Management in Deregulated Power System using Firefly Algorithm,” *International Journal of Process Systems Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 4–29, 2019, doi: 10.1504/IJPSE.2019.096675.
- [18] T. G. Tran, H. T. Trang, T. N. Le, N. A. Nguyen and P. T. N. Hieu, “Load Shedding in Power System Considering the Generator Control and AHP Algorithm,” *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, vol. 6, no. 12, pp. 484–492, 2020, doi: 10.22161/ijaems.612.1.
- [19] L. T. Nghia1, Q. H. Anh, P. T. T. Binh, N. T. An and P. H. Hau, “A Voltage Electrical Distance Application for Power System Load Shedding Considering the Primary and Secondary Generator Controls,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 3993–4002, 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i5.pp3993-4002.
- [20] Y. Y. Hong and C. Y. Hsiao, “Event-based under-Frequency Load Shedding Scheme in a Standalone Power System,” *Energies*, vol. 14, no. 18, 2021, Art. no. 5659, doi: 10.3390/en14185659.
- [21] A. Sauhats, A. Utans, J. Silinevics, G. Junghans and D. Guzs, “Enhancing Power System Frequency with a Novel Load Shedding Method Including Monitoring of Synchronous Condensers’ Power Injections,” *Energies*, vol. 14, no. 5, 2021, Art. no. 1490, doi: 10.3390/en14051490.

ประสิทธิภาพการรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต
ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น

**Axial Load Performance of Concrete-Filled Steel Tube Columns
With Hydraulic Cement and Strengthened by Steel Bars**

จักษดา ธารงวุฒิ^{1,*}, พิรุฬห์ลักษณ์ คำผาย¹, สิทธิชัย แสงอาทิตย์², ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี¹ และ จีรศักดิ์ สุพรมวัน¹

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ในเมือง เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุรนารี เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

Jaksada Thumrongvut^{1,*}, Pirunluck Khamphay¹, Sittichai Seangatith², Saksith Pantawee¹ and Jeerasak Supromwan¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,

Nai-Muang, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

Suranaree, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: jaksada.th@rmuti.ac.th

Received: Sep 26, 2022; Revised: Feb 13, 2023; Accepted: Apr 24, 2023

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสาอ้างอิง) จำนวน 6 ตัวอย่าง และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น จำนวน 24 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสาน้ำัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดกว้างและความสูงเท่ากับ 150 mm และ 750 mm ตามลำดับ ตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ชนิดของเหล็กเส้น 4 ประเภท (RB6 RB9 DB12 และ DB16) และรูปแบบของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลัง 2 ตำแหน่ง จากการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 1) จะเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวมากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 2) นอกจากนี้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตพบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้เป็นวัสดุแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, ท่อเหล็กน้ำัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, เหล็กเส้น, การเสริมกำลัง

Abstract

The purpose of this study is to present the experimental findings on the axial load performance of concrete-filled steel tube (CFST) columns with hydraulic cement strengthened by steel bars. Six CFST columns with hydraulic cement

(referenced CFST columns) and twenty-four CFST columns with hydraulic cement strengthened by steel bars comprise a total of thirty specimens. The nominal width and height of the square specimens are 150 mm and 750 mm, respectively. The primary parameters utilized in this study are the four types of steel bars (RB6, RB9, DB12, and DB16) and the two locations of the strengthening steel bar. These experimental results showed that the CFST columns with hydraulic cement strengthened with steel bars at the inner center of the steel tube (location 1) had a greater improvement in ductility efficiency than the CFST columns with hydraulic cement and strengthened with steel bars at the inside corners of the steel tube (location 2). Lastly, by comparing the performance of hydraulic cement to ordinary Portland cement (OPC) for the concrete-filled steel tube column employed in this study, it can be stated that hydraulic cement could be utilized as a replacement material for OPC.

Keywords: Concrete-filled steel tube column, Hydraulic cement, Square steel tube, Steel bar, Strengthening

1. บทนำ

การก่อสร้างแบบหล่อในที่ (Cast-in-place construction) เป็นระบบที่มักใช้เวลาดำเนินงานค่อนข้างมาก ส่งผลให้ต้นทุนก่อสร้างมีราคาสูง ดังนั้น การพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (Fabrication) หรือแบบกึ่งสำเร็จรูป (Pre-fabrication) จึงมีบทบาทเพื่อช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง [1] เนื่องจากประสิทธิภาพการก่อสร้างที่รวดเร็วและควบคุมคุณภาพของชิ้นส่วนได้ดีกว่าระบบหล่อในที่ [2–4] รวมถึงช่วยแก้ปัญหาด้านแรงงานลงได้มาก ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อให้กับชิ้นส่วนโครงสร้าง และออกแบบให้ทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกร่วมกับโครงสร้างโดยไม่มีการถอดแบบหล่อดังกล่าว เช่น การใช้ท่อเหล็กทรงกลมกลวง (hollow steel tube) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปตลอดความยาวของเสา ดังแสดงในงานวิจัยของ Cai and He [5], Wang et al. [6], Ding et al. [7], Thumrongvut and Tiwjanuk [8] ปัจจุบันเสาเชิงประกอบดังกล่าวถูกเรียกว่า เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-filled tube (CFT) column) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างเพิ่มขึ้นทั่วโลก [9] และมีจุดเด่นคือ การก่อสร้างดำเนินงานได้อย่างรวดเร็วโดยการใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อถาวร [10–12] และท่อเหล็กกลวงดังกล่าวยังทำหน้าที่ร่วมกับแกนคอนกรีตในการรับแรงโดยอาศัย Composite action ส่งผลให้เสามีแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [13],[14] โดยความเหนียว (Ductility) เป็นปัจจัยสำคัญของโครงสร้างอาคารที่มีผลต่อความสามารถด้านทาน

แรงกระทำ [15],[16] ซึ่งหมายถึงความสามารถของโครงสร้างที่สามารถรับแรงได้แม้ว่าเกิดการเสียรูป (ภายหลังเกิดความเสียหาย) ซึ่งการเสียรูปอาจเป็นการแอ่นตัว การหดตัว หรือค่าความเครียด เป็นต้น อย่างไรก็ตามภายใต้แรงอัดในแนวแกนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมักเกิดโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก [17],[18] ดังนั้น การชะลอหรือลดการโก่งเดาะโดยการเสริมกำลังเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตด้วยเหล็กเส้น (Steel bar) จะเป็นตัวเลือกรูปแบบหนึ่งที่สามารถลดและด้านทานการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็ก เนื่องจากเหล็กเส้นที่เชื่อมติดกับผนังท่อเหล็กตามแนวยาวจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ผนังท่อเหล็ก ตลอดจนกระบวนการดังกล่าวสามารถทำได้อย่างสะดวก รวมถึงมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก

นอกจากนี้ เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทั่วไปถูกผลิตจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จำนวนมาก [19],[20] ดังนั้น การเปลี่ยนวัสดุเชื่อมประสานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติน่าจะเป็นทางเลือกที่สามารถลดปัญหาสถานะเรือนกระจก [21] หนึ่งในวัสดุที่เริ่มนิยมใช้ทดแทนคือปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีองค์ประกอบจากปูนเม็ด เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีจุดเด่นคือใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและปลดปล่อย CO_2 ต่ำกว่า

เมื่อเทียบการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [22] รวมถึงใช้วัสดุดิบบางส่วนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในชิ้นส่วนโครงสร้างยังมีจำนวนไม่มากนัก [23] ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นภายใต้แรงในแนวแกน และผลของการเสริมเหล็กเส้นที่มีต่อกำลังเสา

2. วัสดุ ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้ศึกษาผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้งานทั่วไป (GU) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน การออกแบบ

ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 [24] โดยมีกำลังอัดประลัย (ultimate compressive strength) เท่ากับ 28 MPa (ประมาณ 280 kg/cm²) สำหรับท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง 150 mm และความยาว 750 mm ความหนาท่อเหล็กมีค่าเท่ากับ 3.0 mm เหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลังเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตประกอบด้วยเหล็กเส้นกลม 2 ขนาด ได้แก่ RB6 และ RB9 (ชั้นคุณภาพ SR24) และเหล็กข้ออ้อย 2 ขนาด ได้แก่ DB12 และ DB16 (ชั้นคุณภาพ SD40) การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [25] และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กและเหล็กเสริมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 [26]

ตารางที่ 1 แสดงผลทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุและเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

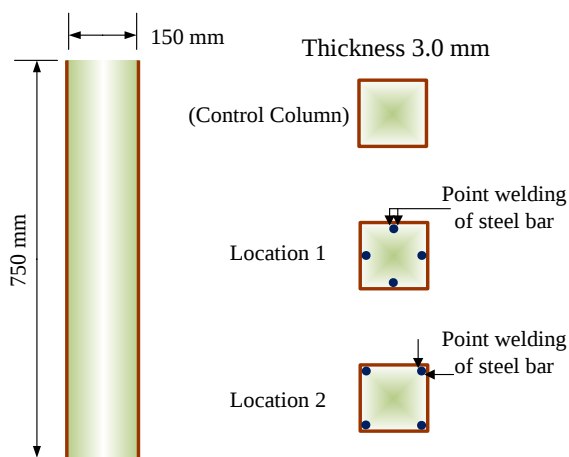
Group	Specimen	Concrete		Steel Tube			Steel Bar			Number
		A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	t (mm)	A_{st} (mm ²)	$f_{y,st}$ (MPa)	Type	A_{sb} (mm ²)	$f_{y,sb}$ (MPa)	
1	HCFT	20,228	28.6	3.0	1,741	387.1	-	-	-	2
2	HCFT-6-1	20,114	28.6	3.0	1,741	387.1	RB6	113.1	423.9	2
	HCFT-9-1	19,973	28.6	3.0	1,741	387.1	RB9	254.5	428.5	2
	HCFT-12-1	19,775	28.6	3.0	1,741	387.1	DB12	452.4	652.4	2
	HCFT-16-1	19,423	28.6	3.0	1,741	387.1	DB16	804.3	582.9	2
3	HCFT-6-2	20,114	28.6	3.0	1,741	387.1	RB6	113.1	423.9	2
	HCFT-9-2	19,973	28.6	3.0	1,741	387.1	RB9	254.5	428.5	2
	HCFT-12-2	19,775	28.6	3.0	1,741	387.1	DB12	452.4	652.4	2
	HCFT-16-2	19,423	28.6	3.0	1,741	387.1	DB16	804.3	582.9	2

2.2 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทั้งหมดเป็นเสาสั้น มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 150 mm สูง 750 mm ตัวแปรหลักในการศึกษาประกอบด้วย ชนิดของเหล็กเส้น 4 ประเภท (RB6 RB9 DB12 และ DB16) และลักษณะการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น 2 ตำแหน่ง ตัวอย่างทดสอบจำนวน 18 ตัวอย่างถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแบบ

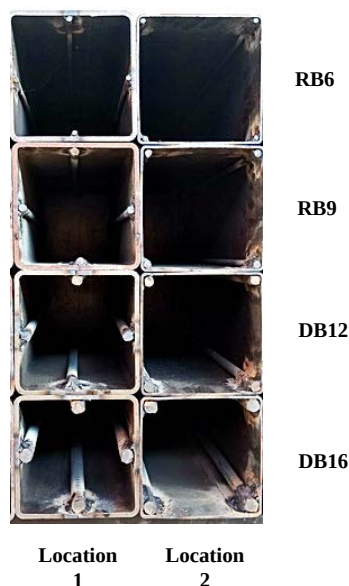
ปกติ (เสา HCFT) กลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นด้วยการเชื่อมเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางภายในแต่ละด้านของท่อเหล็ก รวมจำนวน 4 เส้น และเรียกลักษณะการเสริมกำลังแบบนี้ว่า การเสริมกำลังตำแหน่งที่ 1 และกลุ่มที่ 3 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นด้วยการเชื่อมเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็กทั้งสี่ด้าน และเรียกลักษณะการเสริม

กำลังแบบนี้ว่า การเสริมกำลังตำแหน่งที่ 2 ทั้งนี้ขออธิบายเพิ่มเติมว่า เหล็กเส้นที่เสริมกำลังมีความยาวเท่ากับความสูงของตัวอย่างเสา รูปหน้าตัดและรายละเอียดของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ตำแหน่งของการเสริมเหล็กเส้นก่อนการเทคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2 สำหรับชื่อตัวอย่างทดสอบในตารางที่ 1 ใช้สัญลักษณ์ HCFT-A-B ซึ่งกำหนดขึ้น โดยมีหลักการดังนี้ HCFT หมายถึง เสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก A หมายถึง ประเภทของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลัง และ B หมายถึง ตำแหน่งการวางเหล็กเส้น



Strengthening with RB6, RB9, DB12 and DB16

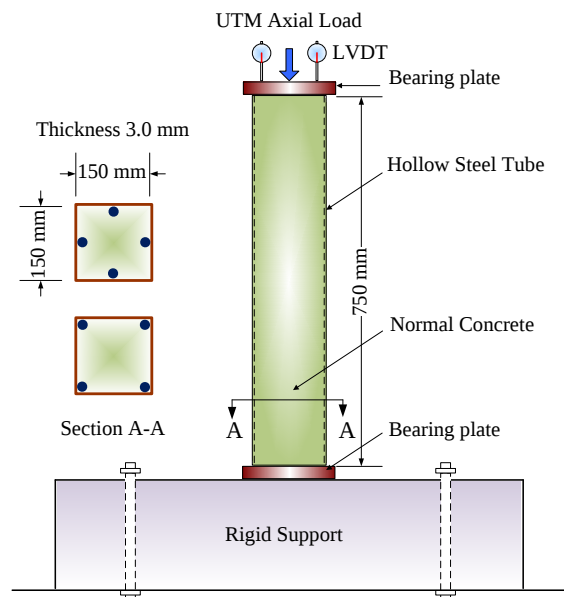
รูปที่ 1 แบบรายละเอียดของตัวอย่างเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีต



รูปที่ 2 ตำแหน่งการเสริมเหล็กเส้น

2.3 วิธีการทดสอบ

เริ่มต้นการทดสอบด้วยการติดตั้งตัวอย่างเสาเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machines (UTM) ดังแสดงในรูปที่ 3 ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างถูกรองโดยแผ่นเหล็กหนา 50 mm จากนั้นติดตั้ง Displacement Transducer จำนวน 2 ตัว ที่ด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่อง UTM เพื่อวัดระยะหดตัวของตัวอย่างเสาภายใต้แรงกระทำ ลักษณะการให้แรงอัดกระทำต่อเสาเป็นแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของตัวอย่างเสา เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ครบถ้วน เริ่ม Pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังรับแรงอัดประลัยคอนกรีตเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและหน้าสัมผัสของตัวอย่างเสา [23] จากนั้น เริ่มทดสอบโดยเพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่องที่อัตรา 1 mm/min [27] และเก็บข้อมูลตลอดการทดสอบโดย KYOWA EDX-10 Series Data Acquisition Unit จนกระทั่งตัวอย่างเสาเกิดการวิบัติหรือหยุดทดสอบที่ระยะหดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 50 mm



รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดในแนวแกน

3. ผลทดสอบและอภิปรายผล

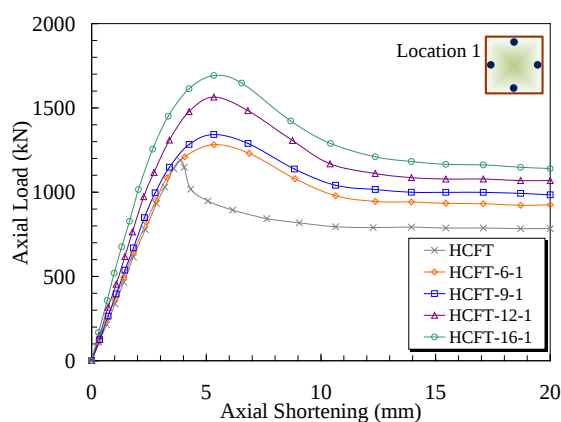
3.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกน (Axial load) และการหดตัวในแนวแกน (Axial shortening) ของตัวอย่าง

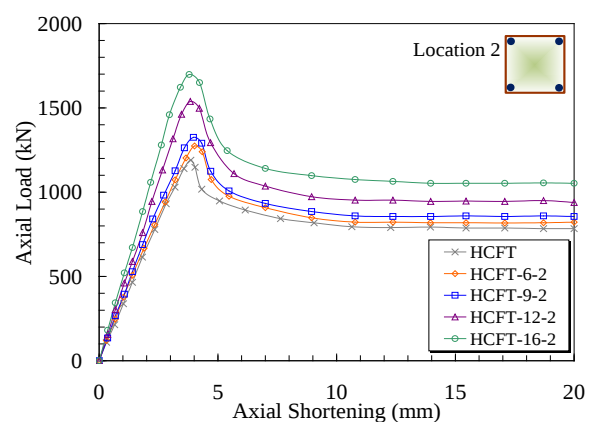
เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 1) และเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 2) แสดงดังรูปที่ 4(a) และรูปที่ 4(b) ตามลำดับ การแสดงผลทดสอบจำกัดที่ค่าการหดตัวเท่ากับ 20 mm หรือความเครียดในแนวแกน (Axial strain) ของตัวอย่างเสาเท่ากับ 0.027 mm/mm ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าความเครียดอัดประลัยของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า นอกจากนี้ให้นิยามแรงอัดสูงสุด (Maximum axial load) ที่ได้จากการทดสอบ (P_u) เป็นแรงอัดที่เกิดขึ้นในเสาโดยปราศจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก [8]

จากพฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นในรูปที่ 4 พบว่า พฤติกรรมรับแรงในช่วงเริ่มต้นของตัวอย่างเสา HCFT ทั้งหมดมีความใกล้เคียงกัน ช่วงแรกพฤติกรรมของเสามีลักษณะเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดที่เสาเริ่มรับแรงอัดประมาณ 70–80% ของแรงอัดสูงสุด และพบว่า ค่าความชันเส้นกราฟมีค่าแตกต่างกัน

กันขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลังเป็นหลัก โดยเสาที่มีปริมาณของเหล็กเส้นมากที่สุดจะมีความชันสูงสุดและไล่เรียงลำดับลงไปยังเสาที่มีปริมาณของเหล็กเส้นน้อยที่สุด จากนั้น พฤติกรรมของเสาเข้าสู่ช่วงที่สอง เมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น แกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-cracking) ในเนื้อคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวด้านข้างเพิ่มขึ้น [13] จากนั้น ความชันของเส้นกราฟเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากการอัดแตกของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะของเหล็กเสริมและผนังท่อเหล็ก [7] และพฤติกรรมของตัวอย่างเสาจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนถึงจุดวิบัติของเสา โดยพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของตัวอย่างเสามีลักษณะแบบ Strain-Softening โดยเสาสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้น เสาจะมีความสามารถในการรับแรงและความแข็งแรงลดลง (degrading stiffness) [8],[14] อย่างรวดเร็วด้วยผลของการเกิดการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็กที่เพิ่มมากขึ้น



(a)



(b)

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของเสา HCFT ที่เสริมกำลังโดยเหล็กเส้น (a) การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 (b) การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5 จากการสังเกตลักษณะการวิบัติพบว่า ตัวอย่างเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 และเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึง

กัน โดยเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive failure) และมีระยะหดตัวในแนวแกนที่จุดวิบัติเกิน 50 mm แสดงให้เห็นว่าเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นมีความเหนียวในแนวแกนสูง [13] รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างเสาเป็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก โดยสามารถเห็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กได้ชัดเจนหลังจาก

จุดที่แรงอัดมีค่าสูงสุด [8] นอกจากนี้ เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 เกิดการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็กอยู่ในบริเวณที่ต่ำกว่าเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 เล็กน้อยเนื่องจากการเชื่อมเหล็กเส้น

ที่บริเวณกึ่งกลางภายในผนังท่อเหล็กแต่ละด้าน (ตำแหน่งที่ 1) ส่งผลให้ผนังท่อกับบริเวณดังกล่าวมีความแข็งแรง (Stiffness) สูงกว่าการเชื่อมเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็กทั้งสองด้าน (ตำแหน่งที่ 2)



รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของเสา HCFT

3.2 แรงอัดสูงสุดและดัชนีความเหนียว

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงอัดสูงสุด (Maximum axial load) ของเสา HCFT ที่ได้จากการทดสอบ (P_u) จากตารางพบว่า เมื่อเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงขึ้น ส่งผลให้เสาสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เพิ่มขึ้น สำหรับการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 แรงอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเสา HCFT ที่ไม่ถูกเสริมกำลัง (เสา HCFT อ้างอิง) อยู่ในช่วงประมาณ 9–44% และการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 แรงอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเสา HCFT ที่ไม่ถูกเสริมกำลังอยู่ในช่วงประมาณ 7–43% ดังนั้น การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ช่วยเพิ่มแรงอัดสูงสุดของเสา HCFT ได้อย่างมีนัยยะสำคัญ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันพบว่า การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่น ตัวอย่าง HCFT-12-1 และตัวอย่าง HCFT-12-2 สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เท่ากับ 1,550 kN และ 1,539 kN ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาดัชนีความเหนียว (Ductility index, DI) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ระบุความเหนียวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ โดยดัชนีความเหนียวสามารถคำนวณจากสมการที่ (1)

$$DI = \Delta_{max}/\Delta_y \quad (1)$$

โดยที่ Δ_{max} คือ อัตราส่วนระหว่างระยะหัดตัวของเสาเมื่อแรงอัดมีค่าลดลงเท่ากับ 85% หลังจากแรงอัดสูงสุด และ Δ_y คือ ระยะหัดตัวของเสาเมื่อแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 75% ของแรงอัดสูงสุด [28] (สามารถหาค่าดังกล่าวได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหัดตัวในรูปที่ 4) ยกตัวอย่างการคำนวณดัชนีความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ HCFT-12-1 สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วน Δ_{max}/Δ_y มีค่าเท่ากับ $8.76/2.72 = 3.22$ เป็นต้น

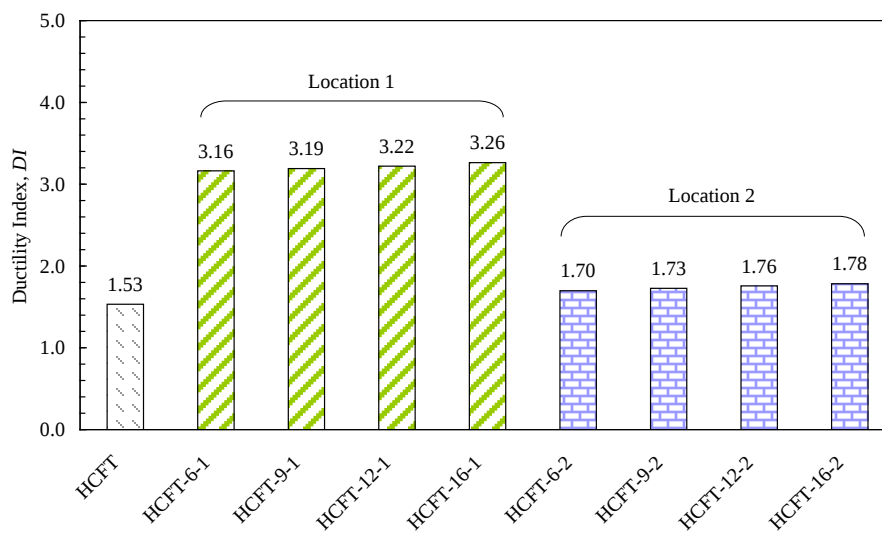
จากรูปที่ 6 พบว่า เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 มีดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วงระหว่าง 3.16 ถึง 3.26 และมีค่าสูงกว่าดัชนีความเหนียวของเสา HCFT ที่ไม่ถูกเสริมกำลัง (เสา HCFT อ้างอิง) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.53 อย่างไรก็ตาม เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 มีดัชนี

ความเหนียวอยู่ในช่วงระหว่าง 1.70 ถึง 1.78 และโดยมีค่าสูงกว่าดัชนีความเหนียวของเสา HCFT อ้างอิงไม่มากนัก ดังนั้นการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวให้แก่เสา HCFT ได้มากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 เนื่องจากการเสริมเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางภายในผนังท่อเหล็กแต่ละด้าน

(ตำแหน่งที่ 1) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถด้านการโก่งเดาะบริเวณกึ่งกลางของผนังท่อเหล็กมากกว่าการเสริมเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็กทั้งสองด้าน (ตำแหน่งที่ 2) นอกจากนี้ พบว่าประเภทของเหล็กข้ออ้อย (DB12 และ DB16) และเหล็กเส้นกลม (RB6 และ RB9) ยังแสดงค่าดัชนีความเหนียวของเสาที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงอัดสูงสุดและดัชนีความเหนียว

Group	Specimen	Type	Diameter of steel bar (mm)	Location	Maximum Axial Load		Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)
					P_u (kN)	Increase (%)		
1	HCFT	-	-	-	1,182	-	2.82	4.32
2	HCFT-6-1	RB6	6	1	1,286	9	2.80	8.86
	HCFT-9-1	RB9	9	1	1,333	13	2.77	8.84
	HCFT-12-1	DB12	12	1	1,550	31	2.72	8.76
	HCFT-16-1	DB16	16	1	1,698	44	2.66	8.68
3	HCFT-6-2	RB6	6	2	1,270	7	2.78	4.72
	HCFT-9-2	RB9	9	2	1,320	12	2.72	4.70
	HCFT-12-2	DB12	12	2	1,539	30	2.67	4.69
	HCFT-16-2	DB16	16	2	1,686	43	2.62	4.67



รูปที่ 6 ดัชนีความเหนียวของเสา HCFT

3.3 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับมาตรฐานออกแบบ

สมมติฐานเบื้องต้นกำหนดให้เสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นเกิดปฏิสัมพันธ์เต็มรูปแบบ (Full interaction) ระหว่างแกนคอนกรีต เหล็กเส้น และท่อเหล็กภายใต้

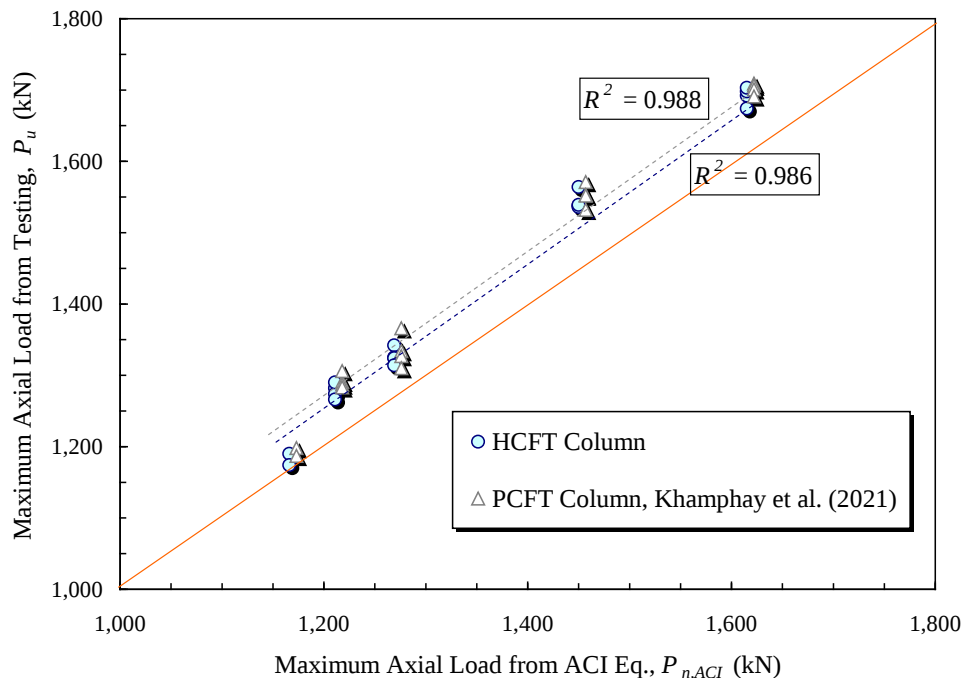
แรงอัด โดยเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของเสา HCFT ที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานการออกแบบเสาของ ACI 318 [29] แรงอัดสูงสุดของเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นสามารถหาจากสมการที่ (2)

$$P_{n,ACI} = 0.85f'_c A_c + f_{y,st}A_{st} + f_{y,sb}A_{sb} \quad (2)$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต $f_{y,st}$ และ $f_{y,sb}$ คือ กำลังครากของท่อเหล็กและเหล็กเส้นตามลำดับ A_{st} และ A_{sb} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็กและเหล็กเส้น ตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (P_u) กับแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI ($P_{n,ACI}$) ของเสา HCFT เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น จากรูปพบว่า เสา HCFT เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น

ตำแหน่งที่ 1 มีค่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบมากกว่าแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI อยู่ในช่วงระหว่าง 5–7% และเสา HCFT เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2 มีค่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบมากกว่าแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ ACI อยู่ในช่วงระหว่าง 4–6% ซึ่งในทั้งสองกรณีนี้เกิดจากผลของการโอบรัดของท่อเหล็กที่มีต่อแกนคอนกรีตเป็นหลัก [13],[28] ดังนั้น จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าสมการออกแบบเสาของ ACI สามารถใช้ประเมินแรงอัดสูงสุดของเสา HCFT เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นได้อย่างถูกต้องภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา [30]



รูปที่ 7 เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบกับสมการออกแบบของ ACI

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบเสา HCFT เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นและเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (เสา PCFT) เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นจากผลการศึกษาของ Khamphay et al. [27] พบว่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (P_u) และแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ ACI ($P_{n,ACI}$) ของวัสดุเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิดมีความสอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้น จากประสิทธิภาพการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดร

ลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานจะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

4. สรุปผล

1) พฤติกรรมรับแรงในช่วงเริ่มต้นของตัวอย่างเสา HCFT มีลักษณะเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 70–80% ของแรงอัดสูงสุด และความชันเส้นกราฟมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับปริมาณของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมกำลังเป็นหลัก จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างเสาจะ

เปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของตัวอย่างเสามีลักษณะแบบ Strain-Softening

2) ลักษณะการวิบัติของเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 1) และเสา HCFT เสริมกำลังโดยเหล็กเส้นที่บริเวณมุมภายในของท่อเหล็ก (ตำแหน่งที่ 2) มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกันโดยเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก

3) เมื่อเหล็กเส้นที่เสริมกำลังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น ส่งผลให้เสา HCFT สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้เพิ่มขึ้นและมีความแกร่งในช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้นสูงขึ้น

4) การเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวของเสา HCFT ได้มากกว่าการเสริมกำลังโดยเหล็กเส้นตำแหน่งที่ 2

5) การนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานของคอนกรีตในการก่อสร้างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น่าจะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่สัญญา FRB650059-NMA-22

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Thumrongvut, S. Seangatith, C. Phetchuay and C. Suksiripattanapong, "Comparative Experimental Study of Sustainable Reinforced Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete Beams Using Rice Husk Ash," *Sustainability*, vol. 14, no. 16, 2022, Art. no. 9856, doi: 10.3390/su14169856.
- [2] Y. Chen, G. E. Okudan and D. R. Riley, "Sustainable Performance Criteria for Construction Method Selection in Concrete Buildings," *Automation in Construction*, vol. 19, no. 2, pp. 235–244, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.10.004.
- [3] J. Thumrongvut, S. Seangatith and K. Kumlue, "Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints," *RMUTI Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 15–30, 2013. (in Thai)
- [4] J. Thumrongvut, S. Seangatith and K. Kumlue, "Effects of Flexural Strengthening With Non-Prestressed Wires on Precast Partially-Prestressed Concrete Beams," *RMUTI Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 16–33, 2014. (in Thai)
- [5] J. Cai and Z. -Q. He, "Axial Load Behavior of Square CFT Stub Column with Binding Bars," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 5, pp. 472–483, 2006, doi: 10.1016/j.jcsr.2005.09.010.
- [6] W. -H. Wang, L. -H. Han, W. Li and T. -H. Jia, "Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Stub Columns and Beams Using Dune Sand as Part of Fine Aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 352–363, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.049.
- [7] F. -X. Ding, J. Liu, X. -M. Liu, Z. -W. Yu and D. -W. Li, "Mechanical Behavior of Circular and Square Concrete Filled Steel Tube Stub Columns under Local Compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 94, pp. 155–166, 2015, doi: 10.1016/j.tws.2015.04.020.
- [8] J. Thumrongvut and P. Tiwajantuk, "Strength and Axial Behavior of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Rectangular Tube Columns under Axial Compression," *Materials Science Forum*, vol. 941, pp. 2417–2422, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2417.
- [9] L. -H. Han, W. Li and R. Bjorhovde, "Developments and Advanced Applications of Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Structures: Members," *Journal of*

- Constructional Steel Research*, vol. 100, pp. 211–228, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.04.016.
- [10] S. Zhang and J. Liu, “Seismic Behavior and Strength of Square Tube Confined Reinforced-Concrete (STRC) Columns,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, no. 9, pp. 1194–1207, 2007, doi: 10.1016/j.jcsr.2006.11.017.
- [11] J. Thumrongvut, A. Tipcharoen and K. Prathumwong, “Post-Fire Performance of Square Concrete-Filled Steel Tube Columns under Uni-Axial Load,” *Materials Science Forum*, vol. 1016, pp. 618–623, 2021, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.618.
- [12] M. M. Lazovic Radovanovic, J. Z. Nikolic, J. R. Radovanovic and S. M. Kostic, “Structural Behaviour of Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tube Columns during the Top-Down Construction Method,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 8, 2022, Art. no. 3771, doi: 10.3390/app12083771.
- [13] S. Seangatith and J. Thumrongvut, “Experimental Investigation on Square Steel Tubed RC Columns under Axial Compression,” *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 205–220, 2009.
- [14] J. Thumrongvut, S. Seangatith, T. Siriparinyanan and S. Wangrakklang, “An Experimental Behaviour of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Square Tube Columns under Axial Compression,” *Materials Science Forum*, vol. 860, pp. 121–124, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.860.121.
- [15] B. Uy, “Stability and Ductility of High Performance Steel Sections With Concrete Infill,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 7–8, pp. 748–754, 2008, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.01.036.
- [16] S. Xu, C. Wu, Z. Liu and R. Shao, “Experimental Investigation on the Cyclic Behaviors of Ultra-High-Performance Steel Fiber Reinforced Concrete Filled Thin-Walled Steel Tubular Columns,” *Thin-Walled Structures*, vol. 140, pp. 1–20, 2019, doi: 10.1016/j.tws.2019.03.008.
- [17] G. Giakoumelis and D. Lam, “Axial Capacity of Circular Concrete-Filled Tube Columns,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, no. 7, pp. 1049–1068, 2004, doi: 10.1016/j.jcsr.2003.10.001.
- [18] N. Joysoongnoen, J. Thumrongvut, T. Sawang-ngam, S. Detphan and J. Supromwan, “Experimental Behavior of High-Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Columns under Various Load Application,” *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 15–23, 2021. (in Thai)
- [19] A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo and C. Lopez-Hombrados, “Engineering Properties of Alkali Activated Fly Ash Concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 2, pp. 106–112, 2006.
- [20] L. F. Ferreira, H. S. Costa, I. I. Barata, E. N. Santos Julio, P. M. Tiago and J. F. Coelho, “Precast Alkali Activated Concrete towards Sustainable Construction,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 66, no. 12, pp. 618–626, 2014, doi: 10.1680/macr.13.00091.
- [21] M. Sanchaiwut, J. Thumrongvut, S. Pantawee and S. Seangatith, “Effects of Substitution of Fine Aggregate With Recycled Asphalt Pavement on Compressive Strength of Normal Concrete,” *Key Engineering Materials*, vol. 922, pp. 163–168, 2022, doi: 10.4028/p-5h70w4.
- [22] A. R. Mazumdar and T. Pheeraphan, “Comparative study of properties of concrete made of hydraulic cement (TIS 2594) and ordinary Portland cement (TIS 15),” *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1–6, 2021.

- [23] N. Bokkhunthod, J. Thumrongvut, J. Supromwan and S. Seangatith, "Experimental study of cellular lightweight concrete-filled steel tube columns using hydraulic cement," *Key Engineering Materials*, vol. 922, pp. 147–152, 2022, doi: 10.4028/p-3zquh9.
- [24] *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI 211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2009.
- [25] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen*, ASTM C39-18, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [26] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [27] P. Khamphay, J. Thumrongvut, N. Joysoongnoen, W. Jiammeepreecha and K. Chaidachatorn, "Strengthening of square concrete-filled steel tube column with steel bars under uni-axial load," *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 9, no 1, pp. 7–14, 2021. (in Thai)
- [28] Z. Yang and C. Xu, "Research on compression behavior of square thin-walled CFST columns with steel-bar stiffeners," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 9, 2018, Art. no. 1602, doi: 10.3390/app8091602.
- [29] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI CODE-318-11: American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2011.
- [30] F. Aslani, B. Uy, Z. Tao and F. Mashiri, "Predicting the Axial Load Capacity of High-Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns," *Steel and Composite Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 967–993, 2015, doi: 10.12989/scs.2015.19.4.967.

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมปาวด์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Rheological Study of Rubber Compound during Injection Molding Process

ศิริ อ่อนเอื้อน¹ และ สมเจตน์ พชรพันธ์^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Sivaree Onouen¹ and Somjate Patcharaphun^{1,*}

¹Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,

Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

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

Received: Feb 10, 2023; Revised: May 10, 2023; Accepted: May 10, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ เวลาบดยางให้นิ่ม อัตราครีดยืดหยุ่น อุณหภูมิฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ได้แก่ ขนาดและลักษณะช่องทางการไหล จากผลการทดสอบพบว่า ความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราครีดยืดหยุ่น เนื่องจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของยางคอมปาวด์ และพบว่าการเพิ่มเวลาในการบดยางให้นิ่มและอุณหภูมิฉีด ทำให้เกิดการการตัดขาดและการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้ความสามารถในการไหลของยางลดลง จากผลการศึกษขนาดและลักษณะพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล แสดงให้เห็นว่า ยางคอมปาวด์สามารถไหลในช่องทางการไหลหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมได้ดีกว่าหน้าตัดแบบครึ่งวงกลมที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่ยางคอมปาวด์ขณะไหลได้มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีค่าลดลงเมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเลื่อนตัวที่ผนัง จากผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CADMOULD) เปรียบเทียบกับระยะทางการไหลที่วัดได้จากการทดลองจริง พบว่าการวิเคราะห์การไหลที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติ ให้ค่าระยะทางการไหลที่มากกว่าแบบจำลอง 2.5 มิติและจากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่า ยังคงมีความแตกต่างจากความเป็นจริง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากข้อจำกัดในการวิเคราะห์และสมมติฐานที่ใช้ ซึ่งได้แก่ ของไหลไม่สามารถเลื่อนตัวได้ที่ผนัง และอุณหภูมิของของไหลมีค่าคงที่ตลอดการไหล ซึ่งแตกต่างจากความเป็นจริงที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: พฤติกรรมการไหล, ยางคอมปาวด์, กระบวนการฉีดขึ้นรูป, ปัจจัยในกระบวนการผลิต, โปรแกรมจำลองการไหล

Abstract

In this study, the effects of process parameters such as mastication time, shear rate, injection and mold temperatures, filler type and content on the rheological behavior of rubber compound were investigated. The influences of mold designs, i.e., type and size of runner were also studied in details. The measured results indicated that the viscosity of rubber compound tended to decrease with increasing shear rate. This was due to the pseudoplastic flow behavior of rubber compound. The results suggested that the

increase of mastication time and injection temperature, which can be a source of rubber chain scission and relaxation, enhanced the flowability of rubber compound. On the other hand, the increasing mold temperature and amount of filler loadings tended to decrease the flowability. From the results obtained by using various sizes and cross-sectional area of flow channel, it can be seen that the square runner gave a better flowability as compared to that of half round runner where the higher heat transfer from mold wall can penetrate into the rubber compound. The smaller the size of runner, the lower the viscosity was observed which probably caused by a wall slip phenomenon. Furthermore, the effects of processing parameters on the flowability of rubber compound were extensively verified against the simulated results performed by the commercial simulation package (CADMOULD). The predicted result of flow length obtained from the 3D model was found to be higher than that of 2.5D model. However, the discrepancies were observed which resulted from the assumption of no slip boundary and isothermal flow utilizing in the simulation program.

Keywords: Rheological behavior, Rubber compound, Injection molding, Process parameters, Flow simulation program

1. บทนำ

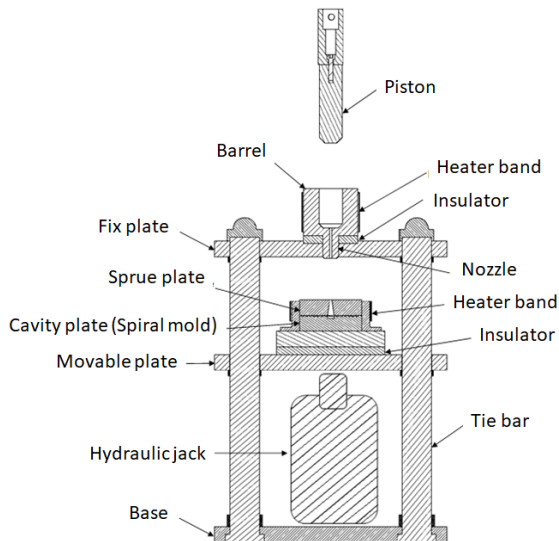
ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ นับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตยางธรรมชาติในรูปของยางดิบ (Raw Rubber) ได้มากที่สุดในโลก อย่างไรก็ตามการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติยังเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการส่งออกในรูปของยางดิบ ทั้งนี้เนื่องจากการขาดองค์ความรู้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแปรรูปจากยางคอมปาวด์ (Rubber compound) เป็นผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber products) นิยมขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ที่ต้องอาศัยความรู้ทางด้านพฤติกรรมการณ์ไหล (Rheological behavior) ร่วมกับการออกแบบแม่พิมพ์ (Mold design) เป็นสำคัญ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มักพบปัญหาในระหว่างกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shot) เนื่องจากไม่สามารถกำหนดปัจจัยในการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตที่เหมาะสมได้ จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่พบว่า มีการศึกษาปัจจัยของช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของวัสดุเทอร์โมพลาสติก และพบว่า เทอร์โมพลาสติกมีพฤติกรรมการณ์ไหลที่เปลี่ยนไปเมื่อช่องทางการไหลมีการเปลี่ยนแปลง

รูปแบบและขนาดของช่องทางการไหล [1–3] โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (Wall slip) และความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ในขณะที่การศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า โดยส่วนมากเกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านสมบัติการคงรูป (Cure characteristics) ของยางคอมปาวด์ [4],[5] ดังนั้นงานวิจัยนี้ออกเหนือจากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ เวลาในการบดขยี้ให้นิ่ม (Mastication time) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) อุณหภูมิฉีดยางคอมปาวด์ (Injection temperature) และอัตราเฉือนเฉือน (Shear rate) ปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ได้แก่ ชนิดและขนาดช่องทางการไหลที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์แล้ว ยังได้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CADMOULD กับผลการทดลองจริง เพื่อเป็นองค์ความรู้และแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

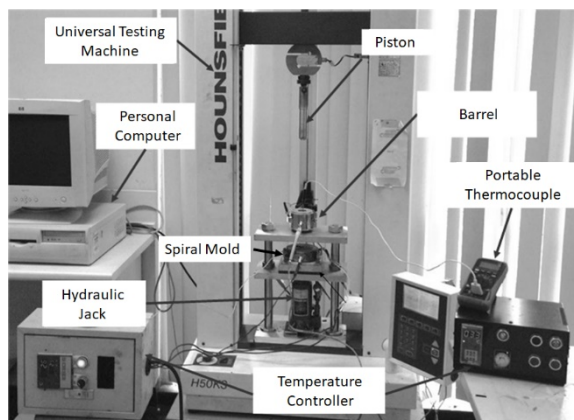
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ตามมาตรฐาน ASTM D 3123 เพื่อศึกษาปัจจัยด้านต่างๆ โดยได้ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึงแบบสากล (Universal Testing Machine, UTM) เพื่อควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของ

แท่งกด (Piston) และตรวจวัดแรงกดที่เกิดขึ้น ภายใต้สภาวะการทดสอบที่อัตราความเร็วแตกต่างกัน โดยได้ทำการติดตั้งชุดควบคุมความร้อนเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติการไหลเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เกรด STR5L ในการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการบดขยี้ให้นิ่ม (Mastication time) ชนิดและปริมาณสารตัวเติมซึ่งได้แก่ ซิลิกา (Silica, SiO_2) ของบริษัท Tokuyama Siam Silica Co., Ltd. แคลเซียมคาร์บอเนต (Activated calcium carbonate, CaCO_3) ของบริษัท Heritage Plastic, Inc. และเขม่าดำ (Carbon black, CB) เกรด N330 ของบริษัท Thai

Carbon Black Public Co., Ltd. ที่ปริมาณ 15 และ 30 phr ที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral โดยใช้ยางคอมปาวด์ทั้งสิ้น 10 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

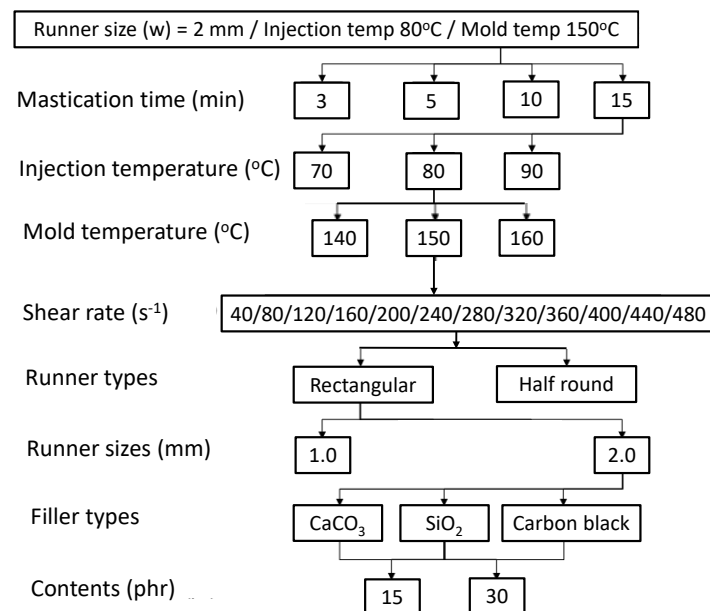
Ingredients	Contents (phr*)			
	Non-filled	Carbon black	SiO_2	CaCO_3
NR (STR5L)	100	100	100	100
ZnO	4	4	4	4
Stearic acid	2	2	2	2
Carbon black		15/30		
SiO_2			15/30	
CaCO_3				15/30
Sulphur	2.4	2.4	2.4	2.4
PEG			0.9/1.8	
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8
Aromatic oil		1.2		
Mastication time (min)	3/5/10/15	15	15	15

*phr = Part per hundred of rubber by weight

ขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์ เริ่มจากการชั่งน้ำหนักยางธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ ตามปริมาณที่กำหนด จากนั้นทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขนาด 8×20 นิ้วของบริษัท KODAIRA SEISAKUSHO Co., Ltd. Model R11-3FF โดยบดยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง (บดเย็น) เป็นเวลา 3 5 10 และ 15 นาที ตามที่กำหนดไว้ในแต่ละสูตรเป็นลำดับแรก เพื่อให้ยางธรรมชาติมีความอ่อนตัว จากนั้นเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูป ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก แล้วจึงทำการผสมสารตัวเติม (ในกรณีสูตรที่มีการบดผสมสารตัวเติม ซิลิกาใช้บดร่วมกับสาร PEG และเขม่าดำใช้บดร่วมกับน้ำมันอะโรมาติก) นอกจากนี้เพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการบดผสมสารตัวเติมได้แบ่งการผสมสารตัวเติมเป็น 3 ครั้ง ในทุก ๆ 5 นาที

โดยนатиสุดท้ายให้กวาดสารตัวเติมที่ติดอยู่ตามขอบลงมา แล้วบดผสมจนเวลาครบ 15 นาที ขั้นตอนต่อไปทำการผสมสารเร่งปฏิกิริยาแล้วบดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที ในขั้นตอนสุดท้ายทำการบดผสมกัมมันต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารคงรูป และบดผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ได้ยางคอมปาวด์มีความหนาประมาณ 5 mm และตัดยางคอมปาวด์บางส่วนออกมาเพื่อนำไปทดสอบความหนืดมูนีและสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ ที่อุณหภูมิ 150°C ตามมาตรฐาน ISO 289-1:2005 และ ASTM D5289-07a ตามลำดับ

รูปที่ 3 แสดงขอบเขตการศึกษาปัจจัยด้านกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ เวลาในการบดขยำน้มน้มน (ตั้งแต่ 3 ถึง 15 นาที) อุณหภูมิฉีด (ตั้งแต่ 70 ถึง 90°C) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (ตั้งแต่ 140 ถึง 160°C) อัตราความเร็วฉีด (ตั้งแต่ 40 ถึง 480 s^{-1}) และปัจจัยด้านการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งได้แก่ ชนิด (แบบสี่เหลี่ยมและแบบครึ่งวงกลม) และขนาดของช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (1 และ 2 mm) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นเฉือน อัตราความเร็วฉีด และค่าความหนืด สำหรับช่องทางการไหลแบบสี่เหลี่ยมและแบบครึ่งวงกลม สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากหนังสือเรื่อง พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน [6]

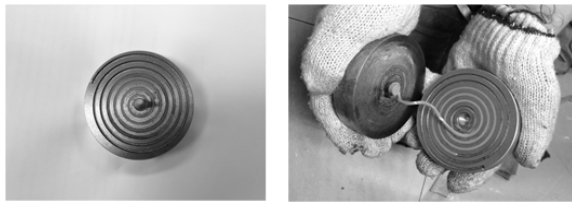


รูปที่ 3 ขอบเขตการศึกษาสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral

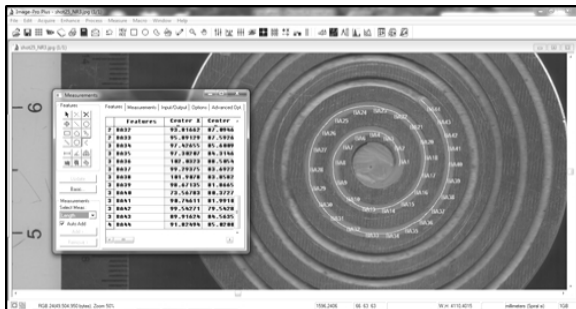
ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากนำยางคอมปาวด์น้ำหนักประมาณ 15 กรัม ใส่ลงไปในกระบอกฉีด (Barrel) และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีเพื่อให้ยางคอมปาวด์ มีอุณหภูมิฉีด (Injection temperature) ตามที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack) ด้วยแรงดันเท่ากับ 200 kg/cm^2 และอัดยางคอมปาวด์ที่อยู่ภายในกระบอกฉีดด้วยแท่งอัด (Piston) เพื่อให้ยางคอมปาวด์ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์แบบ Spiral ที่อัตราความเร็วฉีดตั้งแต่ 40 ถึง 480 s^{-1} โดยกำหนดค่าแรงอัดจากชุดดันกำลังจากเครื่อง

UTM ที่ใช้ฉีดเพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ภายในแม่พิมพ์มีค่าเท่ากัน คือ 30,000 N จึงหยุดการเคลื่อนที่ของแท่งอัด จากนั้นปล่อยให้ยางคอมปาวด์เกิดกระบวนการคงรูปภายในแม่พิมพ์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคงรูปภายในแม่พิมพ์ (T_{90}) พิจารณาจากผลการทดสอบเวลาคงรูปที่ได้จากเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) หลังจากนั้นนำชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์ โดยลักษณะของชิ้นงานยางคงรูปที่ได้แสดงในรูปที่ 4 และนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวัดระยะทางที่ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ (Flow distance) ภายใน

แม่พิมพ์แบบ Spiral โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Plus ดังแสดงในรูปที่ 5

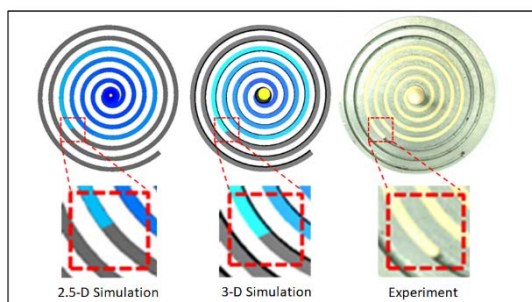


รูปที่ 4 ชิ้นงานขางทรงรูปภายหลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์โดยใช้โปรแกรม Image-Pro Plus

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม CADMOULD Version 2.0 และ 5.0 เพื่อวิเคราะห์การไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์ฉีดแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ โดยสามารถกำหนดข้อมูลด้านวัสดุ และตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ได้อย่างแม่นยำ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง แสดงในรูปที่ 6

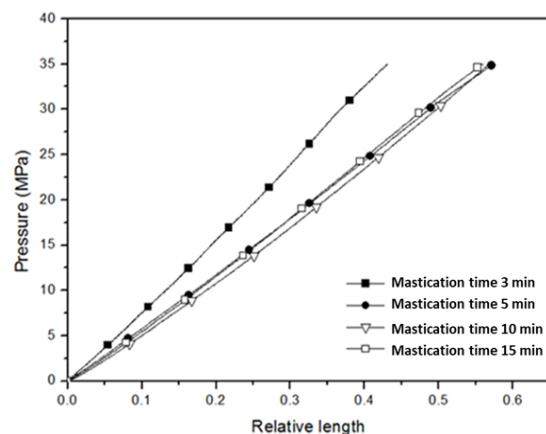


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบระยะทางการไหลระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการฉีดขึ้นรูปจริง

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1.อิทธิพลของเวลาบดขยงที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

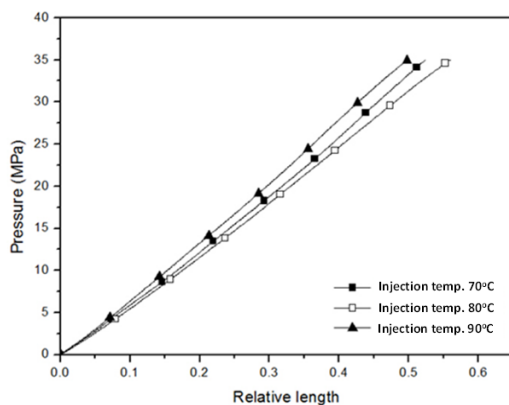
รูปที่ 7 แสดงผลการตรวจวัดระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ที่ผ่านการบดให้นิ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 3 ถึง 15 นาที โดยใช้แม่พิมพ์แบบ Spiral ที่มีช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$) ใช้อุณหภูมิฉีด 80°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C และอัตราความเร็วฉีดเท่ากับ 40 s^{-1} จากผลการทดสอบซึ่งแสดงผลระหว่างความดันที่ใช้ (คำนวณจากค่าแรงกดที่วัดได้จากเครื่อง UTM ต่อพื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีด) และระยะสัมพันธ์ หรือ Relative length (ระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์เมื่อเทียบกับระยะทางการไหลทั้งหมดภายในแม่พิมพ์) พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ใช้เวลาในการบดขยงให้นิ่ม 3 นาที ต้องใช้แรงดันมากที่สุดเพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้ในระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการบดขยงในเวลา 3 นาที สายโซ่โมเลกุลของยางยังคงมีค่ามาก [7] เมื่อเทียบกับระยะเวลาบดขยงให้นิ่มที่ 5 10 และ 15 นาที โดยที่ระยะเวลาบดขยง 3 นาที มีระยะทางการไหลน้อยที่สุด ในขณะที่ระยะเวลาการบดขยงให้นิ่มที่ 5 10 และ 15 นาที ระยะทางการไหลมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพันธ์ของยางคอมปาวด์ที่ใช้เวลาบดขยงให้นิ่มต่างๆ กัน

3.2.อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดที่ 70 ถึง 90°C ที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม เมื่อผ่านการบดเป็นเวลา 15 นาที ใช้ช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2mm × 2mm) อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C และใช้อัตราความเร็วเคลื่อนเท่ากับ 40 s⁻¹ จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ในช่วงแรกของการไหล (ที่ระยะสัมพัทธ์ 0 ถึง 0.1) ค่าแรงดันฉีดที่ใช้เพื่อให้ยางคอมปาวด์สามารถไหลได้มีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าแรงดันฉีดที่ใช้สำหรับอุณหภูมิฉีดเท่ากับ 70°C มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 80°C ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิฉีดเท่ากับ 90°C ต้องใช้แรงดันฉีดมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิฉีดที่อาจส่งผลให้สารคงรูปเริ่มทำปฏิกิริยากับเนื้อยางคอมปาวด์ รวมถึงการเกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อยางขณะไหล ทำให้ยางสามารถเกิดปฏิกิริยาของรูปได้บางส่วน แรงดันที่ใช้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

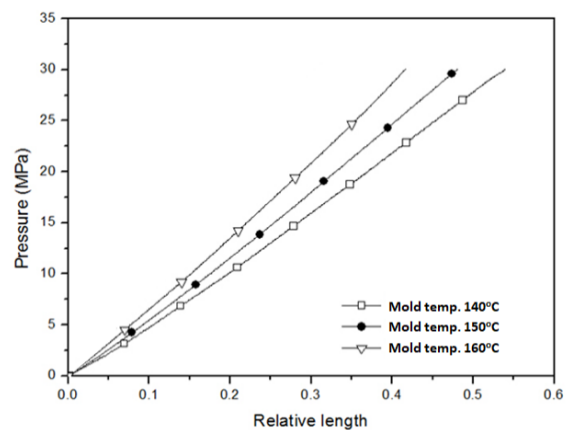


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพัทธ์ของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้อุณหภูมิฉีดต่าง ๆ กัน

3.3.อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อระยะทางการไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

ผลทดสอบการใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ในการคงรูปเท่ากับ 140 150 และ 160°C เมื่อใช้ยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม ผ่านการบดเป็นเวลา 15 นาที ใช้ช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2mm × 2mm) อุณหภูมิฉีดเท่ากับ 80°C

และใช้อัตราความเร็วเคลื่อนเท่ากับ 40 s⁻¹ (รูปที่ 9) แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 160°C จำเป็นต้องใช้แรงดันมากที่สุด เพื่อให้ยางสามารถไหลได้ในระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่ยางคอมปาวด์ไหลภายในแม่พิมพ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่บริเวณชั้นผิวของยางและส่งผ่านความร้อนเข้าสู่แกนกลางของเนื้อยาง โดยที่บริเวณชั้นผิวได้รับอิทธิพลความร้อนจากแม่พิมพ์มากที่สุด จึงเกิดปฏิกิริยาของรูปที่ชั้นผิว (Cured skin layer) ก่อน ทำให้ช่องทางการไหลที่บริเวณชั้นแกนกลางมีขนาดลดลง ส่งผลให้ยางคอมปาวด์ไหลได้ยากขึ้น ดังนั้นแรงดันที่ใช้เพื่อให้ยางสามารถไหลได้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



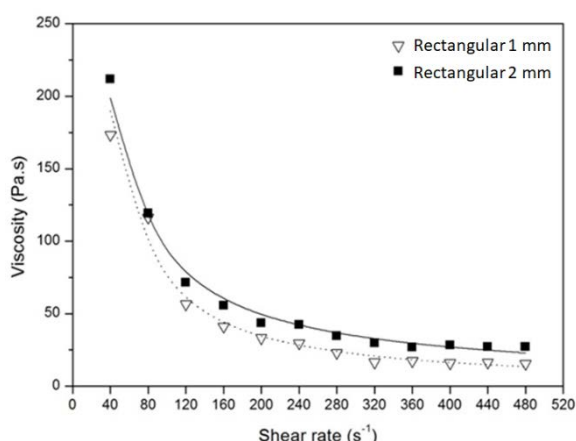
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและระยะสัมพัทธ์ของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

3.4.อิทธิพลของขนาดช่องทางการไหลและอัตราความเร็วเคลื่อนที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

รูปที่ 10 แสดงผลของอัตราความเร็วเคลื่อนในช่วงระหว่าง 40 ถึง 480 s⁻¹ ที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม ผ่านการบดยางให้นิ่มเป็นเวลา 15 นาที เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลรูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ 1 และ 2 mm เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดเท่ากับ 80 และ 150°C ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราความเร็วเคลื่อน โดยทั่วไปพบว่า เมื่ออัตราความเร็วเคลื่อนเพิ่มสูง ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้

เนื่องจากยางคอมปาวด์ยังคงเป็นของไหลประเภทพอลิพลาสติกภายใต้ช่วงอัตราเฉือนที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ขางคอมปาวด์อาจมีพฤติกรรมการไหลหรือความหนืดเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงระยะทางการไหลหรืออัตราเฉือนที่มีค่าสูงขึ้นกว่านี้

นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังพบว่าค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเลื่อนตัวของผนัง (Wall slip) โดยการเลื่อนตัวของผนังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง [1],[8],[9] รวมทั้งอาจเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) [10],[11] ซึ่งเป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวมากขึ้น ส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีค่าความหนืดลดลงและสามารถไหลได้ง่ายยิ่งขึ้น

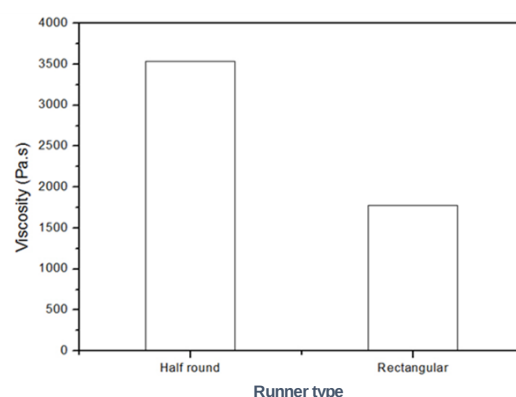


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราเฉือนของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้ช่องทางการไหลแบบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดต่างกัน

3.5.อิทธิพลของชนิดช่องทางการไหลที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดที่ได้จากการไหลของยางคอมปาวด์ในช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความยาวในแต่ละด้านเท่ากับ 2 mm และแบบครึ่งวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 1.6 mm เมื่อใช้อัตราเฉือนคงที่เท่ากับ 40 s^{-1} กำหนดอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 80 และ 150°C ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ขางที่ไหลผ่านช่องทางการไหลแบบ

หน้าตัดครึ่งวงกลมมีค่าความหนืดที่สูงกว่าขางที่ไหลผ่านช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทั้งนี้ได้กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลทั้งสองรูปแบบมีค่าเท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาพื้นที่สัมผัสระหว่างยางคอมปาวด์และผนังแม่พิมพ์ พบว่า ช่องทางการไหลแบบหน้าตัดครึ่งวงกลมมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าช่องทางการไหลแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์สู่ยางคอมปาวด์ขณะไหลเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จึงเกิดชั้นคงรูปที่บริเวณผิวที่หนากว่า ส่งผลให้ยางคอมปาวด์ไหลได้ยากขึ้น ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น



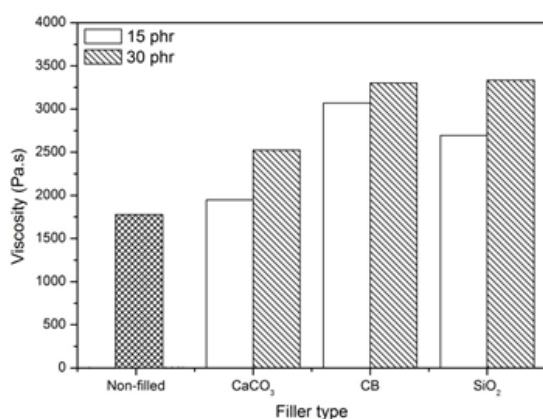
รูปที่ 11 ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์เมื่อไหลผ่านช่องทางการไหลที่มีรูปแบบต่างกัน

3.6.อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ความยาวแต่ละด้านเท่ากับ 2 mm) เมื่อใช้อัตราเฉือนคงที่เท่ากับ 40 s^{-1} อุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 80 และ 150°C ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทุกชนิดทำให้ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการผสม CaCO_3 ที่ปริมาณ 30 phr ส่งผลให้ความหนืดของยางมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaCO_3 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น Activated Calcium Carbonate (ACC) ซึ่งมีการเคลือบผิวอนุภาคด้วยสารกระตุ้นคือกรดสเตียริก (Stearic acid) และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าชนิด Ground Calcium Carbonate (GCC) ส่งผลให้สามารถกระจายตัวได้

ดีภายในเนื้อยาง ในการผสม CB ซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) เนื่องจากผิวของอนุภาคมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ คือ ฟีนอลิก (Phenolic) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ควิโนน (Quinone) และคาร์บอกซิล (Carboxyl) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยาง [12] โดยเมื่อผสมแล้วทำให้ค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [13]

การเพิ่มขึ้นของความหนืดเมื่อผสม SiO_2 เนื่องจากอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันด้วยแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีความแข็งแรงสูง การเกาะเป็นกลุ่มก้อนนี้เรียกว่าแอกริเกต (Aggregate) และเมื่อแอกริเกตเกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerate) จะเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (Filler-Filler network) ที่รวมตัวเกาะกลุ่มกันอย่างเหนียวแน่นภายในเนื้อยางส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น [14]



รูปที่ 12 ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ที่อัตราเร็วเฉือนเท่ากับ 40 s^{-1} เมื่อผสมสารตัวเติมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

3.7.การวิเคราะห์การไหลของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

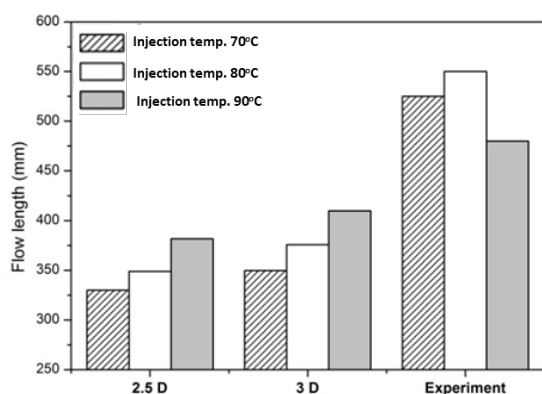
งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความสามารถหรือระยะทางการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์แบบ Spiral หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 mm โดยใช้โปรแกรม CADMOULD สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก

กระบวนการฉีดจริง โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าการวิเคราะห์การไหลที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติ มีค่าระยะทางการไหลที่มากกว่า 2.5 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากสมมติฐานของโปรแกรมวิเคราะห์การไหลแบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ มีรูปแบบที่ต่างกัน กล่าวคือ การวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ ไม่พิจารณาค่าการนำความร้อน (Heat conduction) ในแนวระนาบ (In-plane) แต่พิจารณาเฉพาะการนำความร้อนในทิศทางความหนา (Thickness direction) รวมและพิจารณาค่าการพาความร้อน (Thermal convection) ในแนวระนาบเท่านั้น ในขณะที่แบบจำลองแบบ 3 มิติ มีการพิจารณาค่าการนำความร้อนและการพาความร้อนในทุกทิศทาง [15] ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางแบบ 3 มิติ มีค่ามากกว่าแบบ 2.5 มิติ ทำให้เนื้อยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มาจากแม่พิมพ์มากกว่า นอกจากนี้หากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และกระบวนการฉีดจริงพบว่า ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมีค่าระยะทางการไหลที่สั้นกว่าในกระบวนการฉีดจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการฉีดจริงยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน เป็นสาเหตุให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวและสามารถไหลได้ง่ายขึ้น อีกทั้งความร้อนนี้ยังส่งผลให้ยางคอมปาวด์บริเวณที่ติดกับผนังของช่องทางการไหลเกิดการคงรูปบางส่วนในลักษณะของชั้นคงรูปบางๆ ทำให้เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของยางคอมปาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กำหนดให้ไม่เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง และอุณหภูมิของของไหลขณะไหลมีค่าคงที่ (Isothermal flow) จากสาเหตุข้างต้น จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังคงแตกต่างจากกระบวนการฉีดจริงรูปจริง

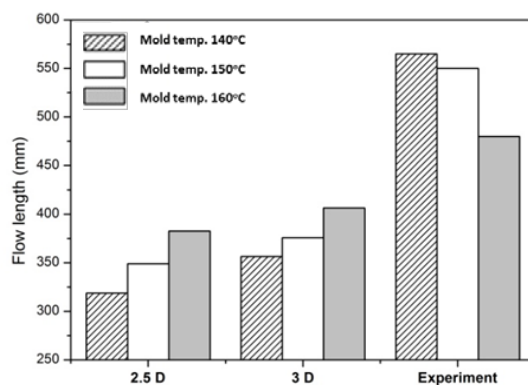
หากพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยจากกระบวนการผลิตที่มีต่อผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 13(a)–(b) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิ

แม่พิมพ์ ส่งผลให้ค่าระยะทางการไหลที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมทั้ง 2.5 และ 3 มิติ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าความหนืดของของไหลใช้สมการของ Carreau-WLF ในการวิเคราะห์ [15] โดยอัตราเฉือนและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดลดลง ในขณะที่กระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ทำ

ให้ระยะทางการไหลลดลง โดยมีสาเหตุมาจากยางคอมปาวด์ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มาจากภายในเนื้อยางและแม่พิมพ์ ส่งผลให้ยางคอมปาวด์เริ่มเกิดการคงรูป ความสามารถในการไหลจึงลดลง ซึ่งพฤติกรรมนี้ไม่สอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหล



(a)



(b)

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 2.5D และ 3D เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (a) อุณหภูมิฉีด และ (b) อุณหภูมิแม่พิมพ์

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในด้านกระบวนการฉีด การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์โดยใช้ชุดทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์แบบ Spiral ตามมาตรฐาน ASTM D3123 ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาบดยางให้นิ่มและอุณหภูมิฉีด ส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีความสามารถในการไหลภายในแม่พิมพ์ที่ดีขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และการผสมสารตัวเติมในยางคอมปาวด์ ส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลง จากผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราครีดยืดเหนียวพบว่า ยางคอมปาวด์ยังคงเป็นของไหลประเภทซูโดพลาสติก ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบอัตราครีดยืดเหนียวที่กำหนดไว้ จากผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหน้าตัดและขนาดช่องทางการไหล แสดงให้เห็นว่ายางคอมปาวด์สามารถไหลผ่านช่องทางการไหลหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมได้ดีกว่าหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม และความหนืดของยางคอมปาวด์ที่ไหลผ่านช่องทางการไหลขนาดเล็กมี

ค่าต่ำกว่าช่องทางการไหลขนาดใหญ่ ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระยะทางการไหลที่ได้จากโปรแกรม CADMOULD แบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ กับผลจากกระบวนการฉีดจริง พบว่าการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ให้ค่าระยะทางการไหลที่มากกว่าแบบ 2.5 มิติ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มาจาก การเพิ่มอุณหภูมิฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ ยังคงไม่สอดคล้องกับการฉีดจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมมติฐานและข้อกำหนดที่ใช้ในการวิเคราะห์ แบบ 2.5 มิติ และ 3 มิติ

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. C. Chen, R. I. Tsai, R. D. Chien and T. K. Lin, "Preliminary study of polymer melt rheological

- behavior flowing through micro-channels,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 3–4, pp. 501–510, 2005, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.07.004.
- [2] B. Xu, K. T. Ooi, T. N. Wong and C. Y. Liu, “Study in the viscosity of the liquid flowing in microgeometry,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 9, no. 4, pp. 377–384, 1999, doi: 10.1088/0960-1317/9/4/315.
- [3] G. R. Palmese and V. M. Karbhari, “Effect of sizing on microscopic flow in resin transfer molding,” *Polymer Composites*, vol. 16, no. 4, pp. 313–318, 1995, doi: 10.1002/pc.750160408.
- [4] C. E. Barnett, “Thermal properties of rubber compounds I. thermal conductivity of rubber and rubber compounding materials,” *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 26, no. 3, pp. 303–306, 1934, doi: 10.1021/ie50291a018.
- [5] S. Ngamsurat, K. Boonkerd, U. Leela-adison, and P. Potiyaraj, “Curing characteristics of natural rubber filled with gypsum,” *Energy Procedia*, vol. 9, pp. 452–458, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.09.051.
- [6] N. Sombatsompop “Rheological behaviors of molten polymer” in *Polymer Rheology & Applications (Revised and Expanded Version)*, Bangkok, Thailand: KMUTT Press, 2005, ch. 2, pp.7–24.
- [7] S. -S. Choi, “Correlation of crosslink density with pyrolysis pattern of natural rubber vulcanizates with efficient vulcanizing cure system,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 52, no. 1, pp. 105–112, 1999, doi: 10.1016/S0165-2370(99)00041-8.
- [8] R. -D. Chien, W. -R. Jong and S. -C. Chen, “Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wall-slip effect,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1389–1396, 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/8/003.
- [9] C. -S. Chen, S. -C. Chen, W. -L. Liaw and R. -D. Chien, “Rheological behavior of POM polymer melt flowing through microchannels,” *European Polymer Journal*, vol. 44, no. 6, pp. 1891–1898, 2008, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2008.03.007.
- [10] A. Lawal and D. M. Kalyon, “Viscous heating in non-isothermal die flows of viscoplastic fluids with wall slip,” *Chemical Engineering Science*, vol. 52, no. 8, pp. 1323–1337, 1997, doi: 10.1016/S0009-2509(96)00486-1.
- [11] N. Sombatsompop and W. Chaiwattanpipat, “Temperature distributions of molten polypropylene during injection molding,” *Advances in Polymer Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 79–86, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1098-2329(200022)19:2<79::AID-ADV1>3.0.CO;2-D.
- [12] W. Hofmann “Filler characteristics” in *Rubber Technology Handbook*, Hanser Publishers, New York, NY, USA, 1989, pp. 275–290.
- [13] B. Rodgers “General compounding” in *Rubber Compounding: Chemistry and Application*, New York, NY, USA: Marcel Dekker Inc., 1994, ch.8, pp. 365–378.
- [14] J. L. Leblanc, “Rubber-filler interactions and rheological properties in filled Compounds,” *Progress in Polymer Science*, vol. 27, no. 4, pp. 627–687, 2002, doi: 10.1016/S0079-6700(01)00040-5.
- [15] P. Kennedy, “Governing equation for fluid flow” in *Flow Analysis of Injection Molds*, New York, NY, USA: Hanser Publishers, 1995, ch. 4, pp. 41–55

การปรับปรุงกระบวนการลำเลียงชุดล้อรถจักรยานยนต์โดยเทคนิคโพคา-โยเกะ

Improvement of Motorcycle Wheel Hubs Conveyor rail Process by Poka-yoke Techniques

ภาคภูมิ ไชยมภู^{1,*}, ศิวศิษฐ์ ปิจมิตร์¹, สุวรรณี ศรียาบ², นุชจรินทร์ สาริกา¹ และ ปรีดา จิวปัญญา¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

ไม้งาม เมืองตาก ตาก 63000

²ศูนย์พัฒนาความเป็นเลิศทางวิชาชีพและเทคโนโลยี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

ไม้งาม เมืองตาก ตาก 63000

Pakpoom Jaichomphu^{1,*}, Siwasit Pitjamit¹, Suwannee Sriyab², Nuhjarin Sarika¹ and Parida Jewpanya¹

¹Industrial Engineering Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Mai Ngam,

Mueang Tak, 63000, Thailand

²Center of Excellence for Vocation and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Lanna Tak, Mai Ngam, Mueang Tak, 63000, Thailand

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

Received: Jan 30, 2023; Revised: May 08, 2023; Accepted: May 10, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการลำเลียงชุดล้อรถจักรยานยนต์ที่ติดขัดบนรางลำเลียงชิ้นงาน ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา พบว่าปัญหาหลักคือ รางลำเลียงชุดล้อรถจักรยานยนต์มีจุดบกพร่องหลายจุด เช่น ลูกล้อยางในชุดรางลำเลียงแตกหักเสียหายเนื่องจากลูกล้อยางผลิตมาจากพลาสติก ซึ่งชิ้นงานผลิตมาจากอลูมิเนียมจะเคลื่อนที่ไปตามรางลำเลียงที่มีความลาดเอียง จำนวน 3 ชั้น ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการกระแทกระหว่างชิ้นงานกับลูกล้อยางจนเกิดความเสียหาย ส่งผลทำให้เกิดงานติดขัดและเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดเวลาสูญเสียมากที่สุด คณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลก่อนการปรับปรุงรางลำเลียงชิ้นงานโดยเก็บข้อมูลจำนวน 207 ชิ้น พบว่าเกิดปัญหาชิ้นงานที่ทำให้งานไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้อยู่ที่ 116 ชิ้น คิดเป็น 56.04 เปอร์เซ็นต์ หลังจากปรับปรุงรางลำเลียงชิ้นงาน โดยใช้เทคนิคโพคา-โยเกะ การป้องกันข้อผิดพลาด ซึ่งได้ทำการติดตั้งไกด์ เพื่อบังคับทิศทาง เปลี่ยนรางจากลูกล้อยางพลาสติกเป็นแผ่นสแตนเลส และติดตั้งตัวกันกระแทกชิ้นงาน ทำให้ลดการติดขัดของชิ้นงาน พบว่า เกิดปัญหาอยู่ที่ 13 ชิ้น คิดเป็น 6.28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถลดปัญหาของชิ้นงานในระหว่างการผลิตชุดล้อรถจักรยานยนต์ จากเดิมได้ร้อยละ 88.80 สรุปได้ว่าการปรับปรุงรางลำเลียงชุดล้อรถจักรยานยนต์ สามารถลดปัญหาการติดขัดของชิ้นงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

คำสำคัญ: หลักการ Poka yoke, การปรับปรุงกระบวนการผลิต, การลดเวลาสูญเสีย

Abstract

This research aims to improve the process of transporting motorcycle wheel hubs that are stuck on the conveyor rails. From the analysis using the fishbone chart, it was found that the motorcycle wheels hub conveyor has several flaws such as the castors in the conveyor chute being damaged due to the plastic castors. The aluminum wheels hubs move along the conveyor chute with a

slope of 3 levels, causing the problem of impact between the workpiece and the caster. This causes damage, leads to work jams, and is the most contributing factor in time wasted. The research team collected data before the improvement of the conveyor rail collecting 207 pieces of data. There were 116 pieces of work that prevented the work from continuing accounting for 56.04 percent. After improving the conveyor rail using the Poka-yoke technique to prevent errors. Install guides to steer the direction. Changing the rails from plastic casters to stainless steel plates and installing a workpiece shock absorber to reduce the jamming of the workpiece. Found that the problem was 13 pieces, representing 6.28 percent, which reduced the problem of parts during the transport of the motorcycle wheel hub from 88.80 percent. It can be concluded that the improvement of the motorcycle hub conveyor can reduce the jamming time of the workpiece for the intended purpose.

Keywords: Poka yoke principle, Production process improvement, Reducing wasted time

1. บทนำ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ยังคงมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งการเติบโตของอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนของไทยมีมาต่อเนื่องตลอด 50 ปีที่ผ่านมา ทำให้ประเทศไทยเป็นที่รู้จักและถูกจับตามองมากที่สุดประเทศหนึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์โลก [1] และอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ สามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับประเทศ อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์เกี่ยวข้อง กับอุตสาหกรรมอีกหลายประเภทดังนี้ 1) อุตสาหกรรมต้นน้ำ ได้แก่ การวิจัยและพัฒนาเครื่องยนต์ ชิ้นส่วน การออกแบบ และผลิต ผลิตภัณฑ์ การผลิตชิ้นส่วนพื้นฐาน เช่น น็อต เป็นต้น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเครื่องหนัง อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ 2) อุตสาหกรรมกลางน้ำ ได้แก่ การผลิตชิ้นส่วนย่อย หรือระบบย่อย การผลิตชิ้นส่วนระบบหลักเพื่อป้อนโรงงานประกอบรถยนต์ และการประกอบรถยนต์ ซึ่งสามารถแบ่งย่อย ได้เป็นการประกอบรถจักรยานยนต์ การประกอบรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และการประกอบรถยนต์ เพื่อการพาณิชย์ 3) อุตสาหกรรมปลายน้ำ ได้แก่ การจำหน่าย และส่งออก ทั้งในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศ และเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการการลงทุนมูลค่าสูงก่อให้เกิดการจ้างงานจำนวนมาก [2] จากกรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วนจักรยานยนต์จะมีการผลิตชิ้นส่วนอยู่หลายผลิตภัณฑ์ ซึ่งคู่มือรถจักรยานยนต์นั้น

เป็นผลิตภัณฑ์ 1 ใน 5 ที่มียอดการผลิตและส่งออกต่อเดือนที่สูง โดยในขั้นตอนกระบวนการผลิตนั้นจะเริ่มจากการจัดเตรียมวัสดุ การฉีดขึ้นรูปอลูมิเนียม (Die-casting) การตกแต่งชิ้นงานตามแบบและมาตรฐาน การตรวจสอบชิ้นงาน การพ่นสี เป็นต้น โดยในแต่ละแผนกจะให้ความสำคัญต่อข้อกำหนดมาตรฐานในการผลิตทุกขั้นตอน

ในส่วนของปัญหาที่พบบ่อยครั้งระหว่างการผลิต คือ คู่มือรถจักรยานยนต์ที่บรรจุอยู่ในรางลำเลียงชิ้นงานเกิดการติดขัดกันระหว่างการเคลื่อนที่ ปัญหานี้เกิดจากการตกลงสู่ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 ลูกล้อรางลำเลียงชิ้นงานชำรุดแตกหักจากการกระแทก ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง ส่งผลให้ระบบการทำงานติดขัด และเสียเวลาในการแก้ไข เนื่องจากในกระบวนการขั้นตอนนี้จะใช้หุ่นยนต์ (Robot Arm) ในการจับชิ้นงานจากรางลำเลียงไปเข้าเครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC) ซึ่งเป็นระบบการผลิตอัตโนมัติ ในขั้นตอนนี้จะไม่มีพนักงานเข้าไปจนกว่าหุ่นยนต์จะแจ้งเตือนหากชิ้นงานในรางลำเลียงไม่มีหรือไม่ตรงตำแหน่งที่กำหนดไว้ พนักงานจะต้องเข้าไปตรวจสอบชิ้นงานในรางลำเลียง และจะตั้งค่าโปรแกรมใหม่ โดยใช้เวลาดังค่าระบบอยู่ที่ 48 วินาทีต่อครั้งที่เกิดปัญหาดังกล่าว

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้สังเกตเห็นถึงปัญหาและเกิดความคิดที่จะปรับปรุงกระบวนการลำเลียงคู่มือรถจักรยานยนต์ เพื่อแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการผลิต และจะสามารถช่วยลดเวลาสูญเสีย (Cycle Time) ของกระบวนการผลิตได้ โดยการใช้หลักการทางวิศวกรรมมาแก้ไขปรับปรุง

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการเข้ามามีประโยชน์ในการดำเนินงาน เพื่อให้เกิดประโยชน์ ดังนี้

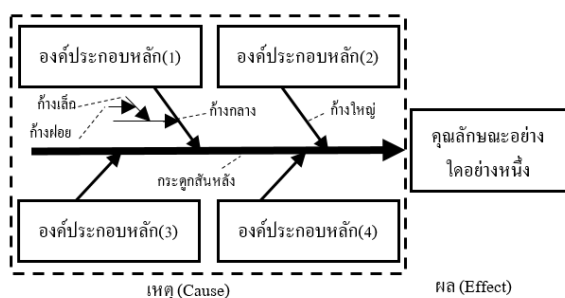
2.1. ทฤษฎีเทคนิคโปลา-โยเกะ

จุดมุ่งหมายของวิธี โปลา-โยเกะ คือการกำจัดหรือลดข้อผิดพลาดของมนุษย์ในกระบวนการผลิตและการจัดการอันเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ทางจิตใจและร่างกายของมนุษย์ ข้อบกพร่องมีอยู่ในสองสถานะคือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นแล้วต้องการให้มีการตรวจหาข้อบกพร่องหรือกำลังจะเกิดขึ้นแล้วต้องการให้มีการคาดคะเนข้อบกพร่อง [3],[4] ซึ่งมีฟังก์ชันพื้นฐานสามอย่างในการป้องกันหรือลดข้อบกพร่องได้แก่การปิดระบบการควบคุมและการเตือน [4],[5] เทคนิคนี้จะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์กระบวนการสำหรับปัญหาที่อาจเกิดขึ้นให้ระบุชิ้นส่วนตามลักษณะของรูปร่างมิติและน้ำหนัก ตรวจจับความเบี่ยงเบนของกระบวนการจากขั้นตอนและบรรทัดฐานที่ระบุ [6] มีสองวิธีในการใช้เทคนิค โปลา-โยเกะ คือวิธีการควบคุมและวิธีการเตือน

ทางคณะผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎี เทคนิค โปลา-โยเกะ ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมช่วยป้องกันความผิดพลาดและลดการสูญเสียเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขึ้นมาอีก

2.2. ผังแสดงเหตุและผล

แผนภาพสาเหตุและผล คือแผนภาพที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่ง (ผล) กับองค์ประกอบหรือสาเหตุต่าง ๆ (เหตุ) ที่มีผลทำให้เกิดคุณลักษณะนั้น ๆ ไว้อย่างเป็น ระบบ โดยรวบรวมในแผนภาพที่มีลักษณะคล้ายกังปลา จึงเรียกชื่อกันว่า “ผังกังปลา” และเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ผู้ที่คิดค้นขึ้นมาคือ ดร.อิชิกวา [7] แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างโครงสร้างของแผนภูมิกังปลา

2.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมผู้วิจัยพบงานวิจัยหลาย ๆ งานที่ต้องการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้เทคนิคโปลา-โยเกะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น เช่น ในงานวิจัยของ Nanjundaraj et al. [8] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำเทคนิคโปลา-โยเกะใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานโดยการลดอัตราการเกิดของเสียของชิ้นงานในสายการประกอบชิ้นส่วนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการนำโปลา-โยเกะไปใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการปฏิบัติงานในการประกอบชิ้นส่วนและการลดการเกิดของเสีย โดยในงานวิจัยสรุปว่าผลที่ได้จากการใช้เทคนิคโปลา-โยเกะสามารถลดการสูญเสียเป็นศูนย์ได้

ในงานวิจัยของ Semsri et al. [9] ได้ศึกษาและเสนอวิธีโปลา-โยเกะมาช่วยป้องกันความผิดพลาดและลดการสูญเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังคับโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์โดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools) ได้แก่ ใบตรวจสอบ ผังแสดงเหตุและผล และกราฟในการค้นหาสาเหตุและหาแนวทางการแก้ไข การหาความสัมพันธ์ เหตุและผล และเทคนิค ECRS โดยในงานวิจัยสรุปได้ว่าวิธี โปลา-โยเกะช่วยลดความผิดพลาดลงได้ส่งผลให้จำนวนของเสียลดลงเหลือร้อยละ 0

ในงานวิจัยของ Prommaboon et al. [10] ได้ศึกษาออกแบบและสร้างระบบสายพานลำเลียง (กรณีศึกษา : บริษัท ซีพีเอฟ เทรดดิ้ง จำกัด สาขาลำปาง) มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและสร้างระบบสายพานลำเลียง และทดสอบหาประสิทธิภาพในการขนถ่ายกล่องสินค้า เพื่อแก้ปัญหาความเสียหายของกล่องและการนับจำนวนสินค้าที่ผิดพลาด โดยพนักงาน จากการทดสอบการทำงานพบว่าระบบการนับสินค้าของชุดสายพานลำเลียงมีความแม่นยำร้อยละ 100 มีประสิทธิภาพในการขนถ่ายสินค้าร้อยละ 180 เมื่อเทียบกับการขนถ่ายโดยใช้พนักงาน สามารถนำไปใช้งานขนถ่ายสินค้าของผู้ประกอบการโลจิสติกส์ได้จริง

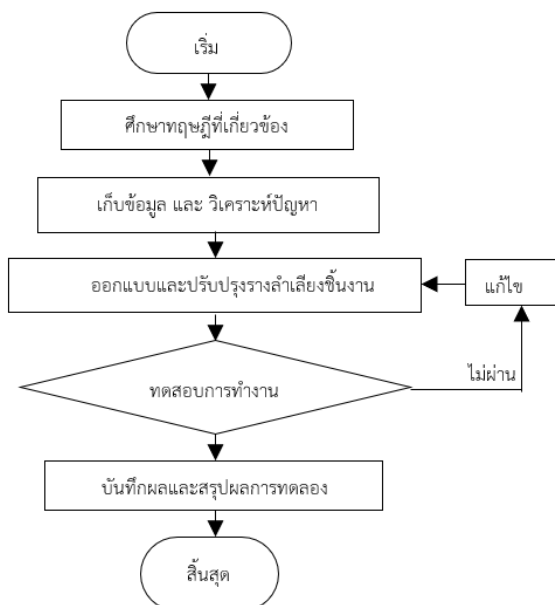
ในงานวิจัยของ Pitak et al. [11] ได้ทำการศึกษาปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตแผ่นวงจรแบบยืดหยุ่นโดยใช้หลักการ ECERS และออกแบบลูกกลิ้งลำเลียงตามแรงโน้มถ่วง ที่พบเวลาสูญเสียเปล่า ในกระบวนการเคลื่อนย้าย

อุปกรณ์ฟีกเจอร์และค่าจ้างที่เพิ่มขึ้น จึงได้มีการนำหลักการทางวิศวกรรมย้อนกลับ ไปใช้ในการค้นหาความรู้ด้านการออกแบบ จากการศึกษาความเป็นไปได้ของการออกแบบ และสร้างลูกกลิ้งลำเลียงตามแรงโน้มถ่วงพิจารณาจากการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน ผลการวิจัยพบว่า การออกแบบและสร้างลูกกลิ้งลำเลียงตามแรงโน้มถ่วงสามารถคืนทุนได้ภายใน 4.5 เดือน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีหลักการอยู่หลายแบบ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาทางลำเลียงชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการเก็บข้อมูลพบว่าเทคนิคโพลา-โยเกะ เป็นการควบคุมการตรวจสอบความผิดพลาดจากระบบ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขึ้นใหม่อีก จึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงรางลำเลียงคูลเลอร์รถจักรยานยนต์ เพื่อลดปัญหาชิ้นงานติดขัดบนรางลำเลียงชิ้นงาน

3. วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานในครั้งนี้ มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนี้

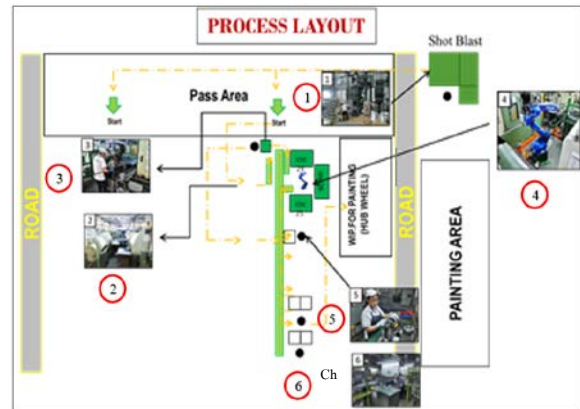


รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1. เก็บข้อมูล และ วิเคราะห์ปัญหา

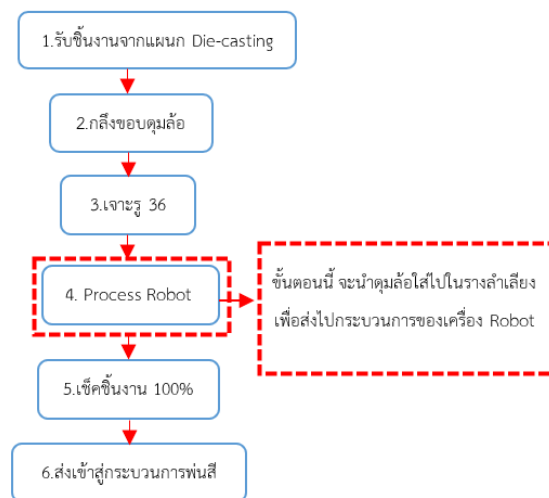
คณะผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลก่อนการปรับปรุงและวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงกระบวนการ

ลำเลียงคูลเลอร์รถจักรยานยนต์ที่เกิดจากการติดขัดบนรางลำเลียงชิ้นงาน โดยมีแผนผังกระบวนการผลิตคูลเลอร์รถจักรยานยนต์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการผลิตคูลเลอร์

ในส่วนของการขั้นตอนการผลิตคูลเลอร์รถจักรยานยนต์จะแสดงดังรูปที่ 4



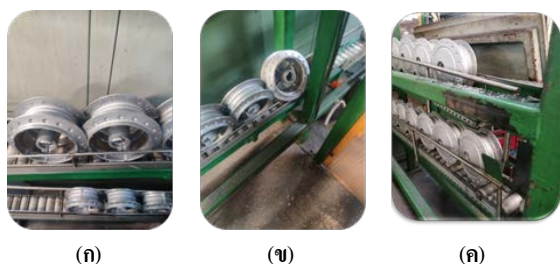
รูปที่ 4 ขั้นตอนการผลิตคูลเลอร์รถจักรยานยนต์

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองก่อนการปรับปรุงและบันทึกปัญหาชิ้นงานติดขัด จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 69 ชิ้น รวม 207 ชิ้น เหตุผลที่เก็บชิ้นงานจำนวน 207 ชิ้นเนื่องจากยอดการผลิตในแต่ละวันที่ไม่เท่ากันและใช้เวลาในการเก็บผลก่อนข้างใช้เวลานาน โดยมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การบันทึกปัญหาชิ้นงานติดขัด จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 69 ชิ้น รวม 207 ชิ้น

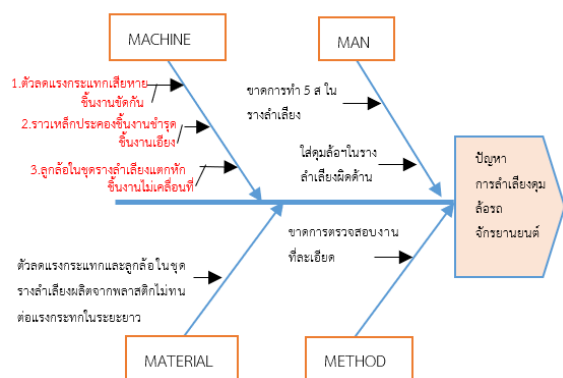
รากลำเลียงชิ้นงาน (ก่อนปรับปรุง)							
ครั้งที่ทดสอบ	ปัญหาที่ทำให้งานไม่สามารถดำเนินการต่อได้						
	ชิ้นงานขัดกัน	เวลา (วินาที)	ชิ้นงานเอียง	เวลา (วินาที)	ชิ้นงานไม่เคลื่อนที่	เวลา (วินาที)	รวมเวลา (วินาที)
1	11	176	19	304	7	336	816
2	14	224	16	256	9	432	912
3	15	240	16	256	9	432	928
รวม	40	640	51	816	25	1,200	2,656
$\bar{x}$	13.33	213.33	17.00	272.00	8.33	400.00	885.33

ปัญหาชิ้นงานติดขัดที่พบในกระบวนการลำเลียงคูลม
ล้อยกรรยานยนต์ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปัญหางานติดขัด (ก) ชิ้นงานขัดกัน (ข) ชิ้นงานเอียง (ค) ชิ้นงานไม่เคลื่อนที่

จากวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการลำเลียงคูลมล้อยกรรยานยนต์ คณะผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎี 7 QC Tools ใช้เครื่องมือแผนภูมิแก๊งปลาเข้ามาวิเคราะห์ปัญหาที่ทำให้เกิดปัญหาการลำเลียงคูลมล้อยกรรยานยนต์ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเวลาดังแสดงใน รูปที่ 6



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา

จากการศึกษาขั้นตอนการทำงานและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภูมิแก๊งปลาเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ร่วมประชุมกับพนักงานในบริษัทและการเลือกใช้เทคนิคโพลาโยเกะ ที่ช่วยควบคุม ป้องกันความผิดพลาดและลดการสูญเสียเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขึ้นอีก โดยการแก้ปัญหาที่ตัวรากลำเลียงชิ้นงาน เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานติดขัด ซึ่งพบปัญหา คือ

ก) ปัญหาตัวลดแรงกระแทกคูลมล้อยกรรยานยนต์แตกหักเสียหาย เนื่องจากใช้วัสดุที่ทำจากพลาสติก ซึ่งมีข้อเสียทางด้านของความแข็งแรง และมีอายุการใช้งานไม่ยาวนานดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวลดแรงกระแทกชำรุดเสียหาย

ข) ลูกกลิ้งที่ให้ชิ้นงานเคลื่อนตัวแตกชำรุดเนื่องจากวัสดุเป็นพลาสติก และชิ้นงานเป็นอลูมิเนียม ในช่วงขณะที่ชิ้นงานตกลงจากชั้นบนสู่ชั้นล่าง จะทำให้เกิดปัญหาการกระแทก จน ลูกกลิ้งเกิดความเสียหาย และแตกหัก ทำให้เกิดปัญหางานติดขัด ในการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้พนักงานจะเดินมาปรับชิ้นงานให้สามารถปฏิบัติงานต่อไปได้ โดยใช้เวลา

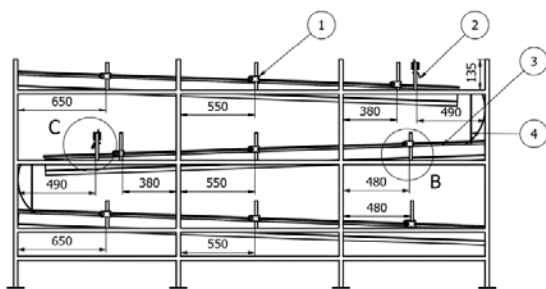
16 วินาที ในการเดินมาถึงรางลำเลียงชิ้นงานจากนั้นต้องตั้ง
คำสั่งให้กับหุ่นยนต์ เพื่อให้ทำงานใหม่ใช้เวลา 32 วินาที
รวม 48 วินาที ต่อชิ้นงานที่เกิดการติดขัด 1 ครั้ง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลูกกลิ้งชำรุดเสียหาย

3.2. ปรับปรุงรางลำเลียงคูลเลอร์จักรยานยนต์

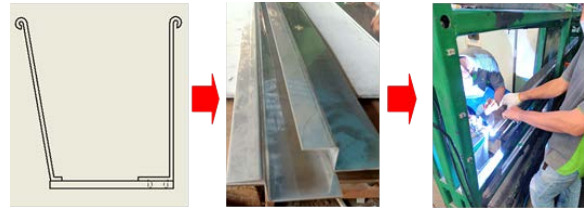
จากการวิเคราะห์ปัญหากระบวนการผลิตของราง
ลำเลียงคูลเลอร์จักรยานยนต์ ทางคณะผู้วิจัยได้ใช้เทคนิค
โพคา-โยเกะ ที่ช่วยไม่ให้เกิดปัญหาขึ้นมามาก โดยทำการ
ออกแบบปรับปรุงรางลำเลียงขึ้นมาใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 9
ซึ่งได้เพิ่มการติดตั้งไคด์บังคับชิ้นงาน แสดงในเลข 1 ตัวกัน
ชิ้นงาน แสดงในหมายเลข 2 ราวกันชิ้นงานเอียงแสดงใน
หมายเลข 3 และ ตัวลดแรงกระแทก แสดงในหมายเลข 4
เพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น



รูปที่ 9 ออกแบบและปรับปรุงรางลำเลียง

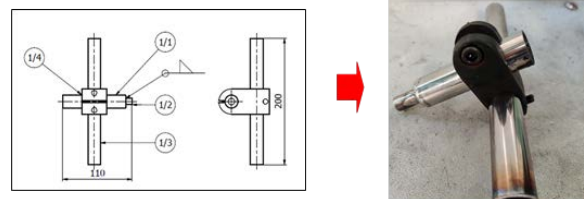
3.3. การออกแบบตัวรางลำเลียง

จากปัญหาที่พบว่าลูกกลิ้งที่มีหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานเกิด
การแตก จึงได้มีการออกแบบและสร้างรางลำเลียงใหม่ที่ใช้
วัสดุเป็น แผ่นสแตนเลส ที่มีคุณสมบัติทนต่อแรงกระแทก
ทนต่อการเกิดสนิม เกิดแรงเสียดสีน้อย นำมาพับขึ้นรูปให้
เป็นรางลำเลียง ดังแสดงในรูปที่ 10



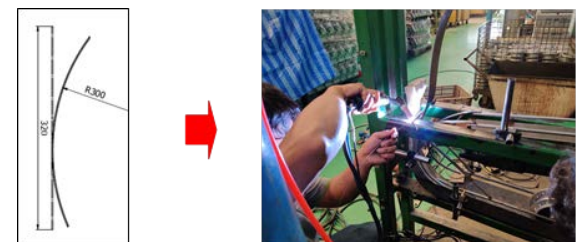
รูปที่ 10 ประกอบตัวรางลำเลียงใหม่

ในส่วนของไคด์บังคับชิ้นงานได้ทำการออกแบบและ
สร้างขึ้นมาเพื่อบังคับไม่ให้คูลเลอร์จักรยานยนต์เกิดการเอียง
ตัวและขัดกันจนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ประกอบไคด์บังคับชิ้นงานกับราวเหล็กประคอง

การออกแบบและติดตั้งราวเหล็กโค้งในช่วงชิ้นงานตก
ลงมากอีกชั้นของรางลำเลียงเพื่อช่วยลดแรงกระแทกของ
ชิ้นงาน ไม่ให้เกิดการขัดกัน ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ประกอบราวเหล็กโค้งลดแรงกระแทกของชิ้นงาน

การเปรียบเทียบรางลำเลียงคูลเลอร์จักรยานยนต์ก่อน
การปรับปรุง และหลังปรับปรุงดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 รางลำเลียงคูลเลอร์จักรยานยนต์ (ก) ก่อนการ
ปรับปรุง (ข) หลังปรับปรุง

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

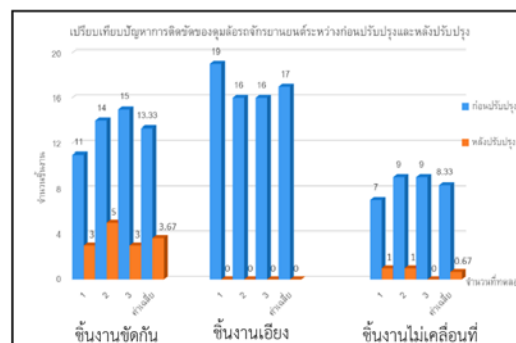
4.1. การเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองรางลำเลียงหลังการปรับปรุงใหม่ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุง จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 69 ชิ้น ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบปัญหาการติดขัดระหว่างก่อนและหลังปรับปรุง (ชิ้น)

ปัญหาการติดขัด	ชิ้นงานขัดกัน		ชิ้นงานเอียง		ชิ้นงานไม่เคลื่อนที่ Robot Alarm	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1	11	3	19	0	7	1
2	14	5	16	0	9	1
3	15	3	16	0	9	0
รวม	40	11	51	0	25	2
ค่าเฉลี่ย	13.33	3.67	17.00	0	8.33	0.67

จากผลการทดลองของตารางที่ 2 การเปรียบเทียบปัญหาการติดขัดระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงรางลำเลียงชิ้นงานโดยสรุปผลจากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 69 ชิ้นงาน รวม 207 ชิ้นงาน พบว่าก่อนปรับปรุงพบจำนวนชิ้นงาน ติดขัดจะอยู่ที่ 116 ชิ้น คิดเป็น 56.04 เปอร์เซ็นต์ หลังการปรับปรุงพบจำนวนชิ้นงาน ติดขัดจะอยู่ที่ 13 ชิ้น คิดเป็น 6.28 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 เปรียบเทียบปัญหาการติดขัดของคูลเลอร์รถจักรยานยนต์ระหว่างก่อนและหลังปรับปรุง

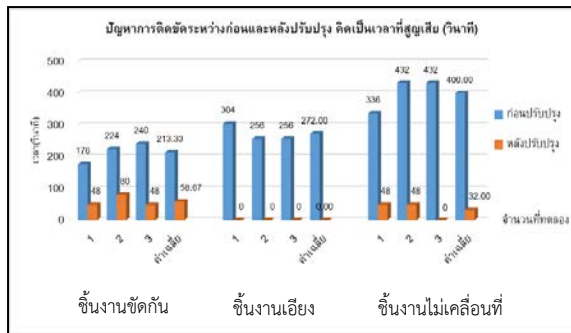
ผู้วิจัยได้ทำการทดลองรางลำเลียงหลังการปรับปรุงใหม่ โดยเปรียบเทียบเวลาที่สูญเสียของปัญหาการติดขัดก่อนและหลังการปรับปรุง(วินาที) จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 69 ชิ้น ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเวลาที่สูญเสียของปัญหาการติดขัดก่อนและหลังการปรับปรุง(วินาที)

ปัญหาการติดขัด	ชิ้นงานขัดกัน		ชิ้นงานเอียง		ชิ้นงานไม่เคลื่อนที่ Robot Alarm	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1	176	48	304	0	336	48
2	224	80	256	0	432	48
3	240	48	256	0	432	0
รวม	640	176	816	0	1,200	96
ค่าเฉลี่ย	213.33	58.67	272.00	0	400.00	32.00

จากผลการทดลองของตารางที่ 3 การเปรียบเทียบปัญหาการติดขัดระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงรางลำเลียงชิ้นงาน โดยคิดเป็นเวลาที่สูญเสีย (วินาที) ซึ่งสรุปผลจากการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 69 ชิ้นงาน รวม 207 ชิ้นงาน พบว่า

ก่อนปรับปรุง มีจำนวนชิ้นงานขัดกันรวมสูญเสียเวลาอยู่ที่ 1,200 วินาที มีค่าเฉลี่ย 400.00 หลังการปรับปรุงมีจำนวนชิ้นงานขัดกัน รวมสูญเสียเวลาอยู่ที่ 96 วินาที มีค่าเฉลี่ย 32.00 แสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 เปรียบเทียบปัญหาการติดขัดระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงโดยคิดเป็นเวลาที่สูญเสีย

สรุปการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงรางลำเลียงชิ้นงาน ซึ่งสามารถลดจำนวนปัญหาชิ้นงานระหว่างการผลิต โดยสรุปผลจากทดลอง 3 ครั้ง ครั้งละ 69 ชิ้นงาน รวม 207 ชิ้นงาน ก่อนปรับปรุงจำนวนการติดขัดจะอยู่ที่ 116 ชิ้น คิดเป็น 56.04 เปอร์เซ็นต์ หลังการปรับปรุงจำนวนการติดขัดจะอยู่ที่ 13 ชิ้น คิดเป็น 6.28 เปอร์เซ็นต์ กล่าวโดยสรุปจะสามารถช่วยลดการติดขัดในระหว่างการผลิตลำเลียงคูลม ล้อรถจักรยานยนต์ ได้ร้อยละ 88.80 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปปัญหาการติดขัดของชิ้นงานระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

ปัญหา	ชิ้นงานทดลอง 3 ครั้ง (ชิ้น)	ปัญหาชิ้นงาน (ชิ้น)	คิดเป็น เปอร์เซ็นต์
ก่อน ปรับปรุง	207	116	56.04
หลัง ปรับปรุง	207	13	6.28
ลดลงร้อยละ			88.80

สรุปปัญหาเปรียบเทียบเวลาที่สูญเสียของปัญหาการติดขัดก่อนและหลังการปรับปรุง(วินาที) ซึ่งสามารถลดเวลาสูญเสีย โดยก่อนปรับปรุงมีเวลาสูญเสีย 2,656 วินาที คิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ หลังการปรับปรุงมีเวลาสูญเสีย 272 วินาที คิดเป็น 10.24 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกันจะสามารถช่วยลดการเวลาที่สูญเสีย ได้ 89.76 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปปัญหาเปรียบเทียบเวลาที่สูญเสียของปัญหาการติดขัดก่อนและหลังการปรับปรุง(วินาที)

ปัญหา	ชิ้นงานทดลอง 3 ครั้ง (ชิ้น)	เวลาสูญเสีย (วินาที)	คิดเป็น เปอร์เซ็นต์
ก่อน ปรับปรุง	207	2,656	100
หลัง ปรับปรุง	207	272	10.24
ลดลง			89.76

5. บทสรุป

5.1.สรุปผล

จากการศึกษาขั้นตอนการทำงานและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภูมิแกงปลาและการเลือกใช้เทคนิคโพลา-โยเกะ ที่ช่วยควบคุม ป้องกันความผิดพลาดและลดการสูญเสียเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขึ้นซ้ำอีก โดยการแก้ปัญหาที่ตัวรางลำเลียงชิ้นงาน จากการผลิตคูลม ล้อรถจักรยานยนต์ พบปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อไม่ให้เกิดกระบวนการผลิตดำเนินต่อไปได้ แบ่งออกได้เป็น 3 ปัญหา คือ 1) ปัญหาชิ้นงานขัดกัน 2) ปัญหาชิ้นงานเอียง และ 3) ปัญหาชิ้นงานไม่เคลื่อนที่ โดยจากปัญหาข้างต้น ก่อนการปรับปรุงแก้ไข พบปัญหาที่ทำให้ชิ้นงานติดขัดจำนวน 116 ชิ้น คิดเป็น 56.04 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากการปรับปรุงแก้ไขรางลำเลียงคูลม ล้อรถจักรยานยนต์ที่เปลี่ยนจากลูกกลิ้งพลาสติกเป็นแผ่นสแตนเลส ที่มีคุณสมบัติ ทนต่อแรงกระแทก ทนต่อการเกิดสนิม และปรับปรุงติดตั้งไคด์ เพื่อบังคับทิศทาง ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาชิ้นงานที่ส่งผลกระทบต่อความไม่ต่อเนื่องในกระบวนการผลิตลดลงได้ เนื่องจากพบปัญหาหลังการปรับปรุงเพียงจำนวน 13 ชิ้น คิดเป็น 6.28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถลดปัญหาการติดขัดของชิ้นงาน ได้ถึงร้อยละ 88.80 ดังนั้นการใช้เทคนิคโพลา-โยเกะ เข้ามาแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตจะช่วยให้อุปกรณ์นั้นลดลงหรือไม่เกิดขึ้นซ้ำอีก

5.2.ข้อเสนอแนะ

- 1) ในขั้นตอนการปรับปรุงรางลำเลียงคูลม ล้อรถจักรยานยนต์ ควรจัดทำคู่มือการใช้งานและ

- แผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาใหม่
- 2) ในการปรับปรุงงานครั้งถัดไปควรคิดถึงลมพันท่าความสะอาดรางลำเลียงเนื่องจากมีเศษอะลูมิเนียมที่เกิดจากการเจาะรูไปขบวนการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน
 - 3) ในการปรับปรุงงานครั้งถัดไปควรเพิ่มเติมระบบเซนเซอร์ตรวจจับชิ้นงานหากพบความผิดปกติต้องสามารถแสดงผลให้ผู้รับผิดชอบทราบในทันที

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Automotive Industry Possibilities of Thai Industry*, Sumipol Agile Technology. May 23, 2018. [Online]. Available: <https://www.sumipol.com/knowledge/Industry>
- [2] J. Pintong, C. Mongkol, A. Surakul, P. Kritratpon, S. Prajongsak and N. Hongsachart, “Line Efficiency Improvement for Part MJE and MGZA of Shaft Water Pump Model Case Study: Automotive Parts Company,” *Journal of Rajanagarindra*, vol 17, no 1, pp. 125–131, 2017.
- [3] M. Fisher, “Process improvement by poka-yoke,” *Work Study*, vol. 48, no. 7, pp. 264–226, 1999, doi: 10.1108/00438029910294153.
- [4] M. Dudek-Burlikowska and D. Szewieczek, “The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process,” *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 95–102, 2009.
- [5] N. K. Shimbun, “Overview of Poka-yoke,” in *Poka-Yoke Improving Product Quality by Preventing Defects*, 1st ed. Portland, OR, USA: Productivity Press, 1988, ch. 1, pp. 1–28.
- [6] S. Patel, B. G. Dale and P. Shaw, “Set-up time reduction and mistake proofing methods: an examination in precision component manufacturing,” *The TQM Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 175–179, 2001, doi: 10.1108/09544780110385528.
- [7] S. Khophonklang, “Cause and Effect Diagram,” in *Quality Control*, 1th ed. Bangkok, Thailand: Skybook, 2001, ch. 5, sec. 5.4, pp.126.
- [8] P. Nanjundaraj, V. Kannan, P. Sangeetha and S. Umamaheswari, “A Study on implementation of POKA– YOKE technique in improving the operational performance by reducing the rejection rate in the assembly Line”, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 119, no. 17, pp. 2177–2191, 2018.
- [9] A. Semsri, A. Suksukon, S. Sisamut and T. Pudtipatkosit, “Quality Control and Loss Reduction in the Front Side Fender Model Assembly Process Using Poka-Yoke Techniques,” *RMUTP Research Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 103–117, 2021.
- [10] P. Prommaboon, A. Intawongsa, P. Ponlux, P. Nokaew, N. Kitpaisansakun and S. Tipkhat, “The Design and Building of a Conveyor- Belt System (Case study: CPF Trading Co. , ltd. Lampang Branch),” *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol. 9, no1, pp. 14–21, 2016.
- [11] P. Pitak, O. Phanbualuang, K. Chongwatanarak and K. Phaewthaisong, “Efficiency Improvement of Production Line Using Gravity Roller System” , *Academic Journal of Thonburi University (Science and Technology)*, vol. 2, no. 2, pp. 42–52, 2018.

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความสำหรับวิศวสารลาดกระบัง

การเตรียมต้นฉบับบทความ

กองบรรณาธิการวิศวสารลาดกระบังได้แบ่งประเภทของบทความเป็น 2 ประเภท ได้แก่ บทความทางวิชาการ และบทความวิจัย และได้ให้คำนิยามดังนี้

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ ได้แก่ มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

ผู้แต่งบทความควรเขียนบทความอยู่ระหว่าง 8-14 หน้ากระดาษขนาด A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวสารลาดกระบัง ทั้งนี้บทความต้นฉบับต้องได้รับการอนุมัติยืนยันจากผู้แต่งร่วมทุกคน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาหรือตีพิมพ์ในวารสารวิชาการอื่น ๆ ให้ผู้แต่งส่ง (1) บทความพร้อมกับ (2) จดหมายนำ (Cover Letter) ที่ระบุ

- ขอบเขต ของบทความว่าสอดคล้องกับขอบเขตของวารสารในหัวข้อใด
- ความสำคัญของหัวข้อบทความหรือปัญหาทางจริง
- ปัญหางานวิจัยหรือช่องว่างขององค์ความรู้
- ผลงานวิจัยที่ได้มีความแตกต่างหรือดีกว่างานวิจัยก่อนหน้าอย่างไร
- 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 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลขระบบบทสนิยกำกับหัวข้อย่อย และสามารถดาวน์โหลดรายละเอียดได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>

1.2. แบบและขนาดตัวอักษร ใช้ตัวอักษรแบบ Angsana New ขนาด 14 point ทั้งบทความทั้งบทความภาษาไทย และบทความภาษาอังกฤษ

2. การเรียงลำดับเนื้อหาบทความ สำหรับบทความภาษาไทย

2.1 ชื่อเรื่อง (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำอย่างชัดเจน

ตัวอย่างชื่อเรื่อง

ชื่อเรื่องภาษาไทยใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 20 พอยท์ ตัวหนา จัดกึ่งกลาง

Title in English use Angsana New Size 20 Point, Bold, Center, the First Alphabet in Each Word is Uppercase

2.2 ชื่อ-นามสกุลของผู้เขียนใส่ทุกคน เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุสถานที่ทำงาน สำหรับผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author) ขนาด 14 พอยท์

ตัวอย่างชื่อ-นามสกุลผู้แต่ง

ชื่อผู้แต่ง นามสกุล¹, ชื่อผู้แต่ง นามสกุล² และ ชื่อผู้แต่ง นามสกุล^{2,*}

¹ สังกัดภาควิชา, คณะ, มหาวิทยาลัย ชื่อตำบล ชื่ออำเภอ ชื่อจังหวัด รหัสไปรษณีย์

² สังกัดหน่วยงาน, บริษัท ชื่อตำบล ชื่ออำเภอ ชื่อจังหวัด รหัสไปรษณีย์

First name Lastname¹, First name Lastname² and First name Lastname^{2,*}

¹ Affiliation Department, Faculty, University, Subdistrict, City, State, Postcode, Country

² Affiliation Department, Company, Subdistrict, City, State, Postcode, Country

***Corresponding Author E-mail:** author_email@email.com

2.3 บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นเนื้อความสรุปสาระสำคัญของเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และผลสรุป มี 1 ย่อหน้า จำนวนคำประมาณไม่เกิน 300 คำ

2.4 คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้ใส่คำสำคัญ 3–5 คำ ไว้ท้ายบทคัดย่อแต่ละภาษา

2.5 เนื้อหา (Text) บทความวิจัยควรประกอบด้วย

- บทนำ (Introduction) บอกความสำคัญหรือ ที่มาของปัญหาที่นำไปสู่การศึกษา วัตถุประสงค์ และอาจรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)
- วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods) กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์และทดลองที่กระชับและชัดเจน
- ผลการทดลอง (Results) บอกผลที่พบอย่างชัดเจน สมบูรณ์ และมีรายละเอียดครบถ้วน
- อภิปรายผลและสรุป (Discussion and Conclusion) อาจเขียนรวมกับผลการทดลองได้ เป็นการประเมินการตีความและการวิเคราะห์ในแง่มุมต่างๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้อง หรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร

ต้องมีการอ้างหลักการหรือทฤษฎีมาสนับสนุน หรือหักล้างอย่างเป็นเหตุเป็นผลและ
อาจมีข้อเสนอแนะที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

2.6 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) (ถ้ามี) ระบุสั้นๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุน
วิจัย หรือได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานใด

2.7 เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลขในวงเล็บก้ามปู[1] เอกสารอ้างอิง
ท้ายบททุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงในบทความ และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลัก
วิชาการตามรูปแบบของ IEEE ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบดังต่อไปนี้

กรณีเป็นหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

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

ตัวอย่าง

- [1] R. E. Blahut, *Theory and Practice of Error Control Codes*, Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1983.
- [2] I.A. Glover and P.M. Grant, *Digital Communications*, 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2009.
- [3] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [4] Westinghouse Electric Corporation (Staff of Technology and Science, Aerospace Div.), *Integrated Electronic Systems*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1970.
- [5] T.M. Lillis and J. Swann, "Giving feedback on student writing," in *Teaching academic writing: a toolkit for higher education*, C. Coffin, Eds. London: Routledge, 2003, pp. 101-129.

กรณีเป็นหนังสือ E-Book

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher, State,
Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx. [Online]. Available: <http://www.web.com>

ตัวอย่าง

- [1] G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics,” in *Plastics, vol. 3, Polymers of Hexadromicon*, J. Peters, Ed., 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64. [Online]. Available: <http://www.bookref.com>.
- [2] *The Terahertz Wave eBook*. ZOmega Terahertz Corp., 2014. [Online]. Available: http://dl.z-thz.com/eBook/zomega_ebook_pdf_1206_sr.pdf. Accessed: May 19, 2014.
- [3] P. B. Kurland and R. Lerner, Eds., *The Founders’ Constitution*. Chicago, IL, USA: Univ. of Chicago Press, 1987. [Online]. Available: <http://press-pubs.uchicago.edu/founders/> Accessed: Feb. 28, 2010.

กรณีเป็นหนังสือแปล

รูปแบบพื้นฐาน

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

ตัวอย่าง

- [1] K. Ichiro, *Thai Economy and Railway 1885–1935*, Tokyo: Nihon Keizai Hyoronsha (in Japanese), 2000.
- [2] M. Gorkii, “Optimal design,” *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, vol. 12, pp. 111–122, 1961 (Transl.: in L. Pontryagin, Ed., *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. New York, NY, USA: Interscience, 1962, ch. 2, sec. 3, pp. 127–135).

กรณีเป็นส่วนหนึ่งของหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] T. Ogura, “Electronic government and surveillance-oriented society,” in *Theorizing Surveillance: The Panopticon and Beyond*. Cullompton, U.K.: Willan, 2006, ch. 13, pp. 270–295.
- [2] L. Li, J. Yang, and C. Li, “Super-resolution restoration and image reconstruction for passive millimeter wave imaging,” in *Image Restoration—Recent Advances and Applications*, A. Histace, Ed., Rijeka, Croatia: InTech, 2012, pp. 25–45.
- [3] หนังสือ With Editor
- [4] C. Bennett, “What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post 9/11,” in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.

กรณีหนังสือที่มีบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, pp. xxx–xxx.

X. Editor, Ed. *Title of Published Book*. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year.

ตัวอย่าง

- [1] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed., New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55–70.
- [2] C. Bennett, "What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post9/11," in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.
- [3] W. R. Leonard and M. H. Crawford, Eds. *Human Biology of Pastoral Populations*. New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2002.

กรณีเป็นหนังสือมี Series

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, X. Editor, Ed., xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Taflov, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* in Computational Electrodynamics II, vol. 3, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 1996.
- [2] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, Eds., San Francisco, CA, USA: Academic, 1977, pp. 47–160.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," presented at the Abbreviated Name of Conf., City of Conf., Abbrev. State, Country, Month and day(s), year, Paper number.

ตัวอย่าง

- [1] J. G. Kreifeldt, "An analysis of surface-detected EMG as an amplitude-modulated noise," presented at the 1989 Int. Conf. Medicine and Biological Engineering, Chicago, IL, USA, Nov. 9–12, 1989.

- [2] G. W. Juette and L. E. Zeffanella, "Radio noise currents on short sections on bundle conductors," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Dallas, TX, USA, Jun. 22–27, 1990, Paper 90 SM 690-0 PWRS.
- [3] J. Arrillaga and B. Giessner, "Limitation of short-circuit levels by means of HVDC links," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles, CA, USA, Jul. 12–17, 1990, Paper 70 CP 637.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่กำลังจะตีพิมพ์ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), (Month and day(s) if provided) year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] W. D. Doyle, "Magnetization reversal in films with biaxial anisotropy," in *1987 Proc. INTERMAG Conf.*, pp. 2.2- 1–2.2-6.
- [2] C. T. Meadow and D. W. Waugh, "Computer assisted interrogation," in *1991 Fall Joint Computer Conf., Proc. AFIPS Conf.*, vol. 29. Washington, DC, USA: Spartan, 1991, pp. 381–394.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่มีเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), year, pp. xxx–xxx, doi: xxx.

ตัวอย่าง

- [1] J. Zhao, G. Sun, G. H. Loh, and Y. Xie, "Energy-efficient GPU design with reconfigurable in-package graphics II. Style—7 memory," in *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. Low Power Electron. Design (ISLPED)*, Jul. 2012, pp. 403–408, doi: 10.1145/2333660.2333752.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมสถานที่

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City, State, Country, year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] L. S. Carmichael, N. Ghani, P. K. Rajan, K. O'Donoghue, and R. Holt, "Characterization and comparison of modern layer-2 Ethernet survivability protocols," in *Proc. 37th Southeastern Symp. Syst. Theory (SSST 2005)*, Tuskegee, AL, USA, Mar. 20–22, 2005, pp. 124–129

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมบรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, X. Editor, Ed. (location of conference is optional), year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมหัวข้อต่อเนื่อง ฉบับ และ บรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.* in Volume Title, in Series Title, ed., year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author. (Date). Title. Presented at Abbreviated Conf. title. [Type of Medium]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] V. Chandrasekaran, S. Sanghavi, P. A. Parrilo, and A. S. Willsky. (2009). Sparse and low-rank matrix decompositions. Presented at IFAC 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016388632>

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date, doi: xxx.

Title, Source, Date, doi: URL.

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: 10.3886/ICPSR30122.v2.
- [2] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.3886/ICPSR30122.v2>.

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงผ่านเว็บไซต์

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013. [Online]. Available: <http://www.icpsr.umich.edu/icpsrweb/SAMHDA/studies/30122/version/2>

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(รูปเล่ม)

รูปแบบพื้นฐาน

Name of Manual/Handbook, x ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] *Transmission Systems for Communications*, 3rd ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, USA, 1985, pp. 44-60.

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(ออนไลน์)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author (or Abbrev. Name of Co., City of Co. Abbrev. State, Country). Name of Manual/Handbook, x ed. (year). Accessed: Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] L. Breiman. *Manual on Setting Up, Using, and Understanding Random Forests v4.0*. (2003). Accessed: Apr. 16, 2014. [Online]. Available: http://oz.berkeley.edu/users/breiman/Using_random_forests_v4.0.pdf
- [2] M. Kuhn. *The Caret Package*. (2012). [Online]. Available: <http://cranrproject.org/web/packages/caret/caret.pdf>

- [3] *Antenna Products*. (2011). Antcom. Accessed: Feb. 12, 2014. [Online]. Available: <http://www.antcom.com/documents/catalogs/L1L2GPSAntennas.pdf>

กรณีเป็นรายงานรูปเล่ม

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of report," Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, Rep. xxx, year.

ตัวอย่าง

- [1] K. E. Elliott and C. M. Greene, "A local adaptive protocol," Argonne National Laboratory, Argonne, France, Tech. Report. 916-1010-BB, 7 Apr. 2007.
- [2] J. H. Davis and J. R. Cogdell, "Calibration program for the 16-foot antenna," Elect. Eng. Res. Lab., Univ. Texas, Austin, Tech. Memo. NGL-006-69-3, Nov. 15, 1987.

กรณีเป็นรายงานออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of report," Company, City, State, Country, Rep. no., (optional: vol./issue), Date. Accessed: Date. [Online]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] Bureau of Meteorology, "Bureau of Meteorology: Measuring Rainfall in Australia," 2009. [Online]. Available: <http://www.bom.gov.au/climate/cdo/about/definitionsrain.shtml#meanrainfall>

กรณีเป็นวิทยานิพนธ์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง

- [1] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, USA, 1993.
- [2] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

กรณีเป็นวิทยานิพนธ์ออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, Country, year. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] D. Schwartz, "Development of a computationally efficient full human body finite element model," M.S. thesis, Virginia Tech – Wake Forest Univ. School of Biomed. Eng. Sci., Winston-Salem, NC, USA, 2015. [Online]. Available: https://wakespace.lib.wfu.edu/bitstream/handle/10339/57119/Schwartz_wfu_0248M_10697.pdf

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการ

รูปแบบพื้นฐาน

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

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

ตัวอย่าง

- [1] M. F. Elias, "The Relation of Drive to Finger-Withdrawal Conditioning," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 70, no. 2, p. 114, 1965.
- [2] J. Attapangittaya, "Social studies in gibberish," *Quarterly Review of Doublespeak*, vol. 20, no. 1, pp. 9-10, 2003.
- [3] J. Fallows, "Networking technology," *Atlantic Monthly*, Jul., pp. 34-36, 2007.
- [4] B. Metcalfe, "The numbers show how slowly the Internet runs today," *Infoworld*, 30 Sep., p. 34, 2006.
- [5] E. Aynoi, N. Nanthakusol, R. Jeenawong, C. Phongcharoenpanich and S. Kawdungta, "Vertical Beam Adjustable Antenna for Internet of Things Applications," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 38, No. 2, pp. 7-12, 2021.
- [6] T. Brunswiler et al., "Formulation of percolating thermal underfills using hierarchical self-assembly of microparticles and nanoparticles by centrifugal forces and capillary bridging," *J. Microelectron. Electron. Packag.*, vol. 9, no. 4, pp. 149-159, 2012, doi: 10.4071/imaps.357.

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการที่มีรหัสบทความ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, Abbrev. month, year, Art. no. xxx.

J. K. Author, "Name of paper," (in Language), *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, Abbrev. month, year, Art. no. xxx.

ตัวอย่าง

- [1] L. Kuang et al., "A numerical method for analyzing electromagnetic scattering properties of a moving conducting object," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2014, 2014, Art. no. 386315, doi: 10.1155/2014/386315.
- [2] E. P. Wigner, "On a modification of the Rayleigh-Schrodinger perturbation theory," (in German), *Math. Naturwiss. Anz. Ungar. Akad. Wiss.*, vol. 53, p. 475, 1935.

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year. Accessed: Month, Day, Year, doi: 10.1109.XXX.123456. [Online]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] W. P. Risk, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Fiber-optic frequency shifter using a surface acoustic wave incident at an oblique angle," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 115-117, Feb. 1986. [Online]. Available: <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-11-2-115>
- [2] P. Kopyt et al., "Electric properties of graphene-based conductive layers from DC up to terahertz range," *IEEE THz Sci. Technol.*, to be published, doi: 10.1109/TTHZ.2016.2544142.

กรณีเป็นสิทธิบัตร

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

J. K. Author, "Title of patent," Country Patent xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง

- [1] K. Kimura and A. Lipeles, "Fuzzy controller component," U. S. Patent 14860040, Dec, 14, 2006.

กรณีเป็นการสืบค้นจากเว็บไซต์

รูปแบบพื้นฐาน

First Name Initial(s) Last Name. "Page Title." Website Title. Web Address (retrieved Date Accessed).

ตัวอย่าง

- [1] J. Gerald, "Sega Ends Production of Dreamcast," vnunet.com. <http://nli.vnunet.com/news/1116995>. (Accessed Sept.12, 2007).
- [2] J. Smith and J. Doe. "Obama inaugurated as President." CNN.com. http://www.cnn.com/POLITICS/01/21/obama_inaugurated/index.html (Accessed Feb. 1, 2009).

2.8 ภาคผนวก (ถ้ามี)

ภาคผนวกเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาที่ใช้สำหรับการรวบรวมข้อมูล หรือผลการศึกษารอง ที่จะช่วยรับรองหลักการ หรือผลการศึกษาหลัก ควรมีการอ้างอิงภายในเนื้อหามายังภาคผนวก เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ง่าย ผู้แต่งสามารถแบ่งภาคผนวกออกเป็นหลาย ๆ ส่วนได้ เช่น ภาคผนวก 1 แสดงถึงการรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจ ภาคผนวก 2 แสดง การรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐและเอกชน เป็นต้น

2.9 ตารางและรูป และสมการ

การแทรกตารางและรูป และสมการ ต้องมีความคมชัดไม่น้อยกว่า 300 dpi ให้แทรกไว้ในเนื้อหาบทความ มีคำอธิบายประกอบสั้นๆ ที่สามารถสื่อความหมายได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ

กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง

กรณีที่เป็นรูปให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า“รูปที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูป กรณีที่มีรูปหลายรูปที่จะแสดงในครั้งเดียว ให้แบ่งรูปภาพด้วยตัวอักษร (ก), (ข), (ค) สำหรับบทความภาษาไทย และ ตัวอักษร (a), (b), (c) สำหรับบทความภาษาอังกฤษ

กรณีเป็นการแทรกสมการ ให้ระบุลำดับที่ของสมการไว้ทางด้านขวาของสมการภายในวงเล็บ เช่น (1) และการอ้างอิงในเนื้อหา ให้ใช้คำว่า สมการที่ (1)

3. เกณฑ์การพิจารณาบทความ

เกณฑ์การพิจารณาบทความสำหรับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังมีดังนี้ เนื้อหาของบทความมีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ เนื้อหา มีความสมบูรณ์ และ

โครงสร้างภาษาที่ใช้มีความชัดเจน ถูกต้องตามหลักทางวิชาการ ทั้งสมมุติฐาน / วัตถุประสงค์ การนำเสนอมีความชัดเจนกระชับ และการจัดรูปแบบของบทความ การอภิปรายผล และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ

บทความจะต้องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชานั้นๆ อย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งกองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และสงวนสิทธิ์ในการตัดสินใจพิมพ์หรือไม่ก็ได้ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยส่งเป็นไฟล์งาน .pdf และ .doc เป็น Word 2010

4. วิธีการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารลาดกระบัง

บทความที่ส่ง เปิดรับทั้งจากบุคคลภายใน และภายนอกสถาบันฯ โดยบทความนั้น ต้องมีความยาวไม่เกิน 14 หน้า 2 คอลัมน์ ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 15 หน้า และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ผ่านทางเว็บไซต์ของวารสารลาดกระบังได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

ผู้ประสานงานและสถานที่ติดต่อ:

นางสาวชนัญชิดา นอบน้อม

งานวิจัยและนวัตกรรม (ส่วนวารสารลาดกระบัง)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร 6 ชั้น (ตึก A) ชั้น 2 เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

หมายเลขติดต่อ :

โทรศัพท์(เบอร์กลาง) 02-329-8301 ต่อ 207

โทรศัพท์สายตรง/โทรสาร : 02-329-8301 ต่อ 207

โทรศัพท์มือถือ 086-106-4414

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ และ E-mail:)

1. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

2. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

3. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ (ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้)

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

เบอร์โทรศัพท์.....E-mail.....

ข้าพเจ้าได้แนบบทความที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ตามคำแนะนำรูปแบบการเขียนบทความมาพร้อมนี้ และรับรองว่า

☐ ได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความครั้งนี้จากผู้ร่วมเขียนบทความแล้ว (ถ้ามี) และไม่มีความขัดแย้งระหว่างผู้ร่วมเขียนบทความ

☐ ข้าพเจ้า และผู้ร่วมเขียนบทความ (ถ้ามี) จะรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี

☐ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความยังไม่เคยตีพิมพ์ หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น ข้าพเจ้าได้แนบบทความ ซึ่งข้อความหรือผลงานในบทความนี้ ได้คัดลอกหรือดัดแปลงมาจากเอกสารหรือรายงานอื่น หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ใช่ คัดลอกหรือดัดแปลงมาจาก.....

และถ้าใช่ได้มีการอ้างอิงถึงเอกสารหรือรายงานดังกล่าวในบทความหรือไม่

☐ อ้างอิง ☐ ไม่อ้างอิง เพราะ.....

บทความนี้ ได้รับเงินสนับสนุนการทำงานงานวิจัยจากหน่วยงานใด หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ได้รับการสนับสนุน จากแหล่งทุน.....เลขที่สัญญา.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าคำตอบข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

(ลงชื่อ).....(ผู้ส่งบทความ)

เอกสารประกอบการส่งบทความ

1. แบบฟอร์มการส่งบทความนี้ พร้อมระบุรายนามผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 3 ท่าน

2. บทความต้นฉบับจำนวน 1 ชุด (Ms Word)

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งสามารถประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 3 ท่าน โดยระบุชื่อ-นามสกุล ตำแหน่งทางวิชาการ, E-mail และเบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้)

1. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....
สถานที่ทำงาน.....
2. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....
สถานที่ทำงาน.....
3. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
E-mail :โทรศัพท์.....
สถานที่ทำงาน.....

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMUTL).

The objectives are to:

1. publish high quality research papers in the field of engineering and technology at national and international levels
2. disseminate research works and development in the field of engineering and technology
3. be a medium of exchanging research works and new body of knowledge in the field of engineering and technology among students, researchers, lecturers, and interested persons
4. be an archive of research reports and articles that are interesting and valuable in the field of engineering and technology.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Manuscripts can be written in either Thai or English, complying with the journal format, which are ready to be submitted in camera ready form. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts using Microsoft Word for windows. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

1. Introduction
2. Theory
3. Construction and experimental procedures
4. Experimental results and discussions
5. Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

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

Submission:

Manuscripts from inside and outside King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang can be submitted to the journal. The first page of the manuscript contains the authors' names and complete affiliations. Please duplicate the first page of the manuscript with the names and affiliations made anonymous. The manuscript length is between 8-14 pages of A4. The manuscript that exceeds the length limitation may not be considered for publication depending on the editorial judgment. Please also clearly fill out name-surname, address, phone number, and e-mail address in the submission form. Authors can submit their manuscripts online via the journal system at the url: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>.

Published by:

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel: (662) 329-8301 Ext. 207

Fax: (662) 329-8301 Ext. 207

Advisors:

Dean School of Engineering

Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai

Editor-in-chief:

Prof.Dr.Uma Seeboonruang

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Jakrapong Pongpeng

Assistant Editor:

Dr.Pinit Tanachaichoksirikun

Section Editor:

Prof.Dr.Pongjet Promvonge

Prof.Dr.Pornchai Supnithi

Assoc.Prof.Dr.Jaruwat Charoensuk

Assoc.Prof.Dr.norasage Pattanadet

Asst.Prof.Dr.Ravipat Lapcharoensuk

Asst.Prof.Dr.kittiwat Sirikasemsuk

Editorial Staff:

Miss.Chanunchida Nobnom

Liaise & Member Relationships

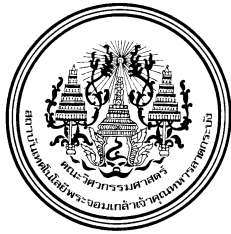
Create Original Artwork

Mr.Virun Chulkaivalsucharit

Proofreading and Photo Books

Mr.Thanongsak Chaichuensaen

Cover Design



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 40 Number 2

June 2023

Research Papers

1. Comparison of Bedload Drainage Efficiency of Ogee Weir, Labyrinth Weir and Piano Key Weir 1
P. Kanjanakaroon S. Amnuaypornlert P. Siphon P. Nilobol and R. Lueail
2. Adaptation Measure to Sea Level Rise by Beach Nourishment at Banpae Beach, Rayong Province 15
P. Nidhinarakoon and S. Ritphing
3. Comparative Analysis of the Effects of Cracking and Corrosion using Numerical Model for Bridge Monitoring System 24
P. Chairungruangsri N. Sinsamutpadung and K. Saiprasertkit
4. Optimization of Artesian Water Pump Systems by DMAIC Method Case Study: Porthanklaivajisit Hospital, Chawang District, Nakhon Si Thammarat Province 39
C. Srivabut S. Chantaramanee A. Mahno and J. Tamjai
5. Evaluating Double Layer Car Window Films for Heat Protection 53
P. Suengkerdpongthanan P. Juasiripukdee and S. Ruchayosyothin
6. Buckling Behavior of Cantilevered Pultruded Fiber-Reinforced Plastic Angle Beams 65
J. Thumrongvut K. Chaytawee S. Seangathith C. Ngohpok S. Pantawee and J. Supromwan
7. A Mobile Application Development with MIT App Inventor for an Efficiency Improvement of Receiving, Order Picking, and Put Away Processes in the Inventory Spare Parts Case Study 76
J. Jaikiang and J. Choomlucksana
8. A Comparison of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations from Agricultural Residue Burning 94
R. Srivoraphantu N. Boonmee T. Aroonsrisophon and E. Wirojsakunchai
9. Severity Assessment under Load Shedding to Thailand's Power System in High Difference of Load and Generation Capacity Areas 104
C. Wannoi and N. Wannoi
10. Axial Load Performance of Concrete-Filled Steel Tube Columns With Hydraulic Cement and Strengthened by Steel Bars 117
J. Thumrongvut P. Khamphay S. Seangathith S. Pantawee and J. Supromwan
11. Rheological Study of Rubber Compound during Injection Molding Process 128
S. Onouen and S. Patcharaphun
12. Improvement of Motorcycle Wheel Hubs Conveyor rail Process by Poka-yoke Techniques 138
P. Jaichomphu S. Pitjamit S. Sriyab N. Sarika and P. Jewpanya