

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ISSN 2286-668X

KASEM BUNDIT

Engineering Journal



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2565
Vol.12 No.3 September - December 2022

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2565

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

Volume 12 No.3 September-December 2022

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา ผลงานวิชาการ ตลอดจนองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ของอาจารย์ นักวิชาการอิสระ และวิศวกรทั่วไป และเป็นสื่อกลางระหว่างมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตกับสังคมภายนอกในการเผยแพร่ความรู้ต่างๆ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้เป็นฐานความรู้จะนำไปสู่การพัฒนาด้านวิศวกรรมต่อไป โดยมีกำหนดตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

วัตถุประสงค์

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา และผลงานวิชาการของคณาจารย์ทั้งในและนอกสถาบัน ตลอดจนนักวิชาการอิสระและวิศวกรทั่วไป
- เพื่อส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการวิจัยทั้งภายในและภายนอกสถาบัน ส่งผลให้มีการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างวิชาการและวิชาชีพ อันจะเป็นประโยชน์แก่ชุมชนและสังคมโดยรวม
- เพื่อสร้างกลไกสนับสนุนการเผยแพร่รวมถึงระบบการรวบรวมและคัดสรรผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในวงวิชาการและวิชาชีพ ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการประกันคุณภาพการศึกษา

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจะเน้นเป็นบทความวิจัย (Research Article) หรืออาจจะเป็นบทความวิชาการ (Academic Article) ได้ เช่น บทความปริทัศน์ (Review Article) บทความทางเทคนิค (Technical Article) บทความเชิงปฏิบัติในวิชาชีพ (Professional Practice) เป็นต้น หรือในบางครั้งจะเป็นบทความรับเชิญ (Invited Article) หรือบทความอื่นๆ (Other Article) ด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการ โดยทุกบทความควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นบทความวิจัยหรือบทความทางวิชาการ ในลักษณะที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ
- เป็นบทความที่ไม่เคยได้รับการตีพิมพ์มาก่อนทั้งภายในประเทศหรือต่างประเทศ
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือตัดทอนมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ท่าน ในระบบ Double-blind Review โดยผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนบทความจะถูกปกปิดชื่อระหว่างกระบวนการพิจารณาบทความ
- กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบบทความ ถ้าไม่ผ่านการพิจารณา จะส่งกลับไปแก้ไข ถ้าผ่านจะเข้าสู่การพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เมื่อผลการประเมินผ่านหรือไม่ผ่านหรือมีการแก้ไขจะแจ้งผลให้ผู้เขียนทราบ เมื่อผู้เขียนดำเนินการแก้ไขบทความตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ และ/หรือ กองบรรณาธิการแล้ว จากนั้นจึงจะแจ้งให้ทราบกำหนดการตีพิมพ์บทความนั้นต่อไป
- กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์และอาจจะส่งเรื่องคืนมายังผู้เขียนให้เพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี
- การยอมรับการตีพิมพ์หรือปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเป็นสิทธิของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการจะไม่รับผิดชอบในเนื้อหาหรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง ความถูกต้องของเนื้อหา การใช้ภาษาและรูปแบบการเขียนถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียน

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

ต้นฉบับบทความส่งมาที่ E-Mail: engkasemjournal@kbu.ac.th หรือ ผู้เขียนสามารถส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>
หากมีปัญหาในการส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System โปรดติดต่อกองบรรณาธิการ ที่ 02-320-2777 ต่อ 1211

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ ผู้เขียนบทความนั้นต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

กำหนดตีพิมพ์

ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

คณะที่ปรึกษา:

ดร.วัลลภ สุวรรณดี	อธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.สุวัฒน์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.เสนีย์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.อริศ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายทรัพยากรบุคคล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ประสาร มาลากุล ณ อยุธยา	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.อิงอร ตันพันธ์	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

บรรณาธิการ:

รศ.ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------------	--

รองบรรณาธิการ:

ผศ.ดร.ภาวัต ไชยชาตนาทิก	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
-------------------------	---

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดาร์	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและ นวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เฉชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิรณัฐ เสี่ยมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจีย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสาพันธ์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ	อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
ผศ.อนุชิต เจริญ	อ.ธีรยุทธ จันท์แจ่ม
ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม	ผศ.วรกร เกิดทรัพย์
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร	คุณรุ่งนภาพร ภูธรราช
------------------	----------------------

บทบรรณาธิการ

“วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต” เป็นวารสารที่ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องกว่า 12 ปี และปัจจุบันได้ถูกจัดให้เป็น “วารสารกลุ่มที่ 1” ได้รับรองคุณภาพของวารสาร “ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2565 ไปจนถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2567” โดยมีกำหนดการเผยแพร่ทุก 4 เดือน (3 ฉบับต่อปี) นอกจากนี้ กองบรรณาธิการยังคงมุ่งมั่นในการปรับปรุงการดำเนินงาน ตลอดจนพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของวารสารอย่างต่อเนื่อง โดยในกระบวนการพิจารณาบทความทางวารสารฯ ยังได้กำหนดให้มีผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความภายนอกจากหลากหลายสถาบันจำนวนไม่น้อยกว่า 3 ท่าน เพื่อให้สอดคล้องกับประกาศ ก.พ.อ. วันที่ 26 เมษายน 2564 เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2564 ซึ่งทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ รู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของประเทศไทย และมีความก้าวหน้าและเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง

หนึ่งในวาระขึ้นปีใหม่พุทธศักราช 2566 ที่กำลังจะมาถึงนี้ กองบรรณาธิการใคร่ขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายในสากลโลก โปรดดลบันดาลให้นักวิชาการ นักวิจัย และผู้เขียน รวมถึงคณะผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความทุกท่านมีสุขภาพพลานามัยแข็งแรง ปลอดภัย สามารถดำเนินกิจกรรมด้านการวิจัยและสร้างสรรค์ผลงานวิจัยและวิชาการเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศได้อย่างต่อเนื่อง และสัมฤทธิ์ผลในสิ่งอันพึงปรารถนาทุกประการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ

บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและพัฒนาดอกสว่านในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยเครื่องจักร
อัตโนมัติ: กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์

DESIGN AND DEVELOPMENT OF DRILL PIT IN DRILLING OF ALUMINIUM
PART WITH CNC MILLING: A CASE STUDY OF MOTORCYCLE PART
PRODUCTION COMPANY

1

กิตติ วิโรจธนาภาพิศาล จิรวัฒน์ วรวิชัย อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี และ ศิวศิษฐ์ ปิจมิตร

การศึกษาปริมาตรและมวลของอากาศที่ส่งผลต่อระบบหมุนเวียนสารทำงานใน
แนวราบ

A STUDY OF VOLUME AND AIR MASS THAT AFFECT THE WORKING FLUID
CIRCULATING SYSTEM IN A HORIZONTAL PLANE

22

พิชาญ มาศวรรณ จิรวัฒน์ สิตรานนท์ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ และ กนกพร เกษมมัน

APPLYING A HYBRID MACHINE LEARNING APPROACH TO THE
PRODUCTION FLOOR: A CASE OF PAPER COUNTING SYSTEM IN PRINTING
INDUSTRY

39

Paronkasom Indradat and Anirut Kantasa-ard

SIGNAL CONTROL OF A ROUNDABOUT WITH LIGHT RAILWAY
TRANSPORTATION OPERATION (CASE STUDY: PHUKET LIGHT RAILWAY
TRANSIT, SURIN CLOCK TOWER)

62

Phattarin Yongcharoen and Siradol Siridhara

การประยุกต์ใช้สัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์สำหรับการสร้างแบบจำลองระบบไม่เชิงเส้น
THE APPLICATION OF GAUSSIAN WHITE NOISE FOR NONLINEAR SYSTEM
MODELING

85

ปริญญ์ บุญมาเลิศ และ ธนุ ญญา

การสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลสจากต้นธูปฤาษี

SYNTHESIS OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE FROM *TYPHA ANGUSTIFOLIA* L.

95

มาหามะสุโฮมี้ มะแซ สุรพล ชูสวัสดิ์ วรวิทย์ ศรีวิทยากุล และ พีรวัส คงสง

บทความปริทัศน์ (Review Article)

ELEVATED CYCLE PATH: IS IT SUITABLE FOR BANGKOK, THAILAND?

110

Bhawat Chaichannawatik and Usanee Raha

การออกแบบและพัฒนาดอกสว่านในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม
ด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ: กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์

DESIGN AND DEVELOPMENT OF DRILL PIT IN DRILLING OF
ALUMINIUM PART WITH CNC MILLING: A CASE STUDY OF
MOTORCYCLE PART PRODUCTION COMPANY

กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา¹ จิรวัดน์ วรวิชัย² อุทกฤษฎ์ ธนทรัพย์ทวี³ และ ศิวศิษฐ์ ปิจมิตร⁴
^{1,2,3,4}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก, 41 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000,
¹kibuya@gmail.com, ²chirawat-w@hotmail.com, ³t.ukrit@edu.rmutl.ac.th,
⁴siwasit.pitjamit@rmutl.ac.th

Kitti Wirotrattanaphaphisan¹, Chirawat Woarawichai², Ukrit Thanasuptawee³
and Siwasit Pitjamit⁴
^{1,2,3,4}Lecturer, Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
Tak, 41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang, Tak 63000, Thailand,
¹kibuya@gmail.com, ²chirawat-w@hotmail.com, ³t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
⁴siwasit.pitjamit@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการออกแบบและพัฒนาดอกสว่านในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม
ผลิตภัณฑ์ที่ยืดไฟหน้า ด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ โดยการใช้แผนผังแสดงเหตุและผล ช่วยในการ
วิเคราะห์ปัญหาของการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียมใช้เวลานาน พบว่าสาเหตุย่อยเกิดจากต้องใช้ดอก
กลบคมชิ้นงานแยกจากดอกสว่านเจาะชิ้นงานมีผลทำให้ผลผลิตต่ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุง
วิธีการทำงานใหม่ โดยทำการรวมดอกสว่านเจาะชิ้นงานและดอกกลบคมชิ้นงานเข้าไว้ด้วยกัน
เพื่อที่จะลดเวลาในการสับเปลี่ยนดอกสว่าน ในการดำเนินงานใช้วิธีการออกแบบการทดลอง
แฟคทอเรียล เติมรูปแบบทั่วไป เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเจาะรูชิ้นงานด้วยดอกสว่านที่ได้
พัฒนาใหม่ ผลจากการทดลองพบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับดอกสว่านแบบใหม่ที่มีความเร็วรอบ
3,000 รอบ/นาที และอัตราป้อนอยู่ที่ 250 มิลลิเมตร/นาที จะได้ค่าความหยาบผิวที่ดีกว่าดอกสว่าน
แบบเดิม โดยค่าความหยาบผิวแบบเดิมมีค่าเฉลี่ย Rz 8.484 μm และค่าความหยาบผิวแบบใหม่มี

ค่าเฉลี่ย Rz 5.103 μm ทำให้สามารถเพิ่มผลผลิตชิ้นงานจาก 282 ชิ้นต่อวัน เป็น 297 ชิ้นต่อวัน เพิ่มขึ้น 15 ชิ้นต่อวัน

คำสำคัญ: ความเร็วรอบ, อัตราป้อน, เจาะรู, ความหยาบผิว

ABSTRACT

This research work aimed to increase productivity by designing and developing drills for drilling holes in Holder Head Light with CNC milling machines. Using cause and effect diagram assisted in analyzing problem of hole punching. The minor was caused by need to use workpiece chamfer separately from drill pit, resulting in low productivity. Therefore, the researcher revised the work method. The workpiece drill pit and workpiece chamfer were combined to reduce time to change drill pit. The experiment was done, statistical method was used, a general full factorial was designed to find the optimum conditions for drilling workpieces with new developed drill pit. Result from experiment was found that the optimum factor for new drill at a speed of 3,000 rev/mm and a feed rate of 250 mm/min and new drilling pit, it will get better surface roughness values than original drill pit. The original surface roughness was improved from at the averaged of Rz 8.484 μm to Rz 5.103 μm . It was possible to increase productivity of workpieces from 282 pieces per day to 297 pieces per day, and increase of 15 pieces per day.

KEYWORDS: Drilling Speed, Feed Rate, Drilling Hole, Surface Roughness

1. บทนำ

การผลิตชิ้นส่วนยานพาหนะจากวัสดุอลูมิเนียม (Aluminum) เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญทางระบบเศรษฐกิจของประเทศ เพราะความต้องการของผู้บริโภคทางด้านยานพาหนะยังมีความต้องการสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อดีของการผลิตชิ้นส่วนด้วยวัสดุอลูมิเนียมเนื่องจากสามารถกำหนดรูปทรงที่มีความสลับซับซ้อนได้มีความเที่ยงตรงทางด้านรูปร่างสูงและมีความแข็งแรงสูง กระบวนการฉีดขึ้นรูปอลูมิเนียมด้วยเครื่องจักรแรงดันสูง ได้มีการพัฒนาจากกระบวนการหล่อโลหะของไทยสมัยก่อนมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เทคโนโลยีที่มีความทันสมัยมีประสิทธิภาพ การผลิตจึงมีความสะดวกรวดเร็วได้ปริมาณมากใช้เวลาน้อยลงชิ้นงานได้ตรงตามมาตรฐาน

บริษัทการศึกษา เป็นบริษัทผู้ผลิตชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยใช้เทคโนโลยีการหล่อฉีด (Die Casting) ในการขึ้นรูปชิ้นงานตั้งแต่กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ กระบวนการ

ขึ้นรูป กระบวนการตกแต่งชิ้นงาน กระบวนการตัดแต่งขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล และกระบวนการพ่นสีชิ้นงาน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมา ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานพาหนะของไทยมีการมุ่งพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีความหลากหลาย ตลอดจนมีคุณภาพและมาตรฐานการผลิตที่เป็นมาตรฐานระดับโลกที่ให้การยอมรับทำให้สามารถส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศต่าง ๆ ได้เพิ่มขึ้น ส่วนของงานการตัดแต่งขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องมือกล คือส่วนงานที่สำคัญในกระบวนการผลิต เนื่องจากการเพิ่มมูลค่าให้แก่ชิ้นงาน ทั้งนี้ในกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ การลดต้นทุนการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน เพื่อให้เห็นถึงความสำคัญจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่าในกระบวนการผลิตชิ้นงานอลูมิเนียม ผลิตภัณฑ์ที่ยึดไฟหน้า (Holder Head Light) มียอดสั่งการผลิตเป็นจำนวนมากประมาณ 10,000 ชิ้นต่อเดือน มีผลทำให้ผลิตไม่ทันกับความต้องการของลูกค้า โดยเฉพาะในส่วนของการเจาะรูชิ้นงาน ที่แผนกการตัดแต่งขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล พบปัญหาในส่วนของการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียมใช้เวลานาน

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นมูลเหตุจูงใจให้ทางคณะผู้วิจัยดำเนินการศึกษาออกแบบและพัฒนาดอกสว่านในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติเพื่อลดเวลาในกระบวนการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการ ได้แก่ แผนผังแสดงเหตุและผล แผนภูมิกระบวนการไหล หลักการ ECRS มาใช้วิเคราะห์แก้ปัญหา และใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับการเจาะรูชิ้นงานให้ได้ค่าความหยาบผิวที่เหมาะสม

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาดอกสว่านในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม
- 2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม
- 2.3 เพื่อลดเวลาในกระบวนการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม

3. ขอบเขตของการวิจัย

- 3.1 ทดลองการเจาะรูชิ้นงานที่เครื่อง CNC Milling ยี่ห้อ Brother TC-31 AN
- 3.2 ทำการตรวจชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว Surface Roughness Tester รุ่น SV-3000 CNC
- 3.3 ปัจจัยของการทดลองในการเจาะรูชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC Milling ยี่ห้อ Brother TC-31 AN มีดังนี้

3.3.1 ความเร็วรอบ (Drilling Speed) ที่ใช้ในการเจาะรูชิ้นงาน โดยกำหนดจากค่ามาตรฐานเดิมอยู่ในช่วง 3,000 $\pm$ 200 รอบ/นาที (2,800 รอบ/นาที, 3,000 รอบ/นาที และ 3,200 รอบ/นาที)

3.3.2 อัตราป้อน (Feed Rate) โดยกำหนดจากค่ามาตรฐานเดิมอยู่ในช่วง 200 $\pm$ 50 รอบ/นาที (150 มิลลิเมตร/นาที, 200 มิลลิเมตร/นาที และ 250 มิลลิเมตร/นาที)

3.3.3 รูปแบบดอกสว่าน (Drilling Type) (แบบเดิม และแบบใหม่)

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานเพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา ดังนี้

4.1 แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart)

แผนภูมิกระบวนการไหล เป็นแผนภูมิที่ใช้วิเคราะห์ขั้นตอนการไหล (Flow) ของคน วัสดุ และเครื่องจักร โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์มาตรฐาน 5 ตัว [1] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ที่ใช้บันทึกและจำกัดความของแผนภูมิกระบวนการไหล

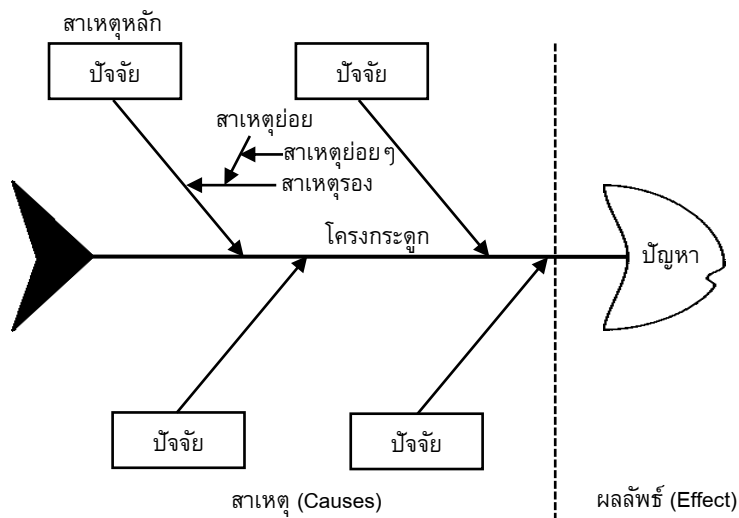
สัญลักษณ์	ชื่อเรียก	คำจำกัดความโดยย่อ
	การปฏิบัติงาน (Operation)	- การเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมี หรือฟิสิกส์ของวัตถุ - การประกอบชิ้นส่วน หรือการถอดส่วนประกอบออก
	การตรวจสอบ (Inspection)	- ตรวจสอบคุณลักษณะของวัตถุ - ตรวจสอบคุณภาพหรือปริมาณ
	การเคลื่อนย้าย (Transportation)	- การเคลื่อนวัตถุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง - พนักงานกำลังเดิน
	การรอคอย (Delay)	- การเก็บวัสดุชั่วคราวระหว่างการปฏิบัติงาน - การคอยเพื่องานขั้นต่อไปเริ่มต้น
	การเก็บ (Storage)	การเก็บวัสดุ ชิ้นส่วน หรือผลิตภัณฑ์ไว้ในสถานที่ถาวรซึ่งต้องอาศัยคำสั่งในการเคลื่อนย้าย

4.2 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

แผนผังแสดงเหตุและผล หรือแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของสาเหตุ (Cause) ที่ทำให้เกิดผล (Effect) โครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูกซึ่ง

รวบรวมปัจจัยอันเป็นสาเหตุของปัญหา และส่วนหัวปลาที่เป็นที่สรุปของสาเหตุที่กลายเป็นปัญหา [2] ดังรูปที่ 1

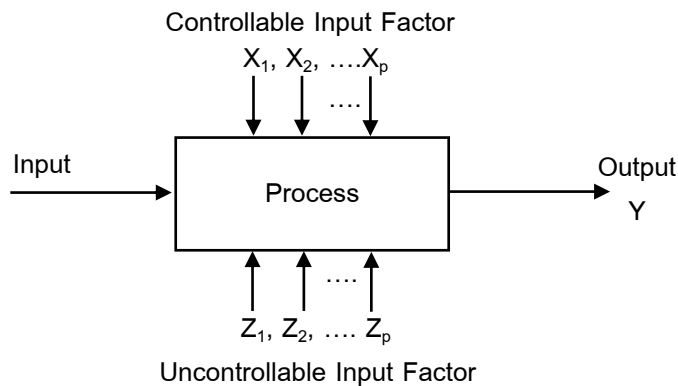
ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการระดมสมอง (Brainstorming) เพื่อทำการค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด ในขั้นตอนการระดมสมองนั้นจะให้ผู้ที่มีส่วนร่วมในกระบวนการผลิตเสนอความคิดเห็นโดยที่ผู้ร่วมแสดงความคิดเห็นนั้นจะเป็นหัวหน้างาน และผู้ปฏิบัติงานที่มีส่วนเกี่ยวข้อง



รูปที่ 1 ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผล

4.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

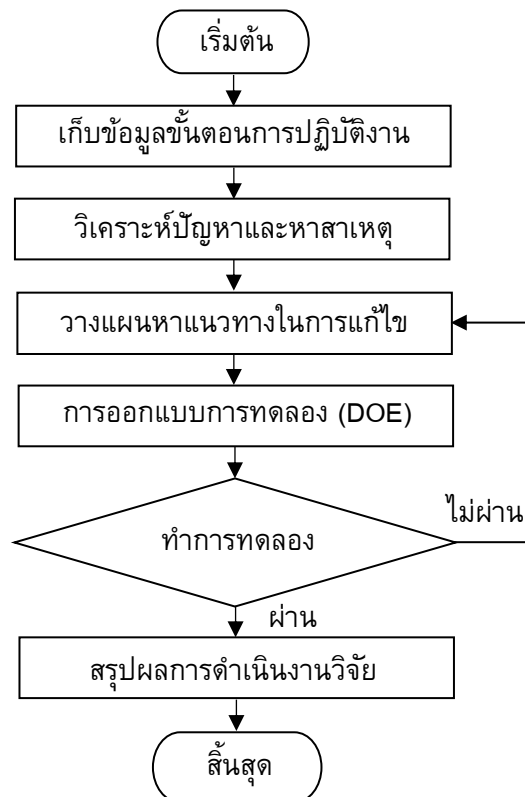
การออกแบบการทดลอง [3] คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนปัจจัย (Factor) นำเข้าของกระบวนการ (Input) และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยนำออก (Output) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าเป็นผลตอบหรือผลลัพธ์ที่ได้ (Response: Y) โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ควบคุมได้ กำหนดให้เป็นตัวแปร $X_1, X_2, \dots, X_p$ เป็นตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ กำหนดให้เป็นตัวแปร $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ บางครั้งเรียกว่าปัจจัยรบกวน (Uncontrollable or Noise) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการทดลอง

5. วิธีการดำเนินงาน

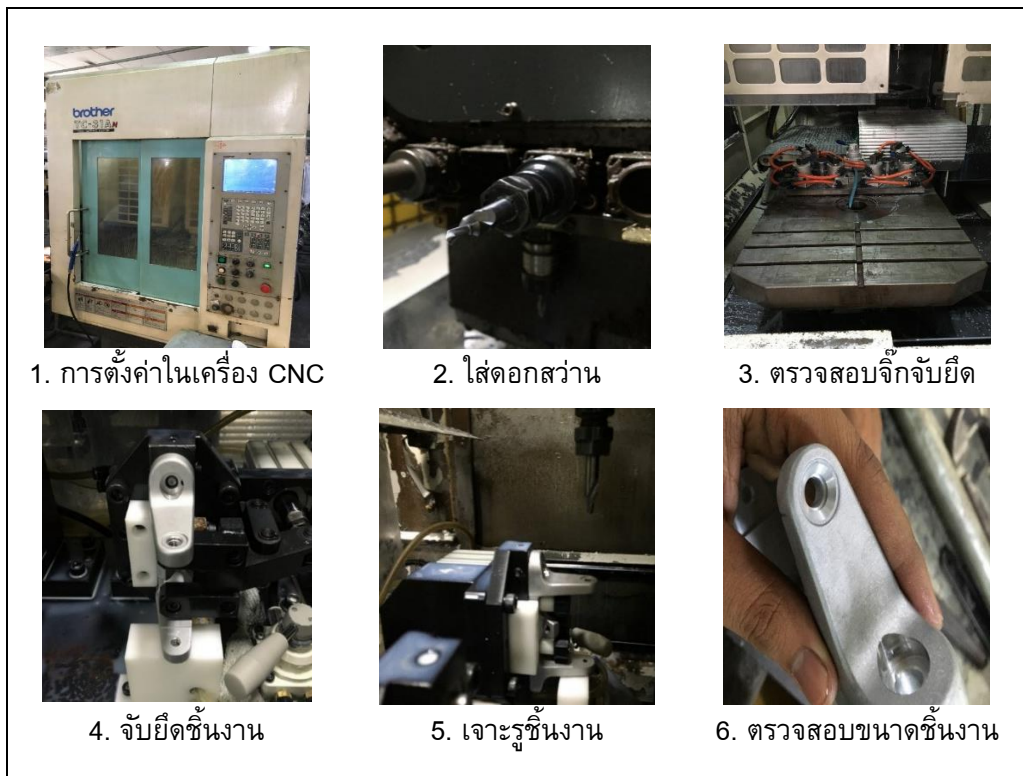
วิธีการดำเนินงานในครั้งนี้ มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

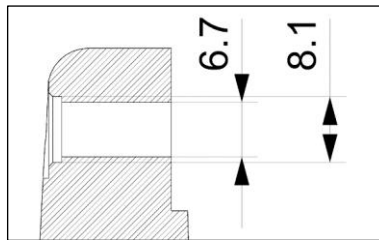
5.1 เก็บข้อมูลขั้นตอนการปฏิบัติงาน

คณะผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลในกระบวนการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม ผลิตภัณฑ์ที่ยึดไฟหน้า (Holder Head Light) ของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยมีขั้นตอนการผลิตตั้งแต่ การตั้งค่าในเครื่อง CNC Milling ใส่ดอกสว่านลงบนสายพานลำเลียงเครื่องมือตัด ตรวจสอบจิ๊กจับยึด การจับยึด ชิ้นงานจะใช้ระบบนิวเมติกส์เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน เจาะรูชิ้นงาน และตรวจสอบขนาด ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม

ในขั้นตอนการดำเนินงานโดยการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม ซึ่งรูเจาะจะมีขนาดที่ 6.7 มิลลิเมตร และ 8.1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 ชิ้นงานสามารถเจาะได้เลยโดยไม่ต้องเจาะรู นำเนื่องจากชิ้นงานมีรูนำอยู่แล้ว เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานมีด้วยกัน 2 เครื่อง คือเครื่อง CNC Milling ยี่ห้อ Brother TC-31 AN กับเครื่องวัดความหยาบผิว Surface Roughness Tester รุ่น SV-3000 CNC



รูปที่ 5 ขนาดของรูเจาะ

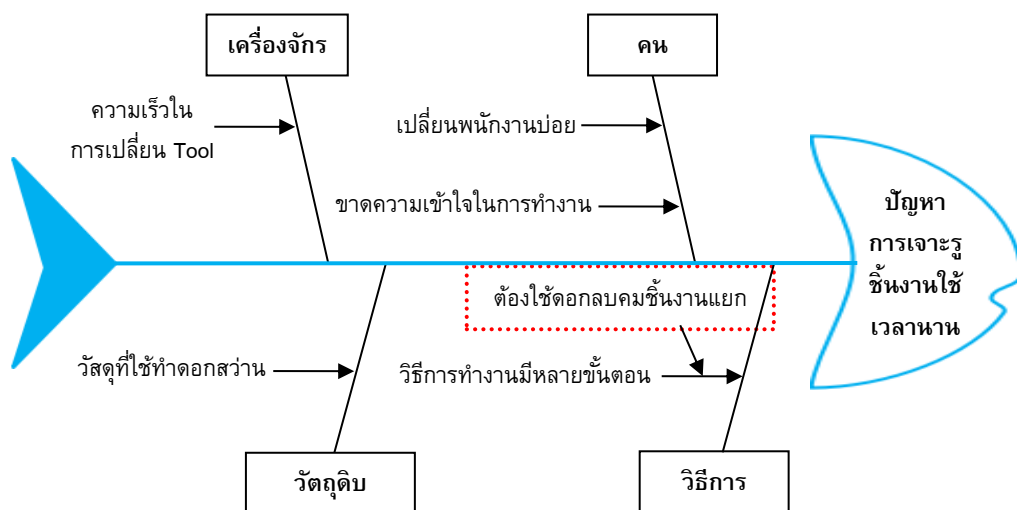
5.2 วิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุ

เมื่อดำเนินการเก็บข้อมูลขั้นตอนการปฏิบัติงานของการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม ผลิตภัณฑ์ที่ยึดไฟหน้า (Holder Head Light) จากนั้นทำการวิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุดังนี้

5.2.1 วิเคราะห์ปัญหาโดยแผนผังแสดงเหตุและผล

จากการวิเคราะห์ปัญหาและเวลาสูญเสียในขั้นตอนการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม โดยแผนผังแสดงเหตุและผล ซึ่งพบว่าปัญหาเกิดขึ้นจากสาเหตุ 4 ประการ คือ คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ ที่ทำให้เกิดปัญหาการเจาะรูชิ้นงานใช้เวลานาน ดังแสดงในรูปที่ 6

จากการศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานและวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังแสดงเหตุและผลเบื้องต้น ได้ระดมสมองโดยเลือกแก้ปัญหาที่วิธีการ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่สามารถนำมาแก้ไขปัญหาดได้โดยสาเหตุรองคือ วิธีการทำงานมีหลายขั้นตอน และมีสาเหตุย่อยเกิดจากต้องใช้ดอกกลบคมชิ้นงานแยก (Chamfer) ออกจากดอกเจาะชิ้นงาน



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล

5.2.2 วิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิกระบวนการไหล

จากการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานการแมชชีน (Machine) ชิ้นงานอลูมิเนียม ผลิตภัณฑ์ที่ยึดไฟหน้า (Holder Head Light) พบว่ามีขั้นตอนการทำงานหลายขั้นตอน โดยเฉพาะขั้นตอนที่ต้องใช้ดอกกลบคมชิ้นงานแยกกับดอกเจาะชิ้นงานทำให้เสียเวลาในการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 7

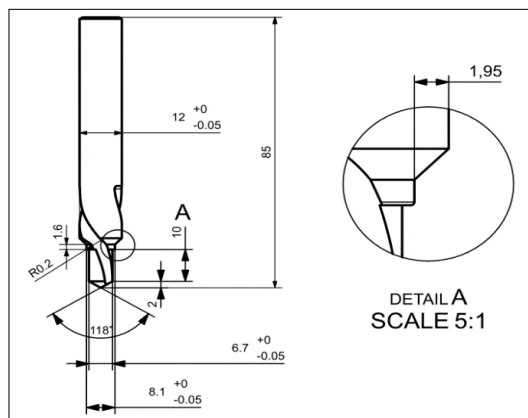
แผนภูมิกระบวนการไหล		☐ คน	☐ วัสดุ	☒ เครื่องจักร			
แผนภูมิหมายเลข : 01	สรุปผล						
	สัญลักษณ์	ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง			
กรรมวิธี : การแมชชีนชิ้นงาน อลูมิเนียม ผลิตภัณฑ์ที่ยึดไฟหน้า (Holder Head Light)	การปฏิบัติงาน ○	6					
	การเคลื่อนย้าย ➡	-					
	การรอคอย □	-					
☒ วิธีการเดิม ☐ วิธีการใหม่	การตรวจสอบ □	1					
ตำแหน่งที่ตั้ง : Category 1	การเก็บพัก ▽	-					
ผู้บันทึก : นายรัฐพงศ์ ไชยมุติ	เวลา (วินาที)	192					
รายการ	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
		○	➡	□	▽		
1. เจาะรู (Drilling) ขนาด 8.1 มิลลิเมตร	14	●					
2. เจาะรู (Drilling) ขนาด 15.0 มิลลิเมตร	27	●					
3. กัดชิ้นงานด้านข้าง (Milling Side) 10.0 มิลลิเมตร	84	●					
4. เจาะรู (Drilling) ขนาด 6.75 มิลลิเมตร	28	●					
5. ลบคมรูชิ้นงาน (Chamfer)	10	●					
6. ทำเกลียว (TAP) M8 x 1.25	17	●					
7. ตรวจสอบขนาดชิ้นงาน	12				●		

รูปที่ 7 แผนภูมิกระบวนการไหลการแมชชีนชิ้นงานอลูมิเนียม (วิธีการเดิม)

5.3 วางแผนหาแนวทางในการแก้ไข

ทำการปรับปรุงและพัฒนาลดขั้นตอนในการทำงาน โดยใช้หลักการ ECRS ประกอบไปด้วย การกำจัด (Eliminate) การรวมกัน (Combine) การจัดใหม่ (Rearrange) และการทำให้ง่าย (Simplify) [4-5] จะใช้ C (Combine) พิจารณาว่าสามารถรวมขั้นตอนการทำงานให้ลดลงได้หรือไม่ โดยทำการรวมดอกสว่านเจาะและดอกกลบคมชิ้นงานเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อที่จะลดเวลาในการสับเปลี่ยนดอกสว่านและอุปกรณ์นั้นจะเน้นการใช้งานที่มีความแม่นยำของขนาดชิ้นงานหลังทำการ

ทดลอง และที่สำคัญจะต้องคำนึงถึงความคงทนของอุปกรณ์และความคุ้มค่าของดอกสว่านจึงใช้เป็นดอกสว่านคาร์ไบด์เพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยการออกแบบเพื่อใช้เจาะรูชิ้นงานที่เป็นวัสดุอลูมิเนียม ขนาดรูที่เจาะ 6.7 มิลลิเมตรและ 8.1 มิลลิเมตร จะใช้มุมคมตัดที่ 118 องศา และมุมร่องคายเศษ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบดอกสว่านแบบใหม่

5.4 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1) ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล เต็มรูปแบบทั่วไป (General Full Factorial Design) [6-7] สำหรับออกแบบการทดลองเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม โดยประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ มีระดับปัจจัย 3 ระดับ อัตราป้อน มีระดับปัจจัย 3 ระดับ [8-9] และรูปแบบดอกสว่าน มีระดับปัจจัย 2 ระดับ มีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ดังนั้นจึงมีการทดลองทั้งหมด $3 \times 3 \times 2 \times 2 = 36$ การทดลอง โดยการทดลองเป็นแบบสุ่ม ดังตารางที่ 2 และ 2) การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยابผิวที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อความหยابผิว

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย			หน่วย
		-1	0	1	
1. ความเร็วรอบ	S	2,800	3,000	3,200	รอบ/นาที
2. อัตราป้อน	F	150	200	250	มิลลิเมตร/นาที
3. รูปแบบดอกสว่าน	T	Original	-	New	รูปแบบ

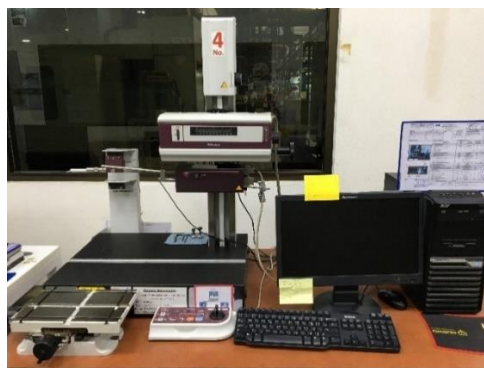
5.5 ทำการทดลอง

เริ่มทำการทดลองตามแบบการทดลองที่ออกแบบไว้ในข้างต้น และเริ่มจับเวลาในการเจาะรูทั้งดอกสว่านแบบเก่าและดอกสว่านแบบใหม่เพื่อนำเวลาไปเปรียบเทียบกัน ทำการทดลองโดยนำไปทดสอบกับเครื่อง CNC Milling ก่อนจะทำการทดลองต้องมีการประกอบชิ้นส่วนดอกสว่านเข้ากับชุดหัวจับ ซึ่งมีการประกอบดอกสว่านที่ออกแบบใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ชุดจับยึดดอกสว่าน

ใช้เครื่องวัดความหยาบผิว Surface Roughness Tester รุ่น SV-3000 CNC ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยทำการวัดความหยาบผิวชิ้นงานในส่วนที่ทำการทดลองเจาะรูชิ้นงาน ซึ่งในการวิจัยทำการวัดค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวแบบสิบจุด (Ten-Point Mean Roughness: Rz) [10] มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 10 เครื่องวัดความหยาบผิว Surface Roughness Tester

จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการทดลองเสร็จแล้วมาผ่านเครื่องบริเวณรูที่เจาะเพื่อนำไปทำการวัดค่าความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ทำการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

6. ผลการทดลอง

ผลจากการออกแบบและพัฒนาดอกสว่านในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม (วิธีการใหม่) โดยสามารถลดขั้นตอนการทำงานและลดเวลาได้ดังแสดงในรูปที่ 12 และผลจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล เติมรูปแบบทั่วไป ที่มีการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ ได้ผลดังตารางที่ 3 ดังนี้

แผนภูมิกระบวนการไหล		☐ คน	☐ วัสดุ	☒ เครื่องจักร			
แผนภูมิหมายเลข : 02	สรุปผล						
	สัญลักษณ์	ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง			
กรรมวิธี : การแมชชีนชิ้นงานอลูมิเนียม ผลิตภัณฑ์ที่ยึดไฟหน้า (Holder Head Light)	การปฏิบัติงาน ○	6	5	1			
	การเคลื่อนย้าย ➡	-	-	-			
	การรอคอย □	-	-	-			
☐ วิธีการเดิม ☒ วิธีการใหม่	การตรวจสอบ □	1	1	-			
ตำแหน่งที่ตั้ง : Category 1	การเก็บพัก ▽	-	-	-			
ผู้บันทึก : นายรัฐพงศ์ ไชยมุติ	เวลา (วินาที)	192	182	10			
รายการ	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
		○	➡	□	▽		
1. เจาะรู (Drilling) ขนาด 8.1 มิลลิเมตร	14	●					
2. เจาะรู (Drilling) ขนาด 15.0 มิลลิเมตร	27	●					
3. กัดชิ้นงานด้านข้าง (Milling Side) 10.0 มิลลิเมตร	84	●					
4. เจาะรู (Drilling) ขนาด 6.75 มิลลิเมตร พร้อมลบคมรูชิ้นงาน (Chamfer)	28	●					
5. ทำเกลียว (TAP) M8 x 1.25	17	●					
6. ตรวจสอบขนาดชิ้นงาน	12				●		

รูปที่ 12 แผนภูมิกระบวนการไหลการแมชชีนชิ้นงานอลูมิเนียม (วิธีการใหม่)

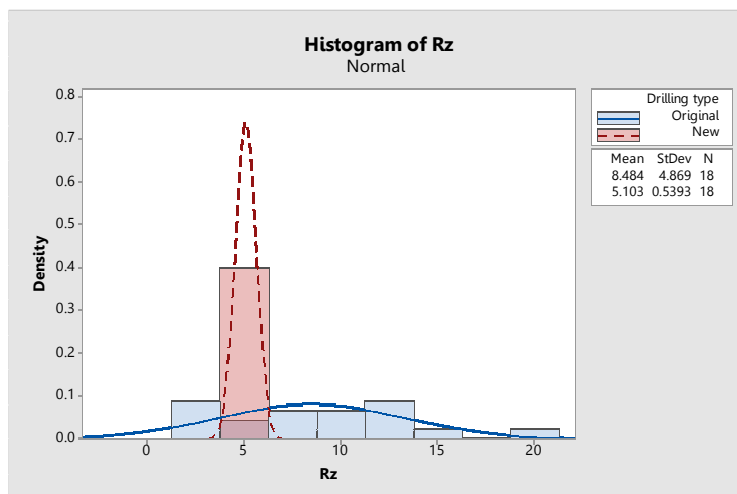
ตารางที่ 3 ผลการทดลองแฟคทอเรียล เติมรูปแบบทั่วไป ที่มีการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ความเร็วรอบ	อัตราป้อน	รูปแบบดอกสว่าน	Rz (µm)
1	1	1	1	2,800	150	Original	1.804
2	2	1	1	2,800	150	New	4.967
3	3	1	1	2,800	200	Original	4.797
4	4	1	1	2,800	200	New	4.638
5	5	1	1	2,800	250	Original	11.594
6	6	1	1	2,800	250	New	4.711
7	7	1	1	3,000	150	Original	2.88
8	8	1	1	3,000	150	New	4.718
9	9	1	1	3,000	200	Original	6.71
10	10	1	1	3,000	200	New	4.422
11	11	1	1	3,000	250	Original	12.523
12	12	1	1	3,000	250	New	4.529
13	13	1	1	3,200	150	Original	4.763
14	14	1	1	3,200	150	New	5.794
15	15	1	1	3,200	200	Original	13.231
16	16	1	1	3,200	200	New	5.986
17	17	1	1	3,200	250	Original	8.824
18	18	1	1	3,200	250	New	5.983
19	19	1	1	2,800	150	Original	2.583
20	20	1	1	2,800	150	New	4.866
21	21	1	1	2,800	200	Original	6.286
22	22	1	1	2,800	200	New	5.511
23	23	1	1	2,800	250	Original	19.07
24	24	1	1	2,800	250	New	5.921
25	25	1	1	3,000	150	Original	2.764
26	26	1	1	3,000	150	New	5.008
27	27	1	1	3,000	200	Original	7.692

ตารางที่ 3 ผลการทดลองแฟคทอเรียล เติมรูปแบบทั่วไป ที่มีการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ความเร็ว รอบ	อัตรา ป้อน	รูปแบบ ดอกสว่าน	Rz (μm)
28	28	1	1	3,000	200	New	4.932
29	29	1	1	3,000	250	Original	12.374
30	30	1	1	3,000	250	New	4.534
31	31	1	1	3,200	150	Original	9.108
32	32	1	1	3,200	150	New	5.088
33	33	1	1	3,200	200	Original	10.733
34	34	1	1	3,200	200	New	4.719
35	35	1	1	3,200	250	Original	14.977
36	36	1	1	3,200	250	New	5.53

ผลจากการวัดค่าความหยาบผิวของดอกสว่านแบบเดิม (Original) ให้ค่าที่ไม่หนึ่งจะมีค่าการกระจายตัวของข้อมูลที่กว้างกว่าดอกสว่านแบบใหม่ (New) ซึ่งค่าความหยาบผิวดอกสว่านแบบใหม่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำจากการทำซ้ำจะเป็นค่าที่เกาะกลุ่มกัน โดยค่าความหยาบผิวดอกสว่านแบบเดิม มีค่าเฉลี่ย Rz 8.484 μm และค่าความหยาบผิวดอกสว่านแบบใหม่ มีค่าเฉลี่ย Rz 5.103 μm ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งค่าความหยาบของผิวตามมาตรฐานของบริษัทอยู่ในช่วง Rz 7.500 μm – 8.500 μm



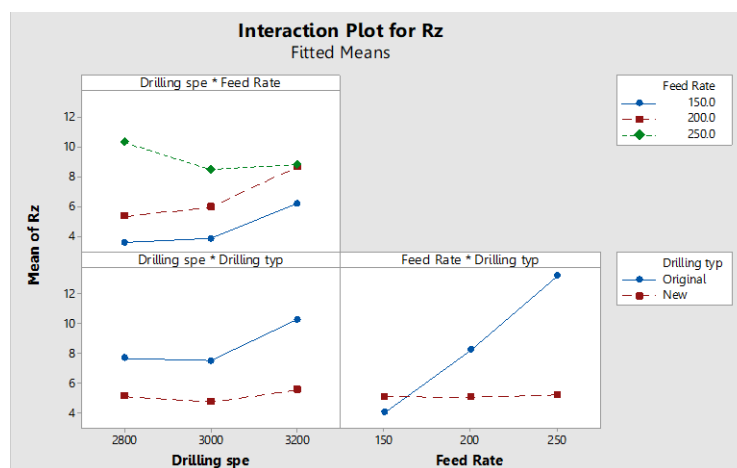
รูปที่ 13 แสดงกราฟความหยาบผิวจากการทดลอง

6.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect)

จากรูปที่ 14 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก ที่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว คือ อัตราป้อน (Feed Rate) และชนิดของดอกสว่าน (Drilling Type) ซึ่งมีแนวโน้มว่า เมื่อใช้อัตราป้อน 150 มิลลิเมตร/นาที จะทำให้ค่าความหยาบผิวดีที่สุด และเมื่อใช้อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิวที่สูงขึ้น โดยชนิดของดอกสว่านแบบใหม่ (New) จะให้ค่าที่ดีกว่าดอกสว่านแบบเก่า (Original) เนื่องจากขนาดของก้านดอกสว่านที่มีความใหญ่ขึ้นซึ่งช่วยลดความสั่นสะเทือนได้ในเวลาเจาะด้วยอัตราป้อนที่สูง เมื่อเทียบกับดอกสว่านแบบเก่า

6.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม (Interaction Effect)

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบ (Drilling Speed) และอัตราป้อน (Feed Rate) ค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะสูงขึ้นตามความเร็วรอบ พบว่าเมื่อใช้อัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที เริ่มจากความเร็วรอบที่ 2,800 รอบ/นาที และเมื่อใช้อัตราป้อนที่ 200 มิลลิเมตร/นาที จะมีทิศทางเดียวกับอัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที เช่นกัน แต่จะให้ค่าความหยาบผิวที่สูงขึ้นอีกและเมื่อใช้อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที จะมีทิศทางที่สวนกันกับ 2 ปัจจัยที่ผ่านมา เมื่อความเร็วรอบยิ่งสูงขึ้นจะได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงกราฟของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้น และข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงได้นำข้อมูลในตารางที่ 3 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) [11] โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha = 0.05$) โดยใช้โปรแกรม Minitab 18 มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลอง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	447.078	26.299	7.42	0.000
Linear	5	257.418	51.484	14.53	0.000
Drilling speed	2	22.381	11.190	3.16	0.067
Feed Rate	2	132.164	66.082	18.65	0.000
Drilling type	1	102.874	102.874	29.03	0.000
2-Way Interactions	8	160.785	20.098	5.67	0.001
Drilling speed*Feed Rate	4	27.433	6.858	1.94	0.148
Drilling speed*Drilling type	2	8.577	4.289	1.21	0.321
Feed Rate*Drilling type	2	124.775	62.387	17.60	0.000
3-Way Interactions	4	28.875	7.219	2.04	0.132
Drilling Speed*FeedRate*Drilling type	4	28.875	7.219	2.04	0.132
Error	18	63.791	3.544		
Total	35	510.869			

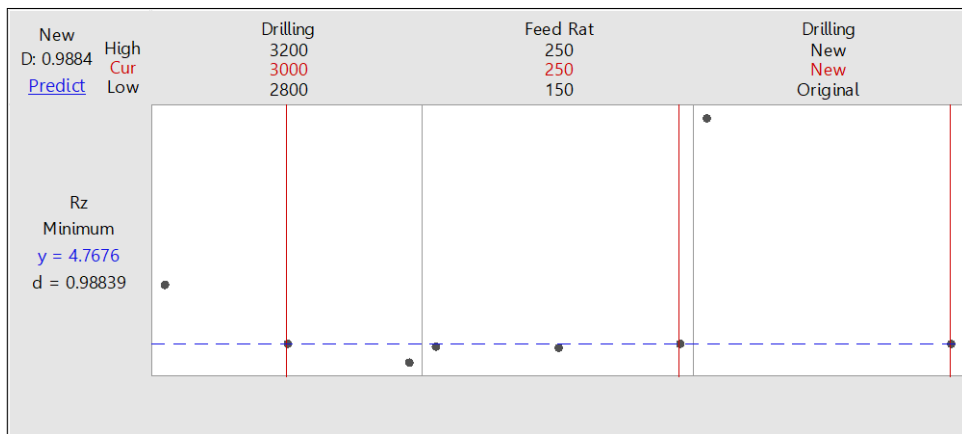
จากตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการทดสอบความหยาบผิวของชิ้นงาน พบว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) [12] คือ อัตราป้อน และชนิดของออกสว่าน โดยมีค่า P-Value ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงมีอิทธิพลต่อค่าความเรียบผิว เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย พบว่ามี 2 ปัจจัยจากทั้งหมด 3 ปัจจัยมีผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองมีค่าความเชื่อมั่น 75.72% ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระดับความเชื่อมั่นของค่าความหยาบผิว

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
1.88254	87.51%	75.72%	50.05%

6.3 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

จากการทดลองใช้คำสั่ง Response Optimizer [13] เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Rz ที่ดีที่สุดโดยกำหนดให้เป้าหมายเป็นค่าน้อยสุด (Minimize) ยิ่งค่า Rz น้อยยิ่งดี จากรูปที่ 15 แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดดังนี้ 1) ความเร็วรอบที่ 3,000 รอบ/นาที 2) อัตราป้อน 250 มิลลิเมตร/นาที 3) ดอกสว่านแบบใหม่ จะทำให้ได้ค่า Rz เท่ากับ 4.76 ที่ความน่าเชื่อถือที่ 98% นั้นหมายความว่าค่านี้จะมีความคลาดเคลื่อน (Error) ได้ 2%



รูปที่ 15 กราฟแสดงปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง

6.4 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล เป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิว ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการปรับค่าความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 รอบ/นาที และอัตราป้อน เท่ากับ 250 มิลลิเมตร/นาที และชนิดของดอกสว่านแบบใหม่ โดยทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดลองซ้ำการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตร/ นาที)	ดอก สว่าน	Rz (μm)					ค่าเฉลี่ย (μm)
			Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	
3,000	250	ใหม่	5.013	5.377	5.213	4.235	5.382	4.852
			Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	
			4.428	4.992	4.485	5.081	4.321	

จากการทดลองยืนยันผลดังตารางที่ 6 ได้ค่าความหยابผิวเฉลี่ย 4.852 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการทำนาย Y คือ 4.767 μm คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.75% (คิดจาก $(4.852 - 4.767) / 4.852 \times 100 = 1.75\%$)

6.5 การหาจุดคุ้มทุน

การหาจุดคุ้มทุน ของจำนวนการผลิตในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม (วิธีการใหม่) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนี้

จากสมการเป็นการหาค่าจุดคุ้มทุน [14]

$$N^* = \frac{F}{(p - v)} \quad (1)$$

กำหนดให้

N^* คือ จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน

F คือ ต้นทุนคงที่

v คือ ต้นทุนแปรผันต่อชิ้น

p คือ ราคาขายต่อชิ้น

โดยที่

ต้นทุนคงที่ = 13,700 บาท

ต้นทุนแปรผัน = 45 บาทต่อชิ้น

ราคาขาย = 60 บาทต่อชิ้น

แทนค่าในสมการที่ 1

$$N^* = \frac{13,700}{(60-45)} = 913 \text{ ชิ้น}$$

ดังนั้น จำนวนการผลิตที่คุ้มทุนในการเจาะรูชิ้นงานอลูมิเนียม (วิธีการใหม่) เท่ากับ 913 ชิ้น

7. สรุปผลการทดลอง

7.1 ดอกสว่านที่ได้ทำการออกแบบมาใหม่นั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบจากผลการทดลองพบว่า เวลาการแมชชีนชิ้นงานอลูมิเนียม (วิธีการเดิม) 192 วินาทีต่อชิ้น เวลาการแมชชีนชิ้นงานอลูมิเนียม (วิธีการใหม่) 182 วินาทีต่อชิ้น ลดลง 10 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็น 5.20% (คิดจากร้อยละที่

ลดลง คือ $(192 - 182) / 192 \times 100 = 5.20\%$) โดยสามารถเพิ่มผลผลิตชิ้นงานจาก 282 ชิ้นต่อวัน เป็น 297 ชิ้นต่อวัน เพิ่มขึ้น 15 ชิ้นต่อวัน

7.2 จากการทดลองปัจจัยต่างๆ ที่ส่งต่อเวลาของการปฏิบัติงาน พบว่าการออกแบบดอกสว่านนั้นมีผลต่อเวลาในการปฏิบัติงานโดยตรงเพราะการออกแบบดอกสว่านแบบใหม่ จะช่วยลดเวลาการปฏิบัติงาน ดังนั้นการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมของดอกสว่านแบบใหม่อยู่ที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบ/นาที และอัตราป้อนอยู่ที่ 250 มิลลิเมตร/นาที จะสามารถใช้เวลาในกระบวนการเจาะรูที่น้อยที่สุดโดยที่ความหยابผิวจะอยู่ในช่วงที่ต้องการ

8. ข้อเสนอแนะ

แนวทางการวิจัยต่อไปในอนาคต ควรศึกษาต่อในส่วนของดอกกัด (End Mill) รูปแบบไหนเหมาะสมให้ค่าความหยابผิวที่ต่ำที่สุดและใช้เวลาในการผลิตน้อยที่สุด

References

- [1] Kanjanapanyakorn R. Industrial work study. Bangkok, Thailand: Top Publisher; 2009. (In Thai)
- [2] Pipatpanyanugul K. Quality control. Bangkok, Thailand: Top Publisher; 2014. (In Thai)
- [3] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 6th ed. USA: John Wiley & Sons; 2005.
- [4] Rijiravanich V. Work study principles and case study. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Publisher; 2010. (In Thai)
- [5] Sitticharoen W. Work study. Bangkok, Thailand: Odeon Store Publisher; 2004. (In Thai)
- [6] Kaewploy S, Boonseng K. Design of experiment for evaluating the optimal condition in drying process of rubberwood. KKU Research Journal 2014;19(2):284-92. (In Thai)
- [7] Praputtakun K, Wuttiornpun T. A study of optimal proportion of factors in concrete ready mixed process using factorial experiment. The Journal of KMUTNB 2011;21(2): 313-20. (In Thai)
- [8] Chantasee S. The effects of machining parameters on milling of 6061-T6 aluminum alloy. Naresuan University Journal: Science and Technology 2017;25(1):138-49. (In Thai)
- [9] Kiswanto G, Azmi M, Mandala A, Ko TJ. The effect of machining parameters to the surface roughness in low speed machining micro-milling Inconel 718. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021;65(2):141-50.

- [10] Misumi Technical Center. Roughness [Internet]. 2021 [cited 2021 Aug 5]. Available from: <https://misumitechnical.com/technical/tools/what-is-roughness/> (In Thai)
- [11] Sudasna-na-Ayudhya P, Luangpaiboon P. Design and analysis of experiments. Bangkok, Thailand: Top Publishing. 2009. (In Thai)
- [12] Homsri P, Khongthana J. Design of experiment (DOE) to reduce waste in plastic injection process of automotive part. Kasem Bundit Engineering Journal 2013;3(2):73-95. (In Thai)
- [13] Sae-Sio B, Sokul N. Reducing defects in packaging by applying experimental results: a case study of a snack company. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal 2016;9(2):30-44. (In Thai)
- [14] Yaemphuan P. Engineering economy. Bangkok, Thailand: Se-Education Publisher; 2013. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



กิตติ วิโรจรัตนากพิศาล อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: kibuya@gmail.com

Interested Field: Productivity Improvement and Design of Experiments



จิรวัดน์ วรวิชัย อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: chirawat-w@hotmail.com

Interested Field: Productivity Improvement and Quality Control



อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: t.ukrit@edu.rmutl.ac.th

Interested Field: Productivity Improvement and Design of Experiments



ศิวัศภัฏ ปิจมิตร อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา
วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: siwasit.pitjamit@rmutl.ac.th

Interested Field: Productivity Improvement and Design of Experiments

Article History:

Received: June 28, 2022

Revised: September 28, 2022

Accepted: November 21, 2022

การศึกษาปริมาตรและมวลของอากาศที่ส่งผลต่อระบบหมุนเวียน
สารทำงานในแนวราบ

**A STUDY OF VOLUME AND AIR MASS THAT AFFECT THE WORKING
FLUID CIRCULATING SYSTEM IN A HORIZONTAL PLANE**

พิชาญ มาสุวรรณ¹ จิรวัดน์ สิตรานนท์² กิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตติ³ และ กนกพร เกษมมัน⁴

¹นักศึกษา สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,
picharn.m@gmail.com

^{2,3}อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,
²jirawat_si@rmutto.ac.th, ³kittisak_wi@rmutto.ac.th

⁴อาจารย์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,
kanokporn_ko@rmutto.ac.th

Picharn Maswanna¹, Jirawat Sitranon², Kittisak Witinantakit³ and Kanokporn Kohmun⁴

¹Master Student, Department of Energy Technology, School of Engineering and
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand, picharn.m@gmail.com

^{2,3}Lecturer, Department of Energy Technology, School of Engineering and
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand,
²jirawat_si@rmutto.ac.th, ³kittisak_wi@rmutto.ac.th

⁴Lecturer, Department of Science and Mathematics, Faculty of Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand, kanokporn_ko@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนใน
แนวราบโดยใช้ไอน้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งอุณหภูมิในการผลิตไอน้ำนั้นมีค่า 115 °C โดยเป็นพลังงาน

ความร้อนต่ำสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับความร้อนทั้งทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากแหล่งอื่นๆ ตัวแปรที่ศึกษาคือปริมาตรถังระดับจาก 19 L เป็น 98 L ทำให้มวลอากาศภายในถังระดับเพิ่มขึ้นไปอีก 5.76 เท่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาตรอากาศที่เพิ่มขึ้นของถังระดับมีอิทธิพลต่อความดันภายในถัง เนื่องจากอุณหภูมิของไหลดผสม (T_{fg}) ภายในถังระดับจะเพิ่มสูงขึ้นด้วยค่าสูงสุดจะมีค่า 87.2 °C โดยแปรผันตรงกับความดันภายในถังระดับที่สูงขึ้นมีค่าเท่ากับ 60.593 kPa และผลของความแตกต่างภายในถังกักเก็บความร้อนก็จะค่อยๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาและรอบการทำงาน ส่งผลต่อปริมาณความร้อนสะสมในระบบ ดังนั้นเมื่อขนาดถังระดับลดลง ปริมาณความร้อนสะสมของระบบและประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบก็จะลดลงตามไปด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ: ถังระดับ, ประสิทธิภาพทางความร้อน, มวลอากาศ

ABSTRACT

This research focused on the variables affecting the working fluid circulating system with thermal energy of the horizontal by using steam for working fluid. Temperature for boiling system is 115 °C which is low heat energy can be applied to general waste from industrial or other sources. By the way, the researcher has experimented by increased volume of pressure tank from 19 L to 98 L that mean air mass increased 5.76 time. The results of the experiment showed that volume of air inside pressure tank that increased has affected with pressure inside pressure tank because temperature of steam inside pressure tank will be increase too maximum temperature is 87.2 °C it will be directly proportional to the pressure inside pressure tank maximum pressure is 60.593 kPa and temperature difference inside the storage tank will a bit increased as time and circle of working fluid affected to quantity of heat accumulated in system. So, if volume of pressure tank decreased quantity of heat accumulated and thermal efficiency will be decrease as well.

KEYWORDS: pressure tank, thermal efficiency, air mass

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว พลังงานไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของทุกประเทศ การบริหารจัดการไฟฟ้าจึงเป็นนโยบายหลักของภาครัฐซึ่งแต่ละประเทศให้ความสำคัญ เพราะนั่นหมายถึง ‘ชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีของประชาชน’ [1] ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างมากมายและต่อเนื่อง ซึ่งโรงงานแต่ละแห่งจำเป็นต้องซื้อไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิตจากการไฟฟ้าในอัตราสูง ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับ

ค่าไฟฟ้าเดือนละหลายล้านบาท จึงจำเป็นต้องมีแนวคิดในการประหยัดพลังงานของโรงงาน นั่นคือการลดการใช้พลังงานลง โดยการจัดการพลังงานให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดโดยไม่ทำให้กระบวนการผลิตลดลงและไม่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง [2] โดยทั่วไปแล้วในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารธุรกิจขนาดใหญ่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการสูญเสียพลังงานทั้งในรูปของพลังงานความร้อนและพลังงานความเย็นสู่สิ่งแวดล้อมเสมอ พลังงานที่สูญเสียออกไปนี้มักเกิดขึ้นจากการเสียดทานเชิงกลภายในเครื่องจักรและนำพลังงานที่สูญเสียกลับมาใช้ใหม่นั้นจัดว่าเป็นหนึ่งในวิธีการลดการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย ในหลักการทั่วไปในการนำพลังงานที่สูญเสียกลับมาใช้ใหม่นั้นจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของประเทศมีการแข่งขันกันค่อนข้างสูง ทำให้ต้องตระหนักถึงต้นทุนและค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งหน่วยของผลิตผลและผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ดังนั้นในการประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรมใด ๆ ต้นทุนส่วนหนึ่งและอาจจะเป็นส่วนใหญ่นอกจากค่าแรงแล้วจะมาจากการใช้พลังงานอีกส่วนหนึ่ง [2] แต่ถ้ามีการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งเหล่านั้นกลับมาใช้ ประโยชน์ก็จะเป็นผลดีกับธุรกิจอุตสาหกรรมนั้น ๆ เนื่องจากประสิทธิภาพของพลังงานจะเพิ่มขึ้นแล้ว ยังจะส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนหน่วยผลิตอีกด้วย โดยทั่วไปความร้อนที่ปล่อยทิ้งมีอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 100 °C ของทุกระบวนการไม่สามารถนำมาใช้กับวัฏจักรพลังงานความร้อนต่ำ (Low temperature power cycle) ได้ ซึ่งในการนำความร้อนทิ้งในลักษณะนี้กลับมาใช้นั้น ต้องพิจารณาถึงวงจรที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายศาสตร์ได้ [3] การส่งถ่ายความร้อนในการหมุนเวียนของไหลในระบบนั้นมีทั้งหมุนเวียนในลักษณะแนวดิ่งและแนวราบ ทั้งระบบปิดและระบบเปิด อีกทั้งการเลือกใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของไหล สารทำงานหรือความร้อน ย่อมส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงาน ซึ่งการส่งถ่ายความร้อนนิยมใช้ของไหลเป็นสารตัวกลางส่งถ่ายความร้อน (Thermal Fluids) โดยอาศัยหลักการของความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ในกระบวนการผลิตเกือบทุกอุตสาหกรรมจะมีความร้อนทั้งหลายรูปแบบทั้งความร้อนและความเย็น ทั้งลมร้อน น้ำร้อน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ซึ่งของเสียเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานอีกได้ หรือเรียกว่า Waste Heat Recovery ทั้งยังสามารถช่วยประหยัดต้นทุนด้านพลังงานได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นการนำความร้อนดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ ต้องใช้พลังงานเพื่อขับเคลื่อนสารทำงานให้เคลื่อนที่จากแหล่งความร้อนไปยังจุดที่ใช้งาน โดยส่วนมากในภาคอุตสาหกรรมจะใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อนสารทำงาน [4] การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Water Heat System: SWHS) ควบคุมกับปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ในตัว ระบบที่ออกแบบนี้ประกอบด้วยตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 1.58 m² ถึงเก็บน้ำเหนือศีรษะที่ระดับบนสุด ถึงเก็บน้ำขนาดใหญ่ที่ไม่มีตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ระดับล่าง และวาล์วทางเดียวสำหรับควบคุมการไหลเวียนของน้ำ ทดสอบหัวปล่อยขนาด 1 และ 2 m ปั๊มสามารถทำงานที่อุณหภูมิสะสมประมาณ 70-90 °C และแรงดัน

ไอน้ำ 10-18 kPa พบว่าการไหลเวียนของน้ำภายในระบบ อยู่ระหว่าง 15 ถึง 65 L/day ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงอาทิตย์และหวับลอย นอกจากนี้ อุณหภูมิน้ำสูงสุดในถังเก็บจะอยู่ที่ประมาณ 59 °C ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำสูงสุดต่อวันอยู่ที่ประมาณ 0.0017 % SWHS มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดต่อวันประมาณ 21 % สรุปได้ว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้รับการปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว ยกเว้นปั๊ม SWHS ใหม่ที่มีหวับลอย 1 m หรือต่ำกว่านั้นเหมาะสำหรับใช้ในบ้านพักอาศัย ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับปั๊มหมุนเวียน มีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ SWHS ในประเทศ [5] ปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบน้ำร้อนในระบบหมุนเวียนตามแรงดันคือการแลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายโอนความร้อนภายในถังเก็บความร้อนจะมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในถังเก็บความร้อน [6] ส่วนสำคัญของระบบปั๊มความร้อนที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ได้ทำการวิจัยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (ค่า U) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนน้ำโดยใช้ท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงขนาด 32A (ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 mm) ที่ขดเป็นทองแดง ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพของท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงแบบขดกับท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงแบบเรียบ 32A ในเวลาเดียวกันได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน จากผลการวิจัยพบว่าค่า U ของท่อขดสูงกว่าท่อเรียบในการพาความร้อนตามธรรมชาติ 18 % และค่าการพาความร้อนแบบบังคับเพิ่มขึ้นถึง 19 % ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนกับท่อขดจะสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของท่อเรียบ [7] การพัฒนาปั๊มน้ำความร้อนพลังงานผสมผสาน สำหรับผลิตน้ำร้อนเป็น 2 ระบบ ระบบแรกใช้พลังงานจากแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ 2.1 m² ปริมาตรน้ำ 2.3 L ควบคู่กับพลังงานความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์ 2000 W ปริมาตรน้ำ 4.7 L ใช้ถังขัณฑ์น้ำขนาดเล็ก 9.5 L ใช้น้ำในการหล่อเย็นโดยตรง 300 mm ระดับความสูงของการสูบน้ำ 1 และ 3 m โดยการเติมปริมาตรอากาศในถังขัณฑ์น้ำ 10 % ระบบทำงานได้อัตโนมัติ พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบมี 2 ทาง ดังนั้นจึงต้องสมดุลพลังงานในช่วงการให้ความร้อนให้เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการในการขัณฑ์น้ำภายในถังขัณฑ์น้ำ มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการสูญเสียความร้อนจากแหล่งความร้อนทั้ง 2 ที่ป้อนเข้าระบบ [8] สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ถังให้ความร้อนขนาด 0.4 x 0.4 m สูง 0.3 m ปริมาตร 48 L หุ้มด้วยฉนวนทำจากยางสังเคราะห์ อุณหภูมิถึงผลิตไอน้ำร้อน 2 ค่าควบคุมไว้ที่ 110 °C และ 115 °C โดยให้ปริมาณอากาศในถังขัณฑ์น้ำที่เข้าถึงขัณฑ์ที่มีอากาศอยู่ภายใน ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นในถังผลิตไอน้ำร้อน ซึ่งอากาศอยู่ภายในถังจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้น สภาวะของอากาศที่ได้รับความร้อนจากน้ำร้อนทำให้เกิดความดันสูงขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิและความดันยังคงสูงกว่าความดันในถังผลิตไอน้ำร้อน ทำให้น้ำสามารถหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อนได้ เมื่อน้ำเย็นเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อนจะทำให้อุณหภูมิของถังผลิตไอน้ำร้อนเกิดภาวะสุญญากาศ ทำให้งังผลิตไอน้ำร้อนสามารถดูดน้ำกลับเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อนได้ครบรอบการทำงานและเริ่มต้นทำงานในรอบถัดไป

การหมุนเวียนน้ำได้ปริมาตรน้ำต่อรอบที่สุดคืออุณหภูมิ 115 °C การหมุนเวียนสูบน้ำได้สูงสุด 25 รอบ การใช้ปริมาณความร้อนมีค่า 2.656 MJ และประสิทธิภาพความร้อนของระบบ 25.45% [3] ปัจจุบันได้พัฒนาเครื่องต้นแบบปั๊มสูบน้ำอาศัยกำลังไอน้ำแบบอัตโนมัติขึ้นมา สามารถสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำหลายรอบการทำงาน ซึ่งขนาดถังที่เล็กเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อนค่อนข้างมาก ปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำที่ใช้พลังงานจากขดลวดไฟฟ้าขนาด 3 kW ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนระบบ ทำให้ระบบสูบน้ำได้เพิ่มขึ้นได้ถึง 227 L ในขณะที่ระดับความสูงในการสูบน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพปั๊มสูงขึ้นที่ระดับ 4.85 m [9] ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการหมุนเวียนของสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนในแนวราบในระบบปิด อาศัยถ่ายเทความร้อนในแนวราบการโอนความร้อนภายในถังเก็บความร้อนผลิตกำลังไอน้ำที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นพลังงานในการหมุนเวียนสารทำงาน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ยังแลกเปลี่ยนได้ไม่มาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยตามไปด้วย และการหมุนเวียนของสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนในแนวราบ มีระยะทางการส่งถ่ายความร้อนสั้น เนื่องจากความดันที่ใช้ในการหมุนเวียนไม่เพียงพอในการผลักดันสารทำงานให้เคลื่อนที่ได้ในระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดการสูญเสียความดันของของไหลภายในท่อที่ใช้ในการหมุนเวียนสารทำงาน [10, 11]

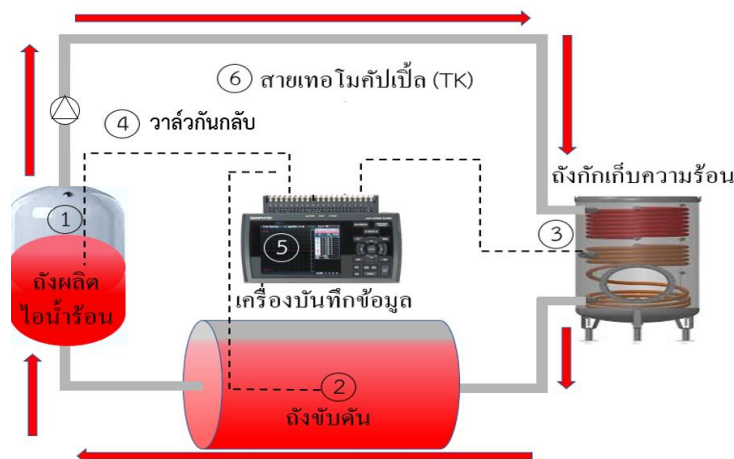
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบการหมุนเวียนของสารทำงาน เพื่อเพิ่มความดันรวมให้กับระบบ และประสิทธิภาพทางความร้อน ทำให้ระบบสามารถหมุนเวียนสารทำงานได้ในระยะทางที่มากขึ้น และมีความเร็วในการหมุนเวียนสารทำงานต่อรอบเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขนาดปริมาตรของถังขั้วดันให้มากขึ้น เพื่อจะเพิ่มมวลอากาศภายในระบบมากขึ้น โดยปริมาตรและมวลของอากาศที่อุณหภูมิน้ำร้อนในถังผลิตไอน้ำ 115 °C จะส่งผลต่อความดันที่เพิ่มขึ้นในการเอาชนะความสูญเสียการไหลภายในท่อแบบแนวราบ โดยทำให้ระบบสามารถหมุนเวียนสารทำงานได้ในระยะทางที่มากขึ้น

2. ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการการแลกเปลี่ยนและกักเก็บความร้อน

หลักการแลกเปลี่ยนและกักเก็บความร้อน แสดงดังรูปที่ 1 เป็นระบบหมุนเวียนสารทำงาน โดยไอน้ำเกิดการหมุนเวียนในระบบผ่านสู่ถังกักเก็บน้ำร้อน ที่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) อยู่ภายในระบบก่อน ตำแหน่งที่ 1 เป็นการผลิตน้ำร้อนที่ได้รับความร้อนจากขดลวดความร้อน (Heater) จะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำภายในถังผลิตน้ำร้อนให้สูงขึ้นเกิดความดันที่สูงขึ้น แปรผันตามอุณหภูมิเมื่อถึงจุดเดือดของน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C เกิดการเปลี่ยนสถานะของเหลวกลายเป็นไอน้ำเคลื่อนที่ไปยังถังกักเก็บน้ำร้อนที่ตำแหน่งที่ 2 โดยผ่านวาล์วกันการไหลย้อนกลับ

เมื่อเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนภายในถังกักเก็บน้ำร้อนจะมีอุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงส่งผลต่อความดันลดลงตามไปด้วย เมื่อการไหลของน้ำผ่านเข้าสู่ถังขั้วดันที่ตำแหน่งที่ 3 ซึ่งภายในยังบรรจุอากาศทำให้เกิดความดันที่เพิ่มขึ้น จากอากาศที่ได้รับความร้อนจากน้ำร้อนส่งผลให้ความดันเพิ่มขึ้น เกิดความแตกต่างของความดันในถังผลิตไอน้ำร้อนเกิดให้น้ำสามารถหมุนเวียนกลับไปยังถังผลิตน้ำร้อน เมื่อน้ำเย็นไหลเข้าสู่ถังน้ำร้อนเกิดเป็นสุญญากาศ เกิดการดูดน้ำกลับจากถังไอน้ำเข้าสู่ถังผลิตน้ำร้อนซึ่งครบ 1 รอบของการทำงาน [2]



รูปที่ 1 หลักการการแลกเปลี่ยนและกักเก็บความร้อน

2.2 ปริมาณความร้อนสะสมในถังกักเก็บน้ำร้อน [3]

$$Q_{st} = m_{w,s} \times C_{p,w} \times (T_{2,s} - T_{1,s}) \quad (1)$$

เมื่อ Q_{st} คือ ปริมาณความร้อนสะสมในถังกักเก็บ (kJ)

$m_{w,s}$ คือ มวลน้ำในถังกักเก็บ (kg)

$C_{p,w}$ คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C)

$T_{2,s}$ คือ อุณหภูมิในถังกักเก็บที่เวลาสุดท้าย (°C)

$T_{1,s}$ คือ อุณหภูมิในถังกักเก็บที่เวลาเริ่มต้น (°C)

2.3 ประสิทธิภาพของระบบน้ำร้อน [3]

$$\eta_t = \frac{Q_{st}}{Q_{input}} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ η_t คือ ประสิทธิภาพของระบบ (%)

Q_{st} คือ ปริมาณความร้อนสะสมภายในถังกักเก็บน้ำร้อน (kJ)

Q_{input} คือ ปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ระบบ (kJ)

2.4 ความดันที่ใช้ในการหมุนเวียนไอน้ำ

การหาความดันระบบการหมุนเวียนไอน้ำได้จากสมการ (3) (4) และ (5) [3]

$$P_{system} = P_{air} + P_{vapor} \quad (3)$$

$$P_{air} \cdot V_{air} = m_{air} \cdot R_{air} \cdot T_{air} \quad (4)$$

$$P_{vapor} = 133.32 \times 10^{(8.07131 - 1730.63 \times \frac{1730.63}{T_{vapor} + 233.426})} \quad (5)$$

เมื่อ P_{system} คือ ความดันรวมในระบบ (kPa)

P_{air} คือ ความดันของอากาศในระบบ (kPa)

P_{vapor} คือ ความดันของไอน้ำในระบบ (kPa)

m_{air} คือ มวลอากาศในระบบ (L)

V_{air} คือ ปริมาตรอากาศในระบบ (m^3)

R_{air} คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (kJ/kg °C)

T_{air} คือ อุณหภูมิอากาศในระบบ (°C)

T_{vapor} คือ อุณหภูมิไอน้ำในระบบ (°C)

3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ทดลอง (แสดงดังรูปที่ 2)

1) ถังขั้บตัน (Pressure tank) รูปทรงกระบอกแนวนอน วัสดุทำจากสแตนเลสเบอร์ 304 มีความหนา 0.0030 m โดยมีสองขนาดดังนี้ ถังแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 m ความสูง 0.39 m ปริมาตรของน้ำ 19 และ ถังที่สองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 m ความสูง 0.50 m ปริมาตรของน้ำ 98 L

2) ถังกักเก็บความร้อน (Storage tank) รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 0.40 m x 0.40 m x 0.30 m ปริมาตรในการบรรจุน้ำ 48.0 L ความหนา 0.0015 m วัสดุเป็นสแตนเลสเบอร์ 304

3) ถังผลิตไอน้ำร้อน (Heating tank) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด กว้าง 0.2 m ยาว 0.3 m สูง 0.5 m ปริมาตรในการบรรจุ 3 L ความหนาของวัสดุ 0.003 m วัสดุเป็นสแตนเลสเบอร์ 304 ฉนวนเป็นยางสังเคราะห์

4) วาล์วกันย้อนกลับ (Swing check valve type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านออก 0.025 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านเข้า 0.025 m วัสดุที่ใช้เป็นทองเหลือง ชนิดของบานพับเป็นแบบกลับด้วยสปริง

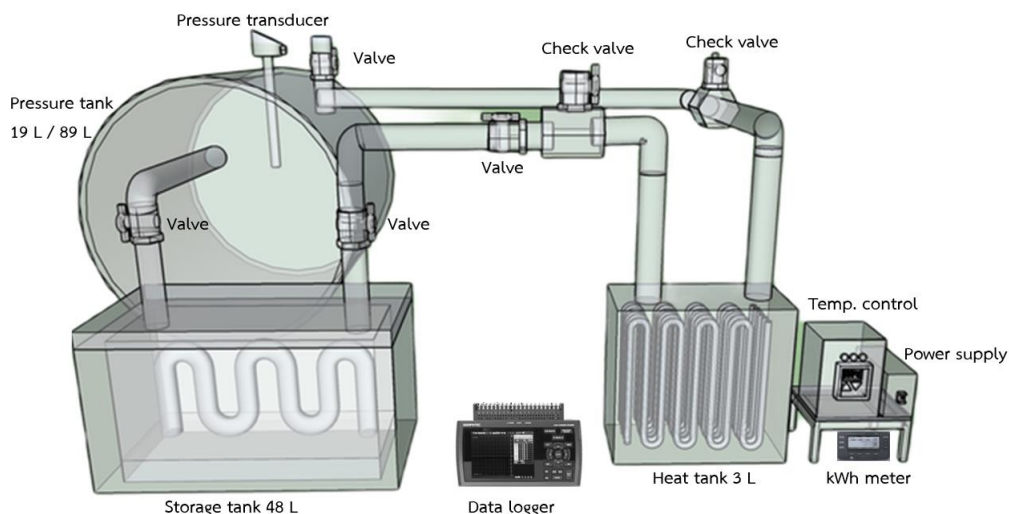
5) ขวดลวดให้ความร้อน (Electric heater) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.008 x 0.2 m ใช้แรงดันไฟฟ้า 220-240 VAC ขนาดกำลังไฟฟ้า 3 kW วัสดุเป็นลวดนิกเกิลโครเมียม

6) เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดัน (Data logger) แหล่งรับสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ในย่าน 20-50 mV ค่าความแม่นยำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $\pm 0.005\%$ ย่านการวัดอุณหภูมิ -200 ถึง 1370 °C ค่าความแม่นยำของอุณหภูมิ $\pm 0.15\%$ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 180 ถึง 250 VAC ความถี่ของกระแสไฟฟ้า 50/60 Hz

7) ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure Transducer) หลักการทำงานแปลงสัญญาณความดันเป็นแรงดันไฟฟ้า ย่านการวัด -14.7 ถึง 30 psi (-1 ถึง 2 bar) ความแม่นยำของการวัด $\pm 0.25\%$ อุณหภูมิของสารทำงาน -40 ถึง 125 °C แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 9 ถึง 30 VDC สารทำงานที่ใช้ น้ำ และอากาศ

8) ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิดของหัวตรวจจับ Type K ย่านการวัด 0 ถึง 200 °C ค่าเบี่ยงเบน $\pm 2.0\%$ (-110 ถึง 285 °C) ค่าเบี่ยงเบน $\pm 2.2\%$ และ 285 ถึง 1,250 °C ค่าเบี่ยงเบน $\pm 0.75\%$ ขนาด 0.032 m x 0.002 m

9) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า 220-240 VAC กำลังไฟฟ้าด้านออก 3 kW ความถี่ด้านเข้า 50 Hz ระบบควบคุมแสดงผล PID/Digital



รูปที่ 2 โครงสร้างการทำงานของระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยความร้อนในแนวราบ

4. วิธีการทดลอง

1) ศึกษาตัวแปร (ปริมาตรอากาศในถังขับดัน) ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยพลังงานความร้อนในแนวราบ โดยการทดลองกับขนาดถังขับดัน 2 ขนาด คือ ขนาด 19 L และ 98 L โดยให้อุปกรณ์อื่นเหมือนกันทุกอย่าง รวมทั้งปริมาณน้ำในถังผลิตความร้อน และถังขับดัน ปริมาณเท่ากันเช่นกันคือในถังผลิตไอน้ำร้อน 3 L และ ถังขับดัน 3 L เปลี่ยนแปลงเพียงแค่ขนาดถังขับดันเท่านั้น

2) กำหนดจุดวัดอุณหภูมิในจุดต่าง ๆ ที่ต้องนำมาวิเคราะห์ และจุดวัดความดันในถังขับดัน และติดตั้งเครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดันตามจำนวนที่ติดตั้งไป

3) การทดลองจะเริ่มจากถังขับดันขนาด 19 L ก่อน โดยเติมน้ำ 3 L ในถังผลิตไอน้ำร้อนให้เต็มถึงปริมาณน้ำเทียบกับอากาศคือ 3:0 L และเติมน้ำในถังขับดัน 3 L โดยปริมาณน้ำกับอากาศคือ 3:16 L ดังแสดงในรูปที่ 3

4) ทำการตั้งค่าเริ่มต้นเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (kW-h) และตั้งค่าเครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดันโดยบันทึกทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5) ทำการตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิที่ 115 °C เปิดเบรกเกอร์เพื่อจ่ายไฟให้ชุดลดทำความร้อน

6) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ให้นำผลมาทำการวิเคราะห์ ถ้าชุดข้อมูลไปในทิศทางทางเดียวกันให้ทำการทดลองที่ตัวแปรใหม่คือถังขับดันที่ปริมาตร 98 L แล้วทำการทดลองซ้ำจากข้อที่ 3 ถึง ข้อที่ 5 โดยปริมาตรน้ำกับอากาศคือ 3:95 L ทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3

ปริมาตรอากาศ 95 L
ปริมาตรน้ำ 3 L

ปริมาตรอากาศ 16 L
ปริมาตรน้ำ 3 L

ถึงขีดต้นขนาด 98 L

ถึงขีดต้นขนาด 19 L

รูปที่ 3 อัตราส่วนของปริมาณของน้ำกับปริมาตรของอากาศในถึงขีดต้นขนาด 19 L และ 98 L

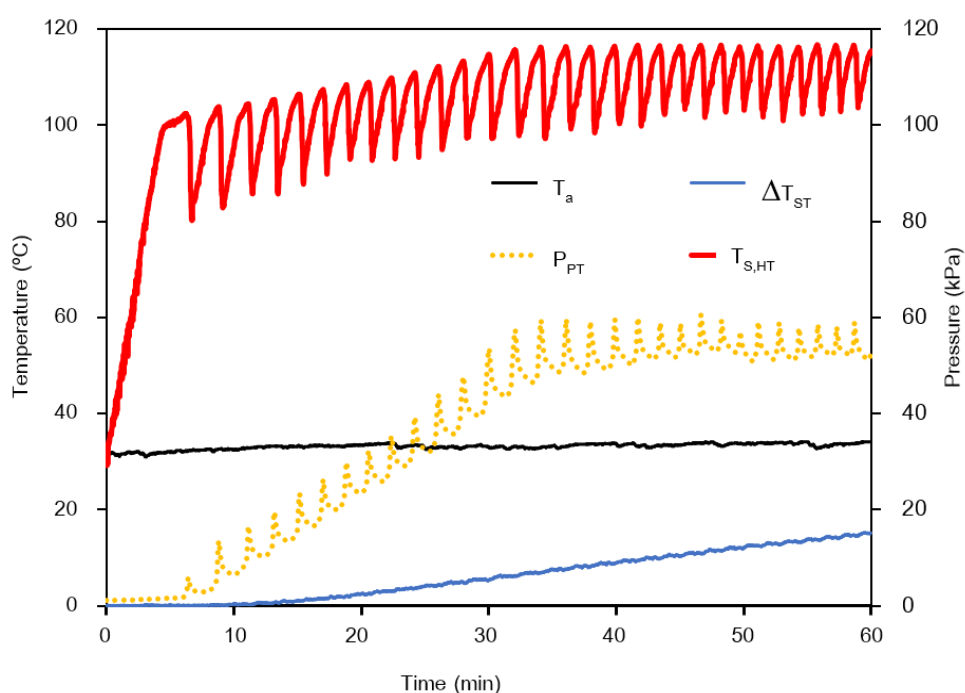
7) นำผลการทดลองทั้งสองแบบมาวิเคราะห์ อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อน อุณหภูมิอากาศในถึงขีดต้น อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความดันในถึงขีดต้น จำนวนรอบที่หมุนเวียนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมง ปริมาณความร้อนสะสมในถึงกักเก็บ ปริมาณกำลังไฟที่ใช้ไป และประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาตรของถึงขีดต้นสองขนาดคือ 19 L และ 98 L ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการหมุนเวียนสารทำงานด้วยความร้อนในแนวนราบ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิและความดัน ปริมาตรอากาศ และปริมาตรของน้ำในอุปกรณ์ต่างๆ โดยจุดวัดประกอบด้วยอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ ($T_{w,HT}$) อุณหภูมิของในถังผลิตไอน้ำ ($T_{s,HT}$) อุณหภูมิอากาศรอบๆ (T_a) อุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างในถึงกักเก็บความร้อน (ΔT_{ST}) ความดันกับอุณหภูมิของถึงขีดต้น (P_{PT}) และปริมาตรของอากาศ เพื่อหาปริมาณความร้อนที่สะสมในถึงกักเก็บความร้อน และประสิทธิภาพความร้อนในถึงกักเก็บความร้อน (η_t) และหาความสัมพันธ์ที่มีผลกับการหมุนเวียนของระบบเป็นต้น โดยนำข้อมูลจากการทดลองที่ได้มาศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยควบคุมอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำไว้ที่ 115 °C โดยมีผลการศึกษาดังนี้

การทำงานของระบบหมุนเวียนสารทำงานด้วยความร้อนในแนวนราบ จะเป็นถึงขีดต้นขนาด 98 L ซึ่งอุณหภูมิของน้ำในถังผลิตไอน้ำร้อน ($T_{w,HT}$) จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอที่อุณหภูมิเกิน 100 °C ซึ่งอุณหภูมิจะไม่สูงตามค่าที่ตั้งไว้ เนื่องจากจุดเดือดของน้ำเริ่มต้นที่ความดัน 0 kPa หลังจากนั้นเมื่อความดันเพิ่มจุดเดือดก็จะเพิ่มขึ้นตามแต่จะไม่เกินค่าที่ตั้งไว้ โดยอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำร้อนจะสูงขึ้นตามความดัน เมื่อมีความดันไอน้ำก็จะเคลื่อนที่ไปในถึงขีดต้นและไหลเข้าสู่ถึงกักเก็บความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้อุณหภูมิของไอน้ำด้านขาออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนลดลง ไหลเข้าสู่ถังผลิตไอน้ำร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิ

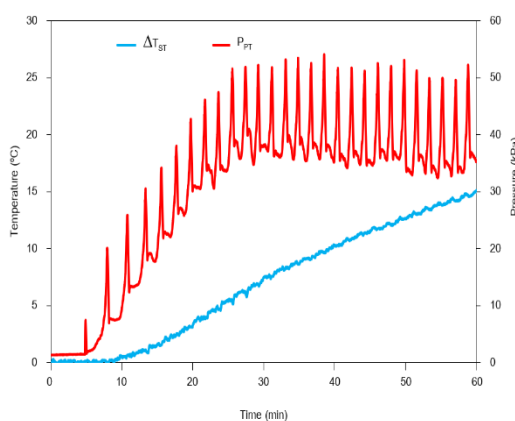
100 °C ขึ้นไปจนเกิดสภาวะสุญญากาศเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ถังผลิตไอน้ำร้อน ส่งผลให้สารทำงานเคลื่อนที่กลับเข้าในถังผลิตไอน้ำร้อน ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานในถังผลิตไอน้ำร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 4 และขดลวดความร้อนจะทำงานอีกครั้ง เนื่องจากอุณหภูมิของสารทำงานลดลงต่ำกว่าค่า set point การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำร้อนจะเริ่มต้นจากจุดเดือดของสารทำงานคือ ที่ 100 °C และจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันภายในถังขั้วดันที่ หมุนเวียนมายังถังผลิตไอน้ำร้อนทำให้ความดันภายในถังผลิตไอน้ำร้อนสูงขึ้นมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับแต่จะไม่เกินค่าที่ตั้งไว้คือ 115 °C เมื่อเกินค่าที่ตั้งไว้ ขดลวดความร้อนจะตัดการทำงานเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อนให้คงที่ อุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำร้อนจะอยู่ในรูปแบบเดิมไปเป็นรอบๆ ในรูปแบบฟันปลา ซึ่งการเพิ่มความร้อนและการคลายความร้อนเป็นรอบ ๆ จะเกิดความร้อนสะสมในถังกักเก็บความร้อน 48 L เนื่องจากการคลายความร้อนผ่านทางขดลวดแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังน้ำในถังกักเก็บความร้อน ซึ่งอุณหภูมิ น้ำในถังกักเก็บความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบและอุณหภูมิของสารทำงาน



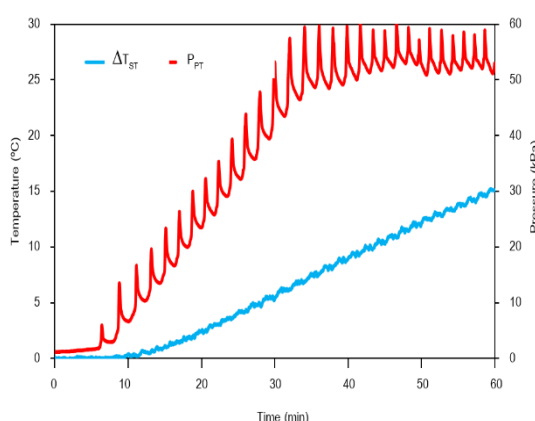
รูปที่ 4 การทำงานของระบบหมุนเวียนสารทำงานในแนวราบ ที่ขนาดถึงขั้วดันขนาด 98 L

ความแตกต่างของอุณหภูมิในถังกักเก็บความร้อนที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที แรกตามรอบการทำงานจะสอดคล้องกับความดันของระบบที่เพิ่มขึ้นตามทั้งถึงขั้วดัน 19 L และ

98 L โดยมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พอเวลาผ่านไปในช่วงประมาณ 25 นาทีความดันในถังระดับ 19 L เริ่มมีลักษณะคงที่ แต่ถึงระดับ 98 L ลิตรจะเริ่มคงที่ประมาณนาที่ที่ 35 แต่จะเห็นความแตกต่างกันของความดันทั้งสองถึงคือ ถึงระดับ 98 L จะมีความดันคงที่สูงสุดที่ 50-60 kPa ในขณะที่ถึงระดับ 19 L จะอยู่ในช่วง 35-50 kPa ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับสมการที่ 3 ถึง 5 แสดงดังรูปที่ 5 เนื่องจากมวลอากาศภายในถังระดับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของอากาศภายในถังระดับ ดังนั้นเมื่อปริมาตรถึงระดับเพิ่มขึ้น มวลอากาศก็จะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ความดันอากาศภายในถังระดับเพิ่มขึ้นตามด้วย โดยอุณหภูมิของถังกักเก็บความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันจากการตั้งค่าอุณหภูมิของถังผลิตไอน้ำร้อนเท่ากัน



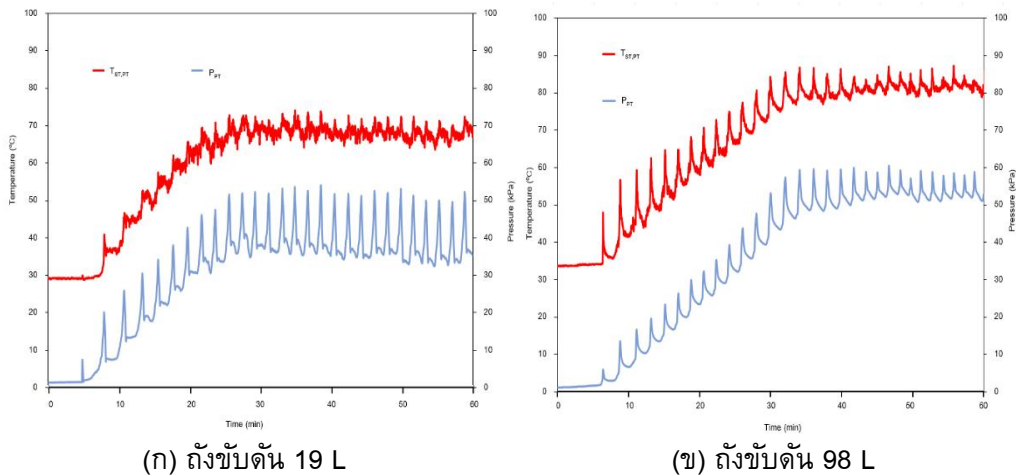
(ก) ถึงระดับ 19 L



(ข) ถึงระดับ 98 L

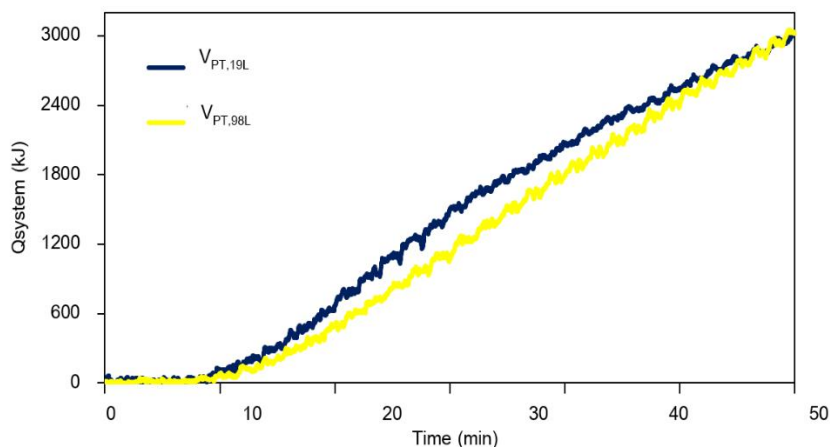
รูปที่ 5 ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิในถังกักเก็บความร้อน (ΔT_{ST}) และความดันรวมในระบบ

จากสมการที่ 4 เมื่ออุณหภูมิและมวลอากาศสูงขึ้น จะส่งผลให้ความดันอากาศสูงขึ้นตามลำดับแสดงดังรูปที่ 6 โดยความดันรวมภายในระบบจะเกิดจากความดันไอน้ำรวมกับความดันอากาศ ดังสมการที่ 3 ดังนั้นเมื่อปริมาตรถึงระดับมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 19 L เป็น 98 L จะทำให้มวลอากาศภายในถังเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของถังนั้นด้วย และสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอน้ำภายในถังระดับที่เพิ่มขึ้นตามมวลของอากาศ



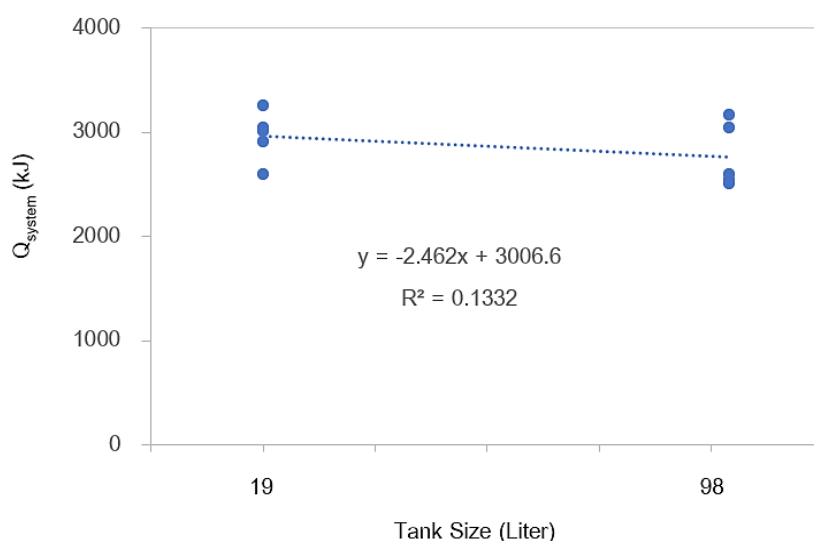
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์อุณหภูมิของไอน้ำในถังขั้วตัน และความดันรวมในระบบ

อุณหภูมิภายในถังกักเก็บความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 เมื่อระบบเริ่มทำงาน ความร้อนจากถังผลิตไอน้ำร้อนเคลื่อนที่ผ่านถังขั้วตันทำให้มีความดันสูงขึ้นและเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกติดตั้งไว้ภายในถังกักเก็บความร้อน เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำภายในถังกักเก็บความร้อน ผลต่างของอุณหภูมิของไอน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L มีอุณหภูมิสูงกว่าขนาดถังขั้วตัน 98 L เนื่องจากมวลของไอน้ำและความดันภายในระบบของถังขั้วตัน 98 L มีค่าสูงกว่าจึงไหลเวียนได้เร็ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในถังกักเก็บความร้อนลดลงปริมาณความร้อนสะสมภายในถังกักเก็บความร้อนจึงลดลงตามไปด้วย



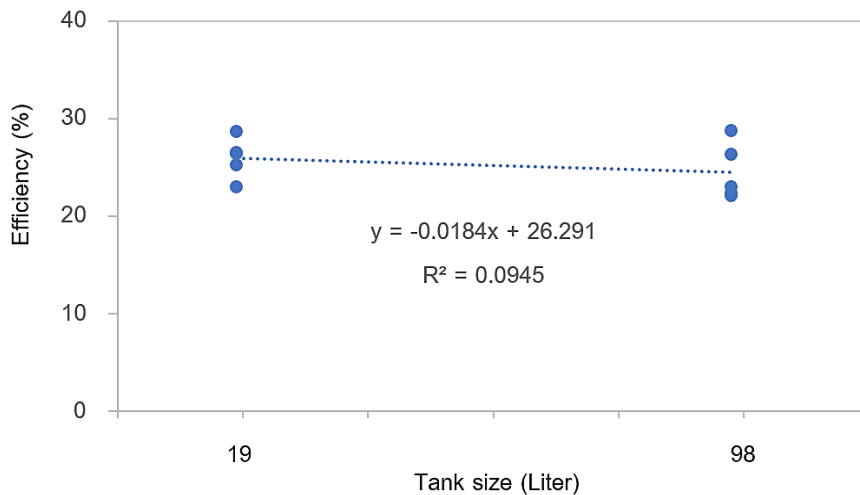
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่ถังกักเก็บความร้อนและถังขั้วตัน 19 L และ 98 L

ปริมาณความร้อนที่สะสมภายในถังกักเก็บความร้อนจะมีค่าแปรผกผันกับปริมาตรของถังขั้วตัน เมื่อขนาดถังขั้วตันเพิ่มขึ้นปริมาณความร้อนก็จะลดลง โดยเส้นแนวโน้มและสมการเชิงเส้นเป็นการทำนายพฤติกรรมของปริมาณความร้อนแสดงให้เห็นถึงการลดลงอย่างเป็นนัยสำคัญของปริมาณความร้อนกับปริมาตรของถังขั้วตัน เนื่องจากปริมาตรถังขั้วตันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มวลอากาศและความดันเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของไอน้ำจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามความดัน ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่สะสมภายในระบบที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L และ 98 L

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบจะมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบและพลังงานที่ได้จากระบบ แสดงดังรูปที่ 9 การทำนายพฤติกรรมของประสิทธิภาพทางความร้อนกับปริมาตรของถังขั้วตัน โดยการเพิ่มเส้นแนวโน้มและสมการเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดถังขั้วตันเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพทางความร้อนจะลดลงตามลำดับเนื่องจากปริมาณความร้อนสะสมภายในถังกักเก็บความร้อนมีค่าสูงขึ้นตามขนาดของถังขั้วตันที่ลดลง ก็จะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นตามปริมาตรของถังขั้วตันที่ลดลงเช่นกัน ในเมื่อปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังสมการที่ 2



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพทางความร้อนที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L และ 98 L

6. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าปริมาตรอากาศที่เพิ่มขึ้นของถังขั้วตันมีอิทธิพลต่อความดันภายในถัง เนื่องจากอุณหภูมิของไอน้ำภายในถังขั้วตันจะมีอุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งค่าสูงสุดจะอยู่ที่ 87.2 °C จะแปรผันตรงกับความดันภายในถังที่สูงขึ้น 60.593 kPa และผลของความแตกต่างของอุณหภูมิภายในถังก็เก็บจะค่อย ๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาและรอบการทำงาน ส่งผลต่อปริมาณความร้อนสะสมภายในระบบ ดังนั้นเมื่อขนาดถังขั้วตันลดลง ปริมาณความร้อนสะสมของระบบและประสิทธิภาพความร้อนของระบบก็จะลดลงตามลำดับ โดยที่ปริมาณความร้อนในระบบที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L มีค่าเท่ากับ 2,959 kJ และที่ถังขั้วตันขนาด 98 L มีค่าเท่ากับ 2,765 kJ ในส่วนของประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบที่ขนาดถังขั้วตัน 19 L มีค่าเท่ากับ 25.94% และที่ขนาดถังขั้วตัน 98 L มีค่าเท่ากับ 24.49 %

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอาจารย์ สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง รวมถึงให้อุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัยและอนุเคราะห์สถานที่เก็บผลการทดลองครั้งนี้ด้วย

References

- [1] Electricity Generating Authority of Thailand. Fuel for Electricity Generation [Internet]. 2021 [cited 2021 Jan 02]. Available from: <https://www.egat.co.th/home/fuel/>
- [2] Ruammake P. Key success factors for the sustainable solar energy development. Executive Journal 2014;34(1):122-9. (In Thai)
- [3] Sitranon J, Chitwiroj A, Namprakai P, Witinantakit K. A study of heat transfer system with steam as a horizontal circulating working fluid. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):238-52. (In Thai)
- [4] Sitranon J, Jaekhom S, Makmee A, Onwised C. A study of the circulation of steam circulating system in the horizontal. Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal 2021;3(1):44-54. (In Thai)
- [5] Sutthivirode K, Namprakai P, Roonprasang N. A new version of a solar water heating system coupled with a solar water pump. Applied Energy Journal 2019;86(9):1423-30.
- [6] Sitranon J, Sutthivirode K, Rungprasand N. A Study of discharge head affecting the temperature and amount of hot water using mathematical modeling of a solar water heating system. SWU Engineering Journal 2020;15(1):97-107. (In Thai)
- [7] Zhang XW, Oh GS, Jung GJ. Performance of water source heat pump system using high-density polyethylene tube heat exchanger wound with square copper wire. Advance in Mechanical Engineering Journal 2015;7(7):1-12.
- [8] Moonsri P, Kunchornrat J, Namprakai P. Hybrid energy thermal water pump for producing hot water from a shallow well in Thailand. Energy Engineering Journal 2016;142(3):1-15.
- [9] Oonwised C, Sitranon J, Sutthivirode K. Study of temperature and amount of cooling water affecting to vacuum pressure of steam water pump. Renewable Energy for Community Journal 2021;4(3):107-20. (In Thai)
- [10] Akkarathiwa S, Wongcharee K. Thermodynamics: an engineering approach. 7th ed. Thailand: puMcGrahill Publishing; 2021.
- [11] Lazonva M. Characteristics of forced convection heat transfer to R125 at supercritical state in horizontal tube [PhD Thesis]. Belgium: Ghent University; 2020.

ประวัติผู้เขียนบทความ



พิชาญ มาศวรรณ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 089-515-8563 Email: picharn.m@gmail.com



ผศ.ดร.จิรวัดน์ สิตรานนท์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก E-Mail: Jirawat_si@rmutto.ac.th

งานวิจัย: Thermal Energy, Solar Energy, Steam-Air Power, Solar Thermal Water Pump



ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก E-Mail: kittisak_wi@rmutto.ac.th



กนกพร เกาะม้น อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (แผนกวิชาฟิสิกส์) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก E-Mail: kanokporn_ko@rmutto.ac.th

งานวิจัย: Interferometer, Refractive index, Metrology

Article History:

Received: September 8, 2022

Revised: December 1, 2022

Accepted: December 7, 2022

APPLYING A HYBRID MACHINE LEARNING APPROACH TO THE PRODUCTION FLOOR: A CASE OF PAPER COUNTING SYSTEM IN PRINTING INDUSTRY

Paronkasom Indradat¹ and Anirut Kantasa-ard²

^{1,2}Lecturer, Faculty of Logistics, Burapha University,

169 Long-hard Bangsean Road, Saensuk, Mueang, Chonburi 20131, Thailand,

¹paronkasom.in@buu.ac.th, ²anirut.ka@buu.ac.th

ABSTRACT

To satisfy the requirement of quality control in printing and packaging industry, a sheet counting apparatus is developed, which adopts a hybrid machine learning approach and is able to provide a real-time and noncontact measurement of its quantity. With a brief introduction of the system architecture, our main work focuses on the forecasting approach using neural network in different environment. The basic principle is to identify each paper profile from various attributes from the company's Enterprise Resource Planning (ERP) system together with measured heights of the pallet and provide workers an estimated sheet paper count. According to experiments and tests in real production lines, our hybrid approach can reach a very high measuring accuracy for printing papers or cards with any thickness.

KEYWORDS: Recurrent Neural Network, Forecasting, Printing Industry, Estimation

1. Introduction

Despite the digital technology disrupting the customer trend of the printing media, the growth rate of the printing industry is increasing continuously from time to time. The packaging demands are increased in many industrial sectors during this new normal period. For example, the printing of paper packaging is augmented following the growth rate of e-commerce around the world. The market share of printing media is around 313.28 million US dollars in 2021 [1]. The growth rate of market share is around 8.8 percent bigger than in the year 2020. In addition, the largest printing media market is Asia-Pacific region. Thailand is also the largest paper packaging exporter in Southeast Asia. The export revenue from

paper packaging is around 6,520 million THB in the year 2018, which is bigger than the year 2017 approximately 7.6 percent [2].

The challenge of the printing industry is how to control the production cost. In general, most printing companies are considered a job shop manufacturing as orders are varied due to different requirements of customers. Some paper packages are manufactured using many machines and complex processes. Also, packaging printing requires a high standard of quality check. Therefore, the efficiency of the production process is very important and impacts the production cost and the variety of customer demands.

The estimation of the paper count on the pallet is one of the most important parts of the printing production process and affects the production cost in the printing house. For instance, the coating process discovers that the number of paper packages is not sufficient to deliver to customers after finishing the printing process. In this case, the printing department is required to re-setup the machine to re-print the remaining packages to cover shortages. This activity will increase the production cost and waste production time. Also, this loss will affect the overall performance of the production process and the competitiveness in the printing industry. Therefore, the printing house is required to focus on the estimation of the paper counter before starting the production process. Manual counting is a time-consuming process, especially in large-scale printing where there are large number of copies required (e.g., one million copies). Several methods of the estimation of the paper counter are implemented recently, such as the use of the counter to count papers manually at the precedent machine before starting the production, using a light sensor, and calculating from the total weight of papers. However, some limitations occur with these methods due to production conditions. For example, the counter does not support the case of pallet partitioning or splitting the number of finished packages after quality checking. These mentioned processes will affect the number of papers on each pallet. Also, paper counting using the light sensor still makes the number of papers vary from the actual quantities regarding different machines and production processes.

Based on all investigated problems mentioned above, we propose a new solution for paper counting. The new solution implements the forecasting concept for paper counting in the production process. The demand forecast is one of the most common methods implemented to estimate or predict the number of resources in many business sectors. In this case, the height and other specifications of papers will be used as the input component

to predict the number of papers in the production process. This solution is the simplest for operators and relevant staff without any special requirements as they will measure the height of the papers using only a tape measure.

However, there are some challenges when using the height of the paper to predict the paper counter on the pallet.

1) The thickness of prepared papers is different due to the varieties of paper characters and specifications (more than 20 types of papers).

2) Related operations in the production process impact the height of the paper. For example, finished papers after the printing process will be higher than work-in-process papers.

3) How to stack the paper on the pallet also impacts the height of papers because of the compression force of different paper types.

Regarding the challenges above, it is very essential to measure the height of prepared papers before the paper counting prediction. If we have a good preparation of the paper's height measurement, it will impact the performance of paper counting prediction. Also, a good prediction will help the operators prepare enough papers before the production process.

Machine learning approaches have been proved to be a successful approach in analyzing large scale data. We have seen some fruitful contributions in many research venues, such as e-commerce analytics [3]. However, we have not yet seen many applications in the production floor. This research paper aims to provide the case study of applying the machine learning methodology, especially recurrent neural networks, to support operators in managing their inventory in the printing house. Consequently, the leaner process and cost reduction are achieved. The paper is organized as follows. Section 2 describes the related literature. Section 3 describes our methodology in data preparation process, as well as presenting our proposed hybrid predictive analytics for the case study. Section 4 compares our results with other existing methodologies and concludes our managerial implications for printing industry.



Figure 1 The example of collected paper on the pallet before transferring to production process

2. Literature Review

The literature review is structured as follows. Firstly, some work-in-process inventory management case studies are presented. Secondly, the concept of Paper Counting in printing production are reviewed. Thirdly, the application of forecasting techniques is proposed and demonstrated in counting estimation cases. Lastly, the research gaps in existing works are provided. These reviews will be the starting point to construct the hybrid machine learning approach in this study.

2.1 Work-in-Process Inventory Management in Printing Industry

Managing work-in-process inventory level is crucial for the printing industry. In this industry, there are many parts of WIP inventory throughout the production floor, such as printed papers, coated papers, folder papers, hard cover, sewn book contents, etc., that require continuous monitoring to ensure the availability before entering the next production processes. As a result, cost management in various logistics activities is reduced and more appropriate [4].

The first study [5] examined the concept of inventory management from a case study of printing industry. Inventory management vulnerabilities cause the total cost of the

organization to increase. The researcher suggested that such companies should have good strategies for managing and controlling the intake of raw materials used in production. Another work [6] also showed the application of Lean system to reduce wastage in the printing production process, such as reducing the time to change jobs through work measurement, visual control or preparing and managing material areas. The research has shown that Lean-based methodologies have increased efficiency in the production process, such as reducing printer set-up time by 57%, reducing the time required for writing customer claims by 37%, and reducing the number of times required to set up a printer. Subsequent research [7] has brought innovations to upgrade the production process to be more business-friendly and sustainable. By applying several innovations, for example, the use of Flexographic printing technology, energy and raw material consumption during the production process can be reduced by 10-12%, which is suitable for mass production of the same job.

From the research mentioned, we found that inventory management is crucial to the printing industry, as cost control is the sustainable solution for the industry.

2.2 Paper Counting in Printing Production

Paper counting is a mandatory and important operation in printing and packaging industry. The first work [8] proposed a line-scan camera system that can be used to count number of sheets in the paper. The experiments show achievements in a very high accuracy for various sheet like stacks with a thickness > 0.2 mm. However, in real industry conditions, paper thickness can be as small as 0.08 mm or 80 grams of paper sheet. The method cannot be adopted in all cases in the printing production. Another work [9] proposed a new stacked-sheet counting method with a deep learning approach on images of stacked papers which can provide 99% accuracy in counting various thickness. However, the study shows challenges in quality of images in different environments, which cause limitation in various lighting conditions.

2.3 Application of Forecasting Techniques in Counting Estimation

Recently, there are various kinds of forecasting techniques that have already been implemented in many industrial sectors including the printing. Due to the main contribution

in the paper counting estimation, all relevant forecasting techniques are categorized into two groups: statistics-based, and recurrent neural network. All details are demonstrated below.

2.3.1 Statistics-Based

The first study [10] examined and compared forecasted data and actual data. The factors studied consisted of paper demand, price and total cost in the paper manufacturing industry. The researchers suggest that techniques for forecasting factors in the paper industry should be developed to provide accuracy and forecast information that is closer to the real data. Subsequently, a second study [11] examined predictive techniques using convolutional neural network (MLP) and traditional forecasting techniques (ARIMA, SES, DES, HWES) applied to forecasting the rate of printing and writing paper usage in Iran. Comparing the techniques, MLP provides higher accuracy than other techniques. It is suitable for use in 5-year forecasts, and another work [12] studied the paper boxes and packaging using ABC Classification principles to group products based on consumptions. The researcher then randomly draws 2 items with inventory problems for forecasting using traditional forecasting techniques (SMA, WMA, SES, HWES), and using the forecast results to calculate the order quantity. From the experiments, it was found that the SMA, HWES techniques were more accurate than other forecasting techniques and the cost of inventory storage is reduced by 72-81 %.

2.3.2 Recurrent Neural Network (RNN)

Neural network models are inspired by studies of the information-processing abilities of the human brain. A recurrent neural network (RNN) is a class of artificial neural networks where connections between nodes form a directed or undirected graph along a temporal sequence. This allows it to exhibit more temporal dynamic behaviour. The models have been successfully applied in a variety of business fields including management information systems [13-15], marketing [16, 17], and production management [18-20, 21].

Long Short-Term Memory (LSTM) Neural network is one of the most successful recurrent neural networks that usually be implemented in various applications. LSTM model is constructed by backpropagation through time (BPTT) [22], which is different from feed-forward neural network. In addition, LSTM model requires to setup hyper-parameters such

as number of epochs, number of hidden layers and neural units, activation functions, and optimizers to make better prediction [23, 24]. LSTM model will also be implemented in this study. The example structure of LSTM blocks is shown in figure 2.

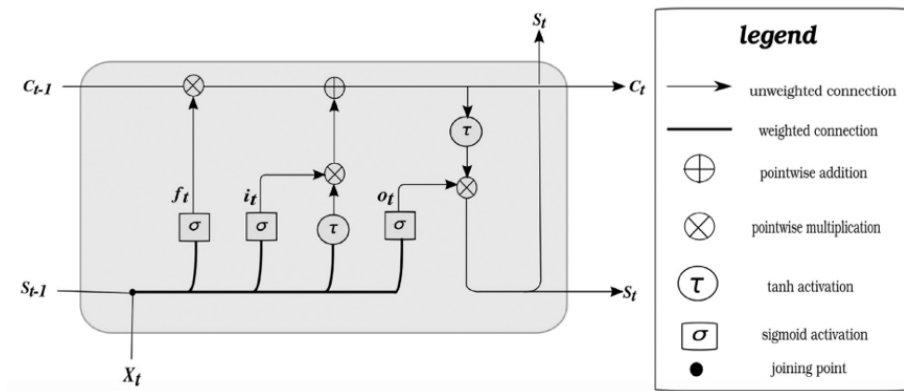


Figure 2 The example structure of LSTM model [23]

2.4 Research Gap

From the literature review on two issues: inventory level management; and demand forecasting, we found that there are theoretical principles and interesting research examples that can be applied to this research. This research will focus on data clustering using principles of partitional clustering process and data prediction with fixed-answer learning. The technique to be used is Reverse LSTM neural network and results will be compared with traditional forecasting techniques. After that, the acquired forecast value will be used in the process of cost calculation and planning the amount of printing and writing paper that will be used in the next production.

3. Research Methodology

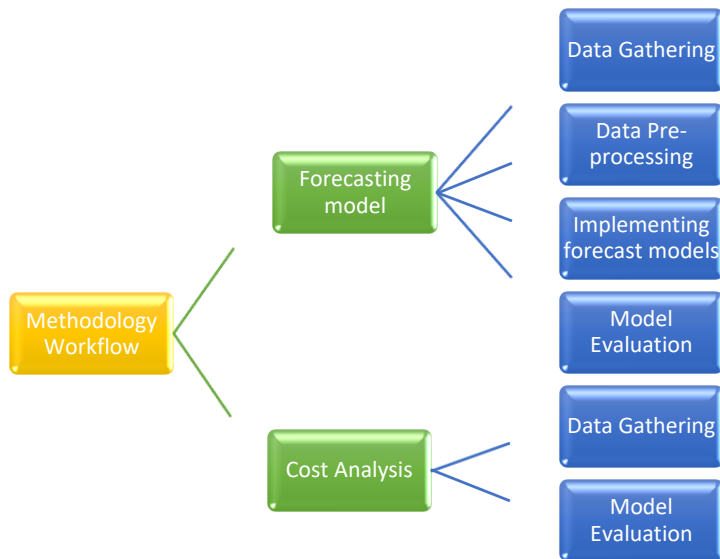


Figure 3 Methodology workflow of this research

3.1 Forecasting Model

3.1.1 Data Gathering

The data acquiring procedure is as follows. We recorded various types of data that are assumed to be related to the sheet counts which are:

- 1) Paper Type (e.g., Woodfree, Art, Duplex board)
- 2) Paper Brand
- 3) Paper GSM (Grams per Square Meter)
- 4) Paper Source (Customer Supplied, Supplier, Own cutting machine)
- 5) Printing Status
- 6) Stacked Sheet Height (cm.)
- 7) Remarks (other conditions that might affect the height of the paper stacks, such as a stack of more than 1 pallets)

The parameters above are collected from the order planning system. For stacked sheet counts and stacked sheet heights, we modified the time sheet system for the operators to record stacked sheet counts and stacked sheet heights at the end of each production process. For example, at the paper cutting process where the rolls of paper are being cut

into sheets, at the printing machines where the printed sheet papers are produced. The operators were asked to use the measuring tape to measure the height and put the information into the timesheet system, while the paper count can be recorded by the machine counters and the operators were asked not to manually remove papers out when the records occurred. In addition, regarding the large dataset, we implement a partitional clustering, which is K-Means, to group the data based on similar characters of input parameters. We choose a cluster data that has high volume of printed sheet papers to train and evaluate forecasting models. More than 5,000 of data points were collected. To summarize, we have 12 paper categories from 3 different sources, 90 different paper brands, the paper GSM ranges from 60 gsm. to 500 gsm. with various paper heights from 1 cm. to 204 cm. at an average of 90.5 cm. The data is used further in data pre-processing.

3.1.2 Data Pre-processing

All pre-processing (such as data cleaning and data transformation) required input and output data that make the data applicable and reduce bias in the dataset [25, 26]. There are many solutions to transform data. Data normalization is chosen to transform all required data in this study. The concept of data normalization is to normalize all input data being the same scale before training a model. In this study, the fit_transform method in the MinMaxScaler function from Python is implemented to normalize data. After finishing this step, all transformed data will be transferred to train forecasting models in the next step.

3.1.3 Implementing Proposed Forecasting Models

There are three steps to implement proposed forecasting models. All details are described as shown below.

1) Firstly, we divide the dataset into 75% of training data and 25% of validating data. In addition, we split dataset randomly using 10-fold cross validation technique.

2) Secondly, the dataset is trained and validated using both statistic and recurrent neural network forecasting models.

2.1) For statistic models, Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with exogeneous factors (SARIMAX) and Multiple Linear Regression (MLR) are proposed due to

the forecast characteristic as mentioned in the literature above. These two models are proper statistical techniques to forecast linear behaviours and trends in complex problems [27, 28].

2.2) For a recurrent neural network model, Long Short-Term Memory (LSTM) is considered to forecast the prepared number of printed sheet papers in the production process. LSTM model works well with non-linear trends and captures the forecast pattern using historical data [23, 29]. We configure four hyper-parameters: number of hidden layers, number of hidden neurons, activation functions, and optimizers. The algorithm in [24] will automatically choose the configuration that provide the lowest MAPE, RMSE and highest R^2 scores.

3) Thirdly, we propose hybrid forecasting models by combining two single models. The objective is to support the forecasting trend, both linear and non-linear. Therefore, one hybrid forecasting model will be composed of a statistic model and a neural network model. Regarding the mentioned criteria, two hybrid models are investigated in this study.

3.1) The first model is the hybrid LSTM-MLR.

3.2) The second model is the hybrid LSTM-SARIMAX.

These two hybrid models are inspired by [30], which provided the combination between feedforward neural network and statistic forecasting models. However, the recurrent neural network exhibits good performance with complex forecasting problems such as production capacity and complex time-series data after comparing with the feedforward neural network [31, 32]. Therefore, it would be an interesting perspective to enhance the forecasting performance using the combination between recurrent neural network and statistic models.

After finishing the experiment with all five forecasting models, we will evaluate the forecasting performance. All details will be presented in the model evaluation section.

3.1.4 Model Evaluation

We perform all five forecasting models in both accuracy and correlation aspects. For the accuracy aspect, we implement the Mean Absolute Percentage Error (MAPE), the Mean Absolute Error (MAE), and the Root Mean Square Error (RMSE) to evaluate the error gaps in quantity and percentage [33, 34]. For the correlation aspect, the coefficient of determination (R^2) is considered to evaluate the correlation between forecast and actual quantities [35]. The formula of these indicators will be described below.

1) Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{|X_i - Y_i|}{|X_i|} * 100 \quad (1)$$

2) Mean Absolute Error (MAE)

$$MAE = \frac{\sum_i^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (2)$$

3) Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

4) Coefficient of determination (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_i^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (4)$$

where X_i is the actual demand for order i , Y_i is the forecast demand for order i and n is the forecast period

Additionally, we implement all forecasting models to forecast the number of prepared papers at the production process in three different datasets.

- 1) Small dataset with 104 samples
- 2) Medium dataset with 440 samples
- 3) Large dataset with 5188 samples

In each dataset, we implement the featured selection method, which is Backward Elimination [36], to choose some input parameters that impact the quantity of prepared paper. These input parameters are chosen based on the p-value of less than 0.05 (confident interval at 95%). Then, paper category, paper brand, grams of paper (GSM), paper source, and the tall size of paper are considered as input parameters. The quantity of prepared paper is considered as an output of each dataset.

3.2 Cost Analysis

3.2.1 Data Gathering

To conduct cost analysis, we use actual historical data, i.e., machine speed, material cost, labor cost, and overhead cost to calculate the cost of shortage and overproduction. The shortage cost occurs when the amount of sheets processed is less than the required amount. The previous process has to be fulfilled to cover the shortage before going to the next process. The cost analysis does not concern the wait time that occurs during the shortage. The overproduction cost is calculated using the paper cost and the material consumption used in the process.

3.2.2 Model Evaluation

To conduct model comparison, we calculate the cost from each forecast output and summarize whether the forecast output causes overproduction or shortage. The cost from all outputs is summarized. As number of data points are different based on the size of the dataset, we normalize the data to the range of 0 to 1 and compare the performance.

4. Results and Analysis

4.1 Evaluation of the Forecasting Model Performance

We experiment all forecasting models in three main datasets, which are small, medium, and large datasets. All details are described below. In addition, the results in Table 1-3 and Figure 4-6 will be demonstrated at the end of section 4.

4.1.1 Result of small dataset:

Regarding the results mentioned in Table 1, we experiment with the forecasting performance in five forecasting models. Also, we consider five forecasting inputs: Paper Type, Paper Brand, Paper GSM, Paper Source, and Stacked Sheet Height. The forecasting output is the number of printed sheet papers. The data proportion is divided into 75% training data and 25% validating data. The hybrid LSTM-SARIMAX provides the best performance with accuracy aspect, which is measured by the lowest MAE and RMSE, while the hybrid LSTM-MLR provides the best score of MAPE. For the coefficient of determination (R^2), the hybrid LSTM-SARIMAX still provides the highest score after comparing with other models.

We can see the performance of the Hybrid LSTM-SARIMAX via Figure 4. For the overall performance, we can see that both hybrid models outperform than single models.

Table 1 The forecasting models' comparison with a small dataset (104 observations)

Forecasting Model	MAPE	MAE	RMSE	R ²
SARIMAX	65.18	1,235.82	1,790.74	0.908
MLR	58.66	1,468.44	1,771.55	0.895
LSTM	20.99	855.37	1,157.85	0.970
Hybrid LSTM-MLR	10.45	698.13	1,070.50	0.976
Hybrid LSTM-SARIMAX	12.51	679.68	987.29	0.980

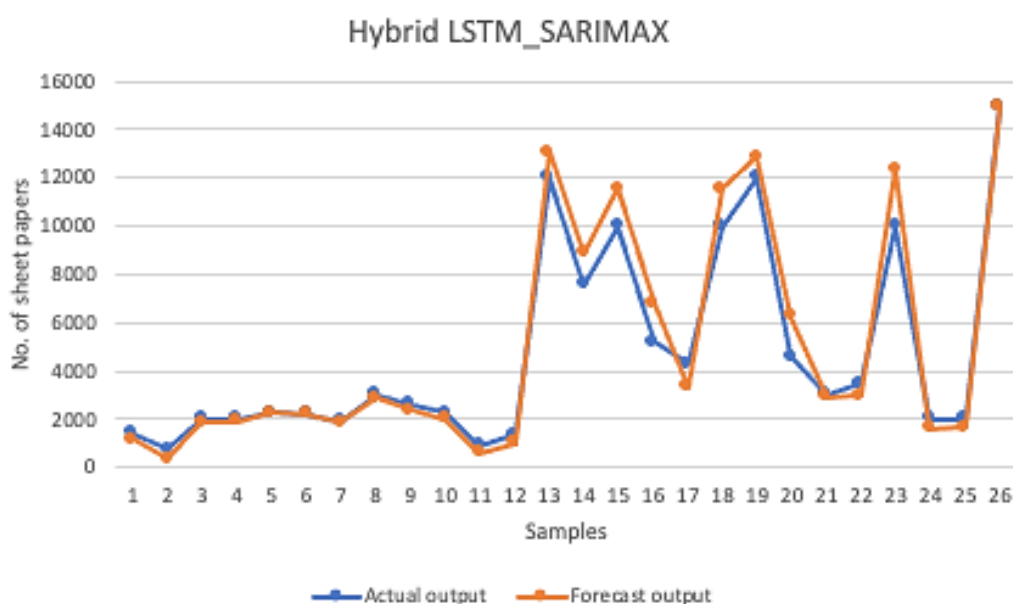


Figure 4 The comparison between actual and forecast outputs with the hybrid LSTM-SARIMAX with a small dataset

4.1.2 Result of medium dataset:

Regarding the results mentioned in Table 2, we experiment with the forecasting performance in five forecasting models. Also, we consider five forecasting inputs and one output the same as the small dataset. The proportion of training and validating data is the

same as a small dataset. The hybrid LSTM-MLR provides the best performance with accuracy aspect, which is measured by lowest MAPE, MAE, and RMSE, while the hybrid LSTM-SARIMAX provides the best score of R^2 . However, the hybrid LSTM-MLR has similar score of R^2 with LSTM-SARIMAX. We can see the performance of the Hybrid LSTM-MLR via Figure 5. The performance of these two hybrid models is quite similar and outperform after comparing with single models.

Table 2 The forecasting models' comparison with a medium dataset (440 observations)

Forecasting Model	MAPE	MAE	RMSE	R^2
SARIMAX	65.81	2,072.88	2,316.93	0.883
MLR	63.67	1,498.32	1,776.03	0.896
LSTM	15.11	652.46	954.01	0.959
Hybrid LSTM-MLR	14.36	500.46	760.34	0.975
Hybrid LSTM-SARIMAX	16.85	623.14	847.70	0.978

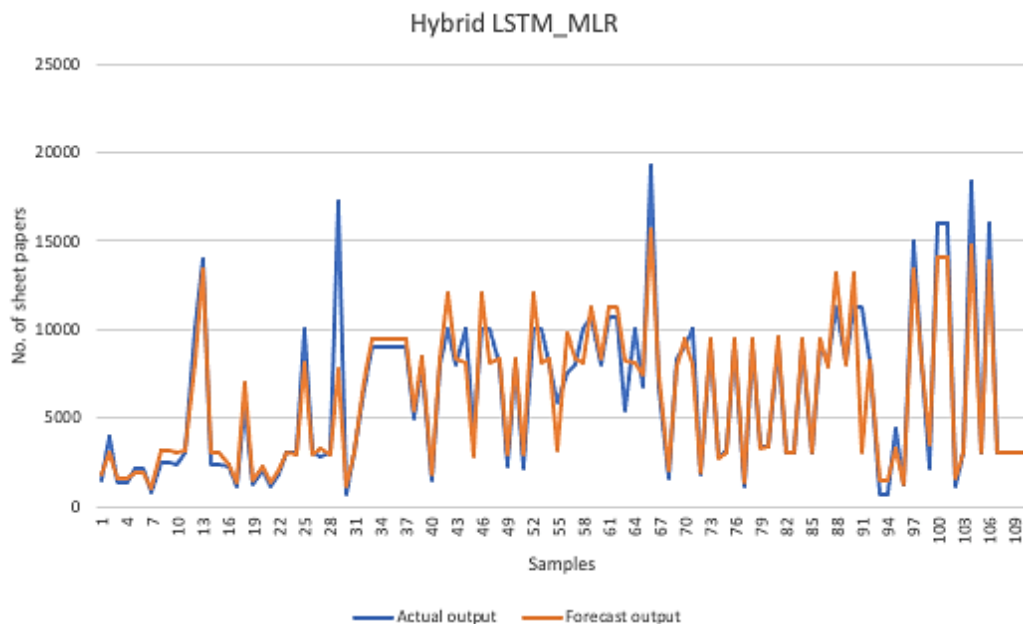


Figure 5 The comparison between actual and forecast outputs with the hybrid LSTM-MLR with a medium dataset

4.1.3 Result of large dataset:

Regarding the results mentioned in Table 3, we experiment with the forecasting performance with five forecasting models. Also, we consider five forecasting inputs and one output the same as the small and medium datasets. The proportion of training and validating data is the same as a small dataset. The single LSTM provides the best performance in both the accuracy (MAE, MAPE) and the coefficient of determination aspects. We can see the performance of the LSTM via Figure 6. Nevertheless, the performance of hybrid LSTM-MLR and LSTM-SARIMAX are similar to the single LSTM model based on all accuracy indicators and the coefficient of determination.

Table 3 The forecasting models' comparison with a large dataset (5188 observations)

Forecasting Model	MAPE	MAE	RMSE	R ²
SARIMAX	125.26	1,939.23	2,838.99	0.533
MLR	137.80	2,105.22	3,003.88	0.539
LSTM	20.39	401.47	705.85	0.978
Hybrid LSTM-MLR	27.89	429.41	656.00	0.978
Hybrid LSTM-SARIMAX	31.69	463.33	704.16	0.973

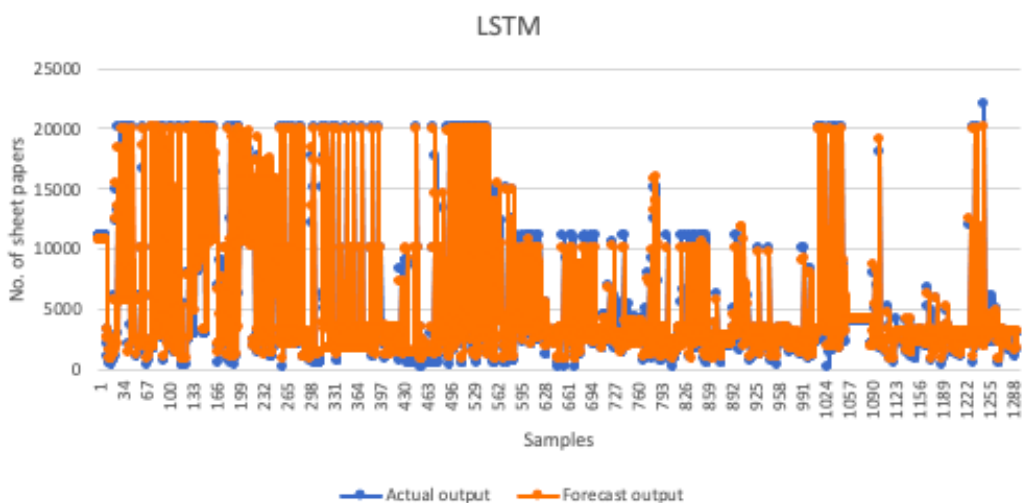


Figure 6 The comparison between actual and forecast outputs with the LSTM model with a large dataset

Based on the investigation of forecasting performance from three datasets, we can find that the hybrid models, both LSTM-SARIMAX and LSTM-MRL, provide the best performance on both small and medium datasets. However, for the large dataset, the single LSTM provides the best performance in both the accuracy and the coefficient of determination scores. Both hybrid models still provide similar performance to the single LSTM model in the large dataset. One of the interesting reasons why the hybrid model indicates higher error gaps and lower correlation in the large dataset is the large error gaps on both MLR and SARIMAX. These error gaps from these two models will impact the performance of hybrid forecasting models. Conversely, the hybrid models achieve better forecasting performance for overall results after comparing with single forecasting models. The advantage of hybrid models in this study show that they deliver good forecasting results with both linear and non-linear trends for counting printed sheet papers.

The forecast output from three datasets will be implemented to do the costing analysis. In this case, we would like to demonstrate how the forecast output impact the total cost in the production process. All details will be described in the evaluation of the costing performance section.

4.2 Evaluation of the Costing Performance

In addition to forecasting accuracy, we compare the process cost that occurs when using different forecasting systems. The cost can be categorized into 2 different groups: underestimate and overestimate costs. The underestimate cost occurs when the prediction amount is less than the actual amount of paper on the pallet. This causes the problem in the next production process. If the worker finds out later that the amount of paper is less than the required amount during the consequent production process, the worker must rework the previous processes all over again to compensate the paper shortage. On the other hand, overestimate cost represents the cost that occurs when the prediction amount is more than the actual one. The surplus of the paper is therefore an overproduction cost. We can summarize the additional cost that occurs from both overestimate cost and underestimate cost as shown in Table 4 and Figure 7. Our proposed hybrid approaches show promising results. Hybrid LSTM&MLR model shows the lowest cost in small-sized and large-sized datasets, while the hybrid LSTM&SARIMAX model shows the lowest cost in medium-sized dataset.

These results demonstrate that both hybrid models can help the company reducing both overestimate and underestimate costs in the production process.

Table 4 Cost Comparison

Forecasting Model	Cost			Normalized Cost		
	Small	Medium	Large	Small	Medium	Large
SARIMAX	816,440.19	1,373,386.30	40,952,587.61	1.00	0.46	1.00
MLR	656,762.91	2,339,267.15	31,287,155.14	0.76	1.00	0.67
LSTM	212,539.82	594,108.07	12,005,481.17	0.09	0.03	0.01
Hybrid LSTM-MLR	151,377.71	542,278.55	11,587,522.81	-	0.00	-
Hybrid LSTM-SARIMAX	172,725.61	534,812.96	11,870,174.28	0.03	-	0.01

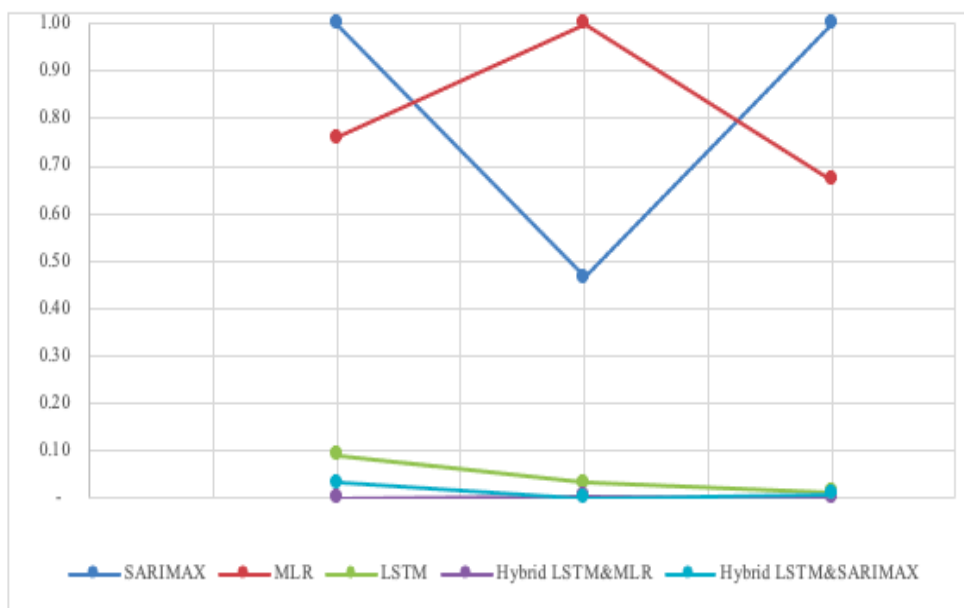


Figure 7 The cost comparison with different forecast models

4.3 Managerial Implications

The current production procedure can be summarized in Figure 8. Without the hybrid forecasting model, the operator at the consequent production process has to confirm the

quantity of the stacked sheet on the pallets before starting the production process. If the shortage occurs at this stage, the operator has to inform the production planner to schedule rework. With the hybrid forecasting model, as shown in Figure 9, the operator at the consequent production process does not need to confirm the stacked sheet quantity, thus the production process will be more continuous without unnecessary wait time.

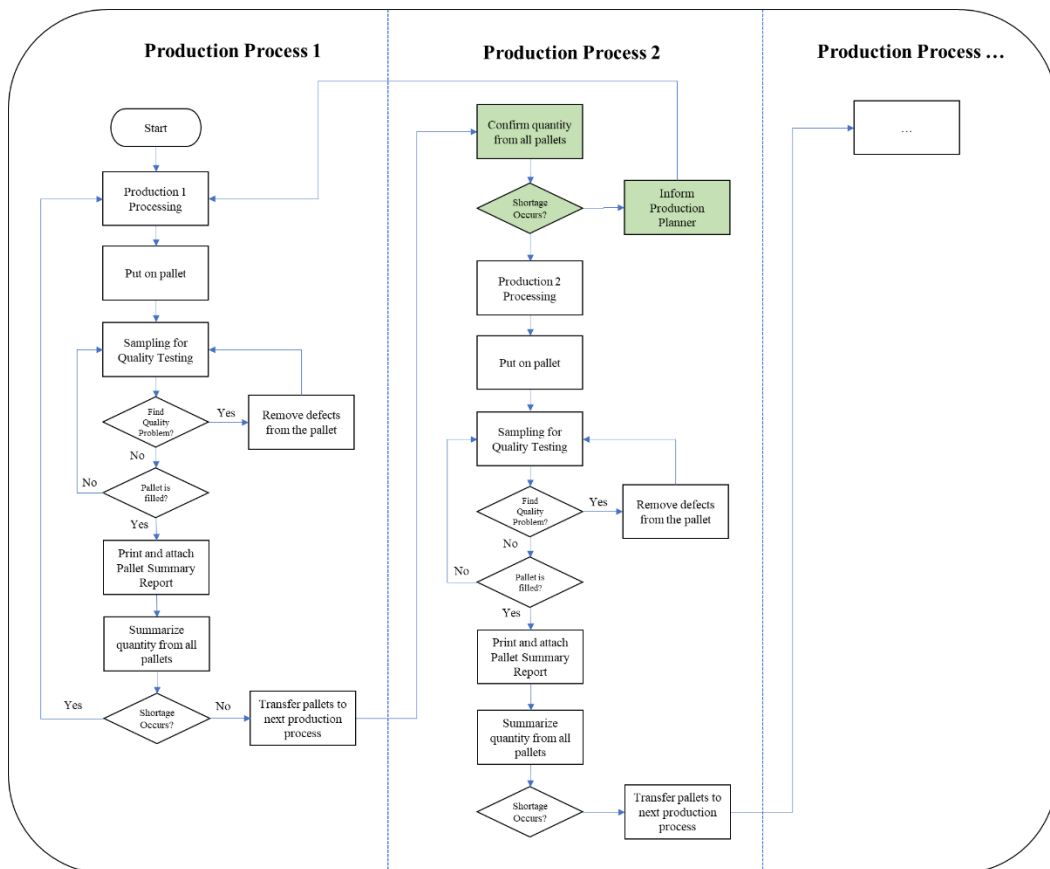


Figure 8 Operation Processes (Before Improvement)

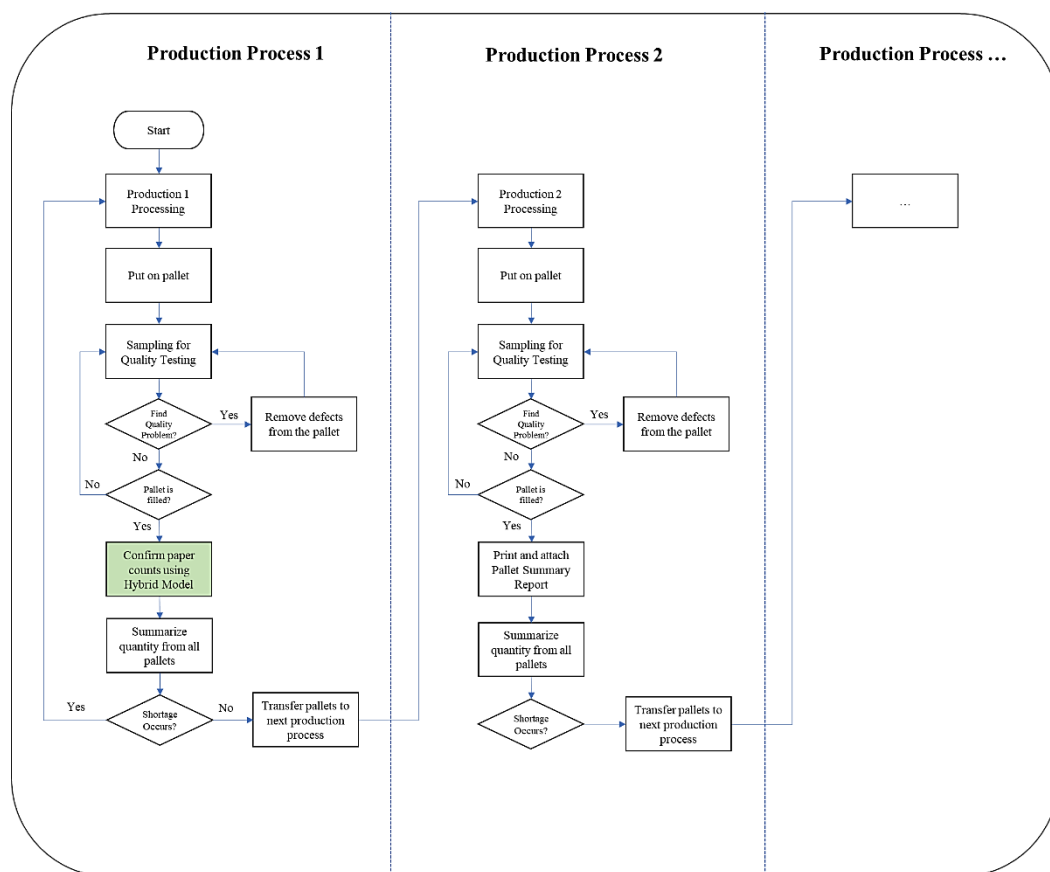


Figure 9 Operation Processes (After Improvement)

5. Conclusions

In this study, we propose a hybrid forecasting approach to support production floor operation in printing industry. The forecasting techniques can help operators to easily determine the quantity of stacked sheet papers by using a simple technique like measurement tapes. Moreover, the hybrid approach can reduce the problem of overestimate and underestimate costs in the production process. The system can be implemented in any stacked sheet papers throughout the company's production processes without concerning various lighting conditions like other novel concepts, such as image processing and laser counter. It is by far one of the most cost-effective options to handle this problem. In addition, this approach does not limit with paper counting only. This approach can be applied in the counting process of other types of raw materials and finish goods that require precise

quantity, but the counting process is too complicated and time-consuming, such as, plastic sheets, aluminum sheets, etc.

References

- [1] The Thai Printing Association. The rise of Print Media 2021. Thai Magazine [internet] 2021 May 14 [cited 2022 Jul 1];130. Available from: <https://www.thaiprint.org/2021/05/vol130/industrial130-01/> (in Thai)
- [2] GNEWS. The export revenue from paper packaging. DITP [Internet]. 2021 [cited 2022 Jul 1]. Available from: <https://gnews.apps.go.th/news?news=32790> (in Thai)
- [3] Micol Policarpo L, da Silveira DE, da Rosa Righi R, Antunes Stoffel R, da Costa CA, Victória Barbosa JL, et al. Machine learning through the lens of e-commerce initiatives: An up-to-date systematic literature review. *Computer Science Review* 2021;41:100414.
- [4] Stevenson WJ, Sum CC. *Operations management*. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill Education (Asia); 2014.
- [5] Hegde S. Six Inventory control techniques for the printing industry [Internet]. 2020 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://publication.sipmm.edu.sg/six-inventory-control-techniques-printing-industry/>
- [6] Chokpaiboon K. *The Application of Lean Manufacturing: A Case Study of Printing Process* [thesis]. Bangkok: Srinakharinwirot University; 2012. (in Thai)
- [7] Lipiak J, Salwin M. The improvement of sustainability with reference to the printing industry—case study. In: Hamrol A, Grabowska M, Maletic D, Woll R, editors. *Advances in Manufacturing II Volume 3 - Quality Engineering and Management*. Springer, Cham; 2019. p. 254–66.
- [8] Chen T, Wang Y, Xiao C. An apparatus and method for real-time stacked sheets counting with line-scan cameras. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2015;64(7):1876–84.
- [9] Pham D, Ha M, San C, Xiao C. Accurate stacked-sheet counting method based on deep learning. *Journal of the Optical Society of America A* 2020;37(7):1206-18.
- [10] Hämäläinen E, Tapaninen U. Accuracy of forecasting in a Nordic paper mill's supply chain: a case study. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography* 2011;65(2):104–13.
- [11] Tavakkoli A, Hemmasi AH, Talaeipour M, Bazayr B, Tajdini A. Forecasting of printing

- and writing paper consumption in Iran using artificial neural network and classical methods. Iranian journal of Wood and Paper Science Research 2015;30(4): 632-51.
- [12] Pumkasron P, Uraichot P. The study of forecasting models and appropriate inventory management case study: carton packaging. Thai Industrial Engineering Network Journal. 2015;1(1):14-22. (in Thai)
- [13] Huang SJ, Chiu NH, Chen LW. Integration of the grey relational analysis with genetic algorithm for software effort estimation. European Journal of Operational Research 2008;188(3):898-909.
- [14] Kuflik T, Boger Z, Shoal P. Filtering search results using an optimal set of terms identified by an artificial neural network. Information Processing and Management 2006;42(2):469-83.
- [15] Zhu D, Premkumar G, Zhang X, Chu CH. Data mining for network intrusion detection: a comparison of alternative methods. Decision Sciences [Internet]. 2001 [cited 2022 Jul 1];32(4):635-60. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1540-5915.2001.tb00975.x>
- [16] Kim YS, Street WN, Russell GJ, Menczer F. Customer targeting: a neural network approach guided by genetic algorithms. Management Science [Internet]. 2005 [cited 2022 Jul 1]; 51(2): 264-76 Available from: <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.1040.0296>
- [17] Thieme RJ, Song M, Calantone RJ. Artificial Neural Network Decision Support Systems for New Product Development Project Selection. Journal of Marketing Research [Internet]. 2018 [cited 2022 Jul 1];37(4):499-507. Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1509/jmkr.37.4.499.18790>
- [18] Al-Ahmari AMA. Prediction and optimisation models for turning operations. International Journal of Production Research [Internet]. 2008 [cited 2022 Jul 1];46(15):4061-81. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540601113265>
- [19] Bhattacharyya P, Sengupta D, Mukhopadhyay S, Chattopadhyay AB. On-line tool condition monitoring in face milling using current and power signals. International Journal of Production Research [Internet]. 2008 [cited 2022 Jul 1];46(4):1187-201. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540600940288>
- [20] Das P, Datta S. Exploring the non-linearity in empirical modelling of a steel system using statistical and neural network models. International Journal of Production Research [Internet]. 2007 [cited 2022 Jul 1];45(3):699-717 [cited 2022 Jul 1]. Available

from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540600792465>

- [21] Wang KJ, Chen JC, Lin YS. A hybrid knowledge discovery model using decision tree and neural network for selecting dispatching rules of a semiconductor final testing factory. *Production Planning and Control* [Internet]. 2005 [cited 2022 Jul 1];16(7):665–80. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09537280500213757>
- [22] Werbos PJ. Backpropagation through time: what it does and how to do it. *Proceedings of the IEEE* [Internet] 1990 [cited 2022 Jul 1];78(10):1550-60. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/58337/?reload=true>
- [23] Sagheer A, Kotb M. Time series forecasting of petroleum production using deep LSTM recurrent networks. *Neurocomputing* [Internet] 2019 [cited 2022 Jul 1];323:203-13. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.09.082>
- [24] Kantasa-ard A, Nouri M, Bekrar A, Ait el cadi A, Sallez Y. Machine Learning in forecasting in the Physical Internet: a case study of agricultural products in Thailand. *International Journal of Production Research* 2021;59(24):7491–515.
- [25] Zhang GP, Qi M. Neural network forecasting for seasonal and trend time series. *European Journal of Operational Research* 2005;160(2):501-14.
- [26] Cadavid JP, Lamouri S, Grabot B, Fortin A. Machine learning in production planning and control: A review of empirical literature. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(13):385-90.
- [27] Navya N. Forecasting of futures trading volume of selected agricultural commodities using neural networks [thesis]. Bangalore, India: University of Agricultural Sciences GKVK; 2011.
- [28] Benkachcha S, Benhra J, El Hassani H. Seasonal time series forecasting models based on artificial neural network. *International Journal of Computer Applications* [Internet] 2015 [cited 2022 Aug 1];116(20):9-14. Available from: <http://research.ijcaonline.org/volume116/number20/pxc3902805.pdf>
- [29] Greff K, Srivastava RK, Koutnik J, Steunebrink BR, Schmidhuber J. LSTM: A Search Space Odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 2017;28(10):2222-32.
- [30] Pham VC, Pham NC. Developing the hybrid forecasting model on the short-term. *ICIC Express Letters* 2020;14(10):1017-24.
- [31] Carbonneau R, Laframboise K, Vahidov R. Application of machine learning techniques for supply chain demand forecasting. *European Journal of Operational Research*

2008;184(3):1140-54.

- [32] The MathWorks . Using MATLAB version 6. USA: The MathWorks; 2000.
- [33] Hyndman RJ, Koehler AB. Another look at measures of forecast accuracy. International Journal of Forecasting [Internet]. 2006 [cited 2022 Aug 1];22(4):679-88. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207006000239>
- [34] Acar Y, Gardner ES. Forecasting method selection in a global supply chain. International Journal of Forecasting 2012;28(4):842-8.
- [35] Cao J, Li Z, Li J. Financial time series forecasting model based on CEEMDAN and LSTM. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications [Internet]. 2019 [cited 2022 Aug 1];519:127–39. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.11.061>
- [36] Chaierk R, Chokagorn P, Chantophas W. Variable Selection in Multiple Linear Regression Analysis [Internet]. 2017 [cited 2022 Sep 30]. Available from: http://sc2.kku.ac.th/stat/statweb/images/Eventpic/60/Seminar/01_11_.pdf (in Thai).

Author's Profile



Paronkasom Indradat

Lecturer at Faculty of Logistics, Burapha University. 169 LongHad Bangsean, Seansuk, Muang, Chonburi 20130, Thailand

Email: paronkasom.in@buu.ac.th

Domain: Supply Chain Optimization, Simulation, Decision Support



Anirut Kantasa-ard, Ph.D.

Lecturer at Faculty of Logistics, Burapha University. 169 LongHad Bangsean, Seansuk, Muang, Chonburi 20130, Thailand

Email: anirut.ka@buu.ac.th

Domain: Supply Chain Optimization, Forecasting, Decision Support

Article History:

Received: July 22, 2022

Revised: December 8, 2022

Accepted: December 8, 2022

SIGNAL CONTROL OF A ROUNDABOUT WITH LIGHT RAILWAY TRANSPORTATION OPERATION (CASE STUDY: PHUKET LIGHT RAILWAY TRANSIT, SURIN CLOCK TOWER)

Phattarin Yongcharoen¹ and Siradol Siridhara²

¹Master Student, The Cluster of Logistics and Rail Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, 25/25 Phuttamonthon 4 Rd, Salaya, Phuttamonthon, Nakhon Pathom 73170, Thailand, phattarin.y@gmail.com,

²Lecturer, The Cluster of Logistics and Rail Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, 25/25 Phuttamonthon 4 Rd, Salaya, Phuttamonthon, Nakhon Pathom 73170, Thailand, siradol.sir@mahidol.ac.th

ABSTRACT

An at-grade light rail project has been initiated in Phuket, Thailand. The line runs through the city streets with several signalized intersections and large roundabouts. The study aims to explore traffic control strategies in order to provide transit progression while minimizing delays in other vehicles. A software package, TRANSYT, was used to establish the optimized signal timing and coordination. VISSIM, a microscopic simulation software package, was also employed to simulate and evaluate the efficiency measures to recommend the best scenario. The test scenarios included 1) unsignalized control without light railway transit (LRT), 2) unsignalized control with yield, 3) unsignalized street vehicle control with actuated signal control for LRT, 4) fixed time signal and 5) signalized street vehicle control with transit actuated signal. The best traffic control scheme was found to be unsignalized street vehicle control with actuated signal control for LRT due to its short queue length and low average street delay.

KEYWORDS: LRT, at-grade intersection, actuated traffic signal, roundabout

1. Introduction

Phuket is one of the most famous tourist destinations in Thailand. Due to the expanding tourism industry, high travel demand, and severe traffic congestion, the Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP) initiated a light railway transit (LRT) project in an

attempt to alleviate traffic congestion, increase the city's mobility, and lower pollution caused by transportation for an eco-friendlier lifestyle and reduction of traffic congestion.

The Phuket LRT project was planned as a 58.6 km route, divided into two phases. The first phase of the project embraces a 41.7 km route from Phuket International Airport to Chalong intersection. The second phase involves an extension to the north from the intersection between Highways 402 and 4026 to Tha Nun station, which is also the future terminal station of the State Railway of Thailand (SRT) Surat Thani-Tha Nun line. The LRT network consists of 24 stations [1]. The project feasibility study was conducted in 2017, and the LRT was due to start the operation in 2021. The project was first specified as a tram system. Later in 2021, the LRT plan was replaced by Autonomous Rail Rapid Transit (ART) [2]. Thus, the design of the project had to be revised accordingly. Nonetheless, both LRT and ART share the same characteristics in that they both are operated on the at-grade “type B” right-of-way which offers an exclusive public transport lane with intermittent at-grade intersections with street traffic [3].

The LRT project in Thailand is relatively new for transport planners. The detailed study on light railway operations has not been carried out to date. One of the most challenging elements is probably the traffic signal timing and phasing which have not been prepared explicitly. The signal plan should be designed to accommodate the uninterrupted movement of transit vehicles while maintaining an acceptable level of service for street vehicles.

This study explores strategies to facilitate transit progression and minimize street vehicle delays at Surin Clock Tower which is a roundabout section included in the second phase of the project. The complex nature of the roundabout calls for special phasing coordination to prevent street gridlock over limited storage space while reserving sufficient green time for transit vehicle movement.

1.1 Physical Properties of the Roundabout

Located in a high-density residential zone of the south urban area, the roundabout has five legs and two circular lanes. The inner diameter of the roundabout is approximately 35 m. Figure 1 illustrates the plan of the roundabout and provides street views of connecting roads.

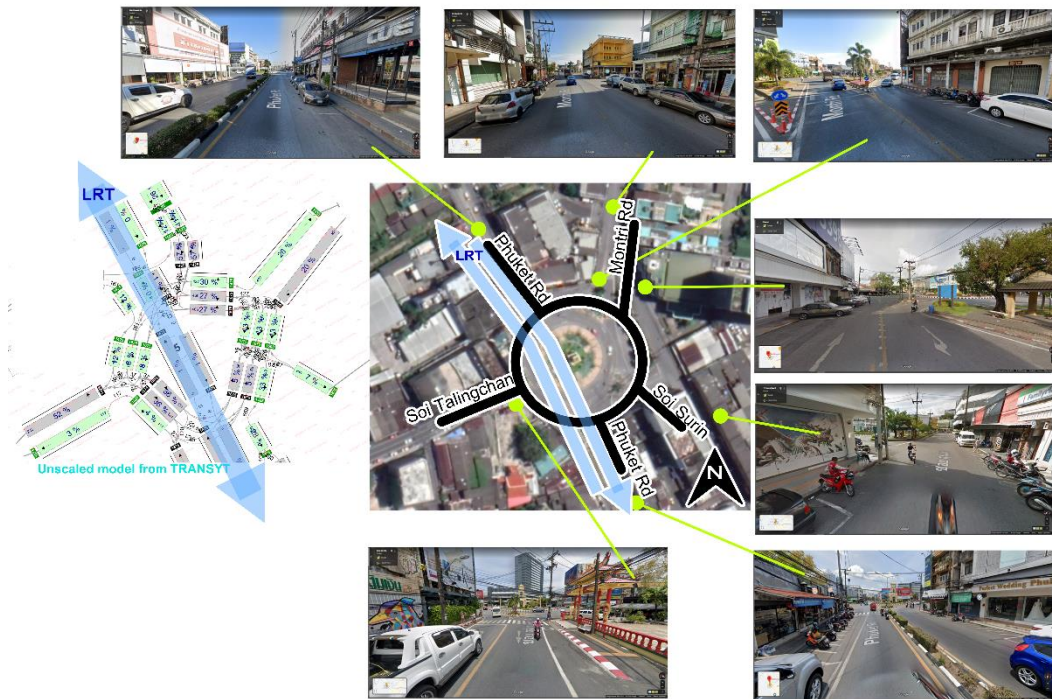


Figure 1 The plan, the TRANSYT model and the roads approaching the Surin Clock Tower roundabout [4]

The roundabout connects 4 roads. Phuket Road is a two-lane road with parking spaces in an approximate north-south direction. Montri Road is a two-lane road with curbside parking spaces connecting the roundabout on the northeast. Soi Surin is a one-way single-lane road with parking spaces and expands to a two-way, two-lane road as it approaches the roundabout on the southeast. Lastly, Soi Talingchan is a two-lane road connecting the roundabout on the west.

1.2 Traffic Management and Transit

At present, the roundabout is unsignalized. Traffic flows clockwise as the left-hand driving rule applies. Priority is given to vehicles in the roundabout over those entering it. As the roundabout geometric design permits, the yield control rule is applied instead of stop control. When LRT is in operation, priority shall be offered to transit vehicles first.

The 2017 feasibility study estimates that the LRT will serve up to 70,000 passengers per day in the opening year 2021 (2564 BE). With the recent proposal for the new system, the railway transit vehicle model for the project has not yet been decided. This study still assumes that traditional electric trams will be used as transit vehicles. The tram specifications define the car length of 30-40 m and the car width of 2.40 or 2.65 m with a capacity of 200 passengers. Tramcars will be driven manually by line-of-sight operation. The service runs at an average speed of 20-40 kph in the Phuket town area and a maximum speed of 80 kph in the outer part of the town. The operation has been flexibly planned to allow coordination with other future projects such as one-way street arrangement and transit-oriented development. The LRT will initially run with an average frequency of 6 cars/hr (headway of 10 minutes) in the town area. The tram will run through Surin Clock Tower Roundabout in both directions of Phuket Road in the first phase of operation.

2. Literature Review

Transit Signal Priority (TSP) gives the transit vehicles priority, which is beneficial to transit cars and results in lower delay. TSP can be categorized into passive, active and adaptive types. Passive signal priority relies on static signal planning and requires no interaction between the traffic signal system and transit vehicles [5]. Active signal priority applies some communication between the traffic signal system and transit vehicles [6]. Adaptive signal priority collects real-time data and adjusts the signal control according to traffic situations.

Passive signal priority is generally carried out at a lower cost since there is no need to install vehicle detectors. On the other hand, active signal priority requires the detection of vehicle presence, speed, and density. The location and alignment of the detectors also affect the performance of the signal at various flow levels. At a higher flow rate, and the further the detector from the intersection, the active setting could better clear queues and lower transit delays [7].

Passive signal priority in the urban area is usually designed to maximize bandwidth for transit vehicle progression. Active signal priority could interrupt the offset of the signal, which could result in negative impacts on the network. There are methods to recover to the original settings, for example, compensating in the next cycle [8]. However, the active signal priority

might have downside effects on the non-prioritized side streets, especially under high flow situations. Delays on side streets would likely increase due to residual queues [9]. The effect on side streets could also be taken into account using a passenger-based approach [10].

3. Materials and Methods

3.1 Data Collection and Management

Traffic volume statistics were collected during morning peak hours over 5 weekdays. Four cameras were set up. The traffic volumes entering and leaving the roundabout at each leg were recorded with the traffic composition as shown in Figure 2. These traffic volumes were then converted into Passenger Car Units (PCU) using the passenger car equivalent (PCE) factors given by OTP, as shown in Table 1. The design turning movement count (TMC) volumes of street vehicles were analyzed as shown in Figure 3. The TMC volumes were distributed proportionally to each traffic node. Table 2 shows traffic volume balancing in the origin-destination matrix (OD matrix). The most critical movement was found to be the north-south movement from nodes 1-10 to nodes 14-16, with a traffic volume of 515 PCUs/hr.

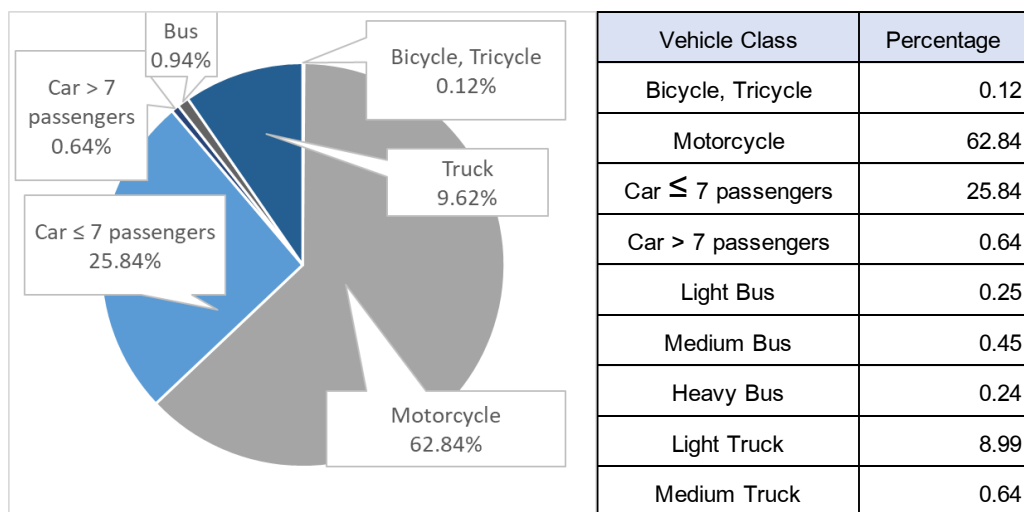


Figure 2 Composition of collected traffic data

Table 1 Passenger Car Equivalent (PCE) Factor [11]

Vehicle Class	PCE factor			
	Urban	Rural	Roundabout	Signalized Intersection
Private Car, Taxi, Light Truck	1.00	1.00	1.00	1.00
Motorcycle	0.75	1.00	0.75	0.33
Medium to heavy truck	2.00	3.00	2.80	1.75
Heavy bus	3.00	3.00	2.80	2.25

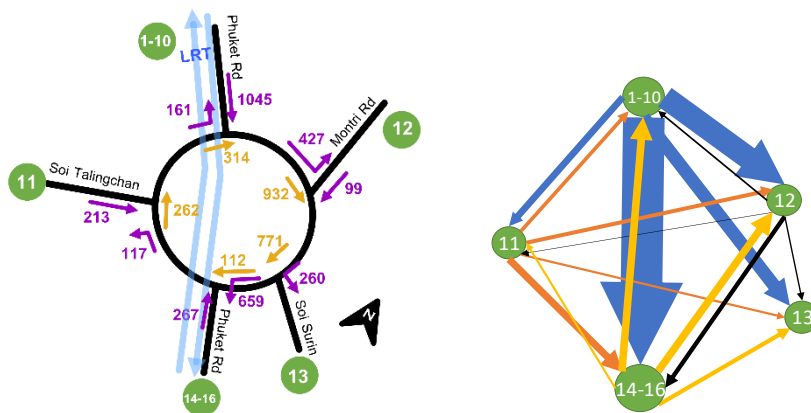


Figure 3 Turning movement counts (TMC) and the desire lines of the volume assigned to Surin Clock Tower Roundabout in PCUs

Table 2 OD matrix (PCUs/hr)

Destination \ Origin	1-10	11	12	13	14-16	Sum
1-10	0	84	284	162	515	1045
11	46	0	50	28	89	213
12	21	6	0	17	55	99
13	0	0	0	0	0	0
14-16	94	27	93	53	0	267
Sum	161	117	427	260	659	

3.2 Assumptions and Scenarios

To simulate traffic operations, assumptions were made as follows:

- 1) The time period of the simulation is within the first ten years of operation
- 2) Transit vehicles run on the median with an exclusive lane (left-hand side)
- 3) Transit drivers drive on sight and are responsible for the safe operation of the vehicle,

i.e., keeping a safe distance between vehicles, respecting radio instructions from the control center, driving at a safe speed and being able to stop safely according to environmental conditions, speed restrictions, LRT signaling color aspects and other operating instructions.

Five scenarios were assigned with the same design volumes. All vehicles run at the cruise speed of 30 kph. The transit vehicles run with a frequency of 6 cars/hr. The five scenarios are set as follows:

3.2.1 SC1: Unsignalized control without LRT

This scenario replicates the base network when the LRT project has not been executed. The street vehicles yielded when entering the roundabout.

3.2.2 SC2: Unsignalized control with yield

This scenario was treated as the base scenario. There is no traffic signal control in the conflict areas. All entering vehicles must yield to vehicles already in the roundabout. Both entering and roundabout vehicles must always yield to the transit vehicles.

3.2.3 SC3: Unsignalized roundabout with actuated signal control for LRT

Street vehicle traffic would run with a green signal with yield in the base scenario. However, LRT vehicles had priority to pass the intersection using the actuated signal. The expressions were as shown in Table 3. The detectors were placed 80 m upstream before the stop. The distance from the detector to the stop was calculated using the LRT speed of 30 kph, intergreen (i.e., yellow plus red time) time of 5 s and LRT deceleration rate of 1.2 m/s^2 . The logic file was created using VISVAP, as shown in Figure 4. Two stages were assigned: Stage 1 for street vehicles and Stage 2 for transit vehicles. When the individual upstream sensor detected a vehicle, it would trigger a request for a transit priority signal.

The signal only changes when all the LRT vehicles that enter the intersection have safely passed the downstream detector.

Table 3 Expressions for VAP logic for SC3

EXPRESSIONS	Contents	Comment
DetNB_UP	Occupancy(501) > 0	Northbound Upstream detector
DetNB_DWN	Occupancy(502) > 0	Northbound Downstream detector
DetSB_UP	Occupancy(503) > 0	Southbound Upstream detector
DetSB_DWN	Occupancy(504) > 0	Southbound Downstream detector

3.2.4 SC4: Fixed Time signal

The signal timing was set to run repeatedly regardless of traffic volume variations. Signal timing was designed using TRANSYT with the focus on reducing transit delay. This is equivalent to the passive transit signal priority where transit delay is minimized by the signal progression. However, if an LRT vehicle arrives during the red time, it must wait for the signal to complete the cycle until the green is given.

3.2.5 SC5: Signalized Street vehicles control with transit actuated signal

The logic file, as shown in Figure 5, was coded based on the existing study [12] and a Vissim tutorial [13]. The expressions were as shown in Table 4. In this scenario, if there was no LRT vehicle approaching the intersection, the signal plan would be the same as in the fixed time signal scenario. If the LRT vehicle approaches the intersection, it runs over the detector placed upstream of the intersection. The upstream detector then sends a signal to actuate the signal control of the intersection. The signal controller gives arriving LRT vehicles priority over other street vehicles to pass the intersection or roundabout by calling the signal stage accommodating LRT movement (Stage 4) after finishing the minimum green time of the current stage. “NEXT” indicates the next stage after finishing Stage 4. The “Excess4” variable stores the excess green time of Stage 4 of the current cycle to compensate by giving more time for other stages by reducing the green time of Stage 4 in the next cycle. After the LRT vehicle has passed the downstream detector, the signal shifts to the stage specified by NEXT.

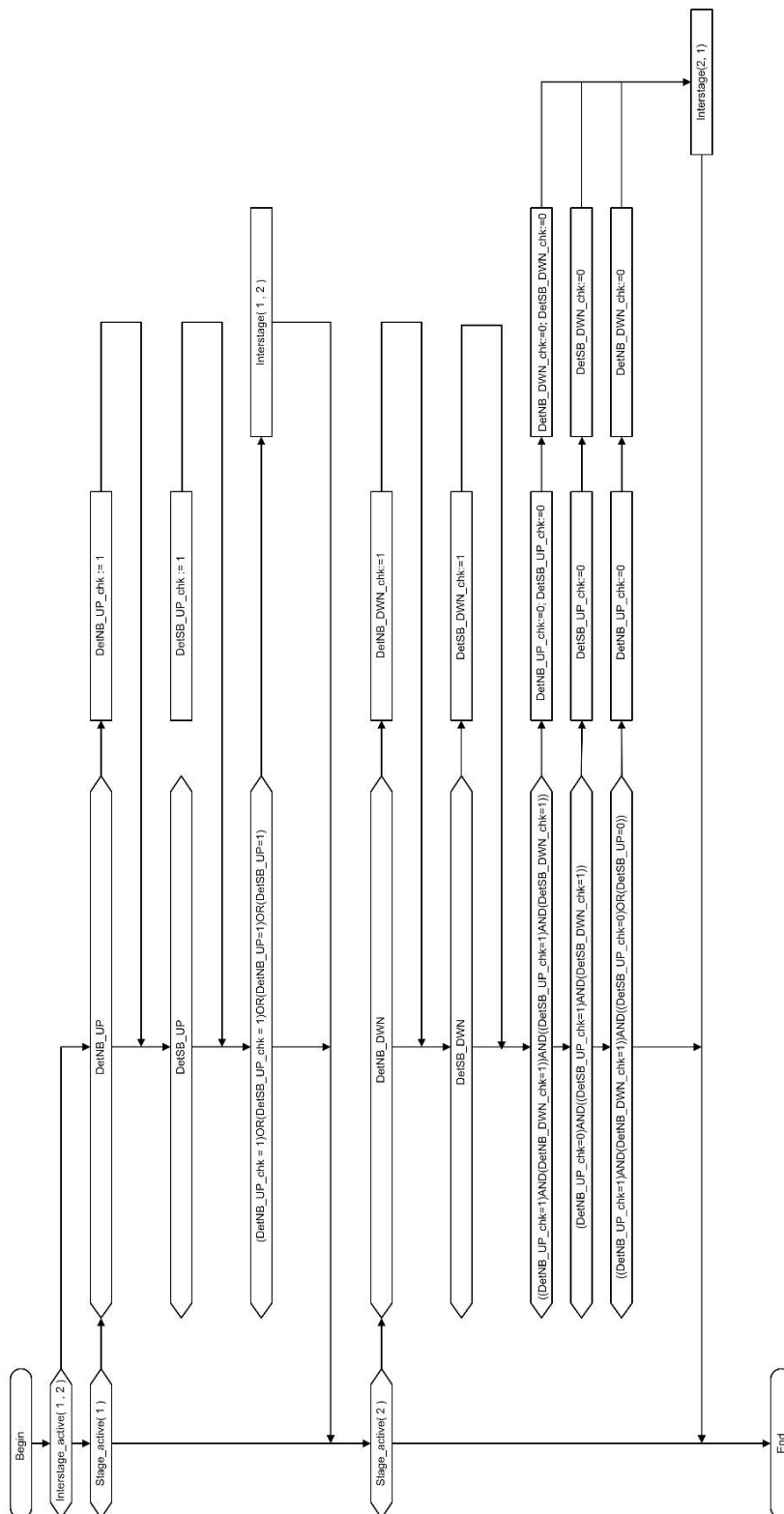


Figure 4 Unsignalized street vehicle control with actuated signal control for transit signal logic

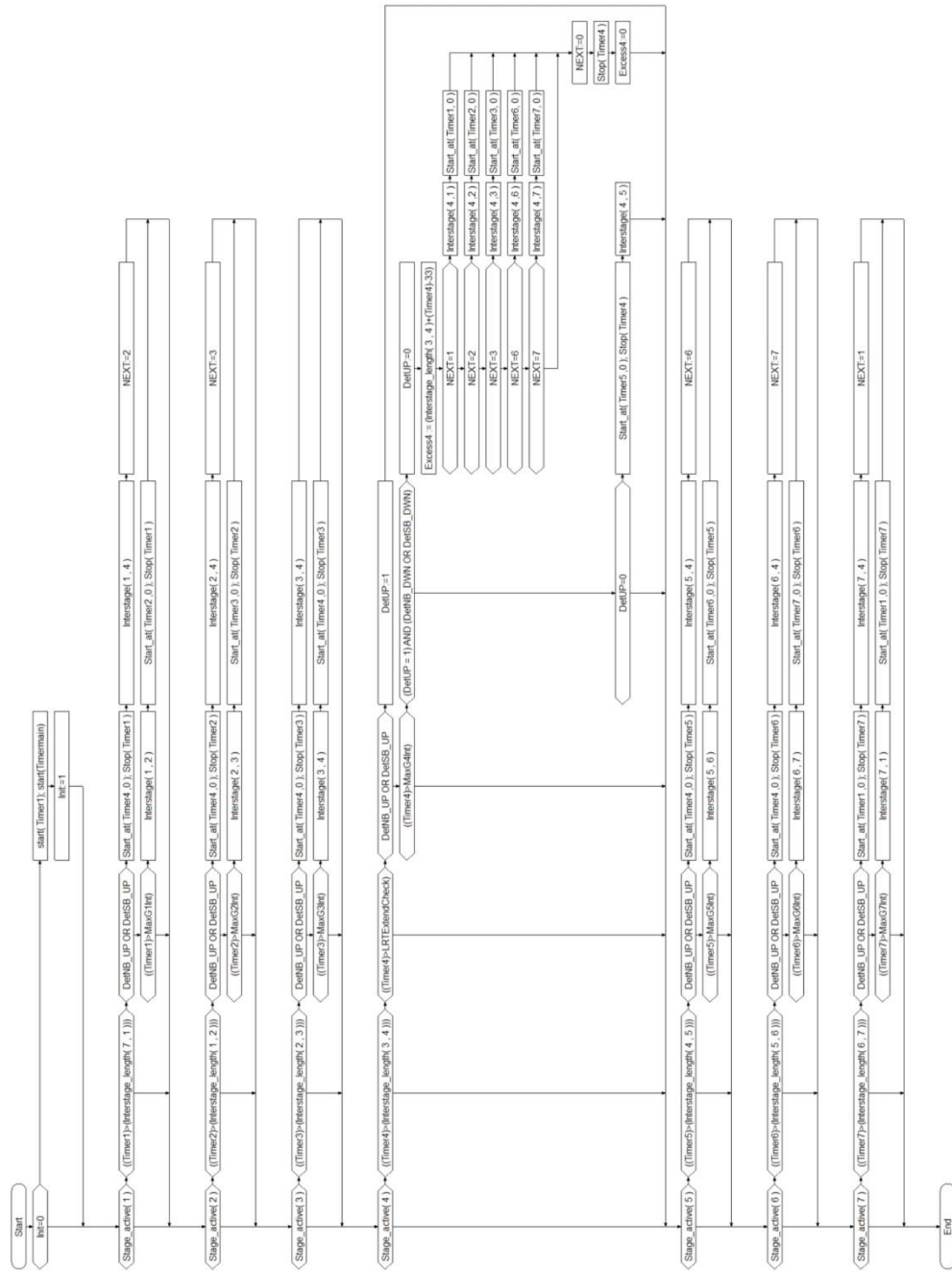


Figure 5 VAP logic of the signalized street vehicle control with tram-actuated signal control (SC5)

Table 4 Expressions for VAP logic for SC5

EXPRESSIONS	Contents	Comment
DetNB_UP	Occupancy(501)>0	Northbound Upstream detector
DetNB_DWN	Occupancy(502)>0	Northbound Downstream detector
DetSB_UP	Occupancy(503)>0	Southbound Upstream detector
DetSB_DWN	Occupancy(504)>0	Southbound Downstream detector
MaxG1Int	(Interstage_length(7 , 1)+G1)	Interstage5s+G1
MaxG2Int	(Interstage_length(1 , 2)+G2)	Interstage5s+G2
MaxG3Int	(Interstage_length(2 , 3)+G3)	Interstage5s+G3
MaxG4Int	(Interstage_length(3 , 4) +Excess4+G4)	Interstage5s+ExcessG4formerG4 +G4
MaxG5Int	(Interstage_length(4 , 5)+G5)	Interstage5s+G5
MaxG6Int	(Interstage_length(5 , 6)+G6)	Interstage5s+G6
MaxG7Int	(Interstage_length(6 , 7)+G7)	Interstage5s+G7
LRTEndCheck	(Interstage_length(3 , 4) +G4-LRTtoStop)	Interstage5s+G4- ApproachingLRTtime:10s

3.3 TRANSYT and Vissim

To develop signal timing plans using TRANSYT, network inventory data (e.g., number of lanes, length, route alignments), traffic stream characteristics (e.g., traffic counts, speed, route decision) and traffic control (e.g., right of way, signal controllers and signal groups) were required. Subsequently, TRANSYT would provide signal timing along with other measurements (e.g., progression, delay) based on those inputs. The Vissim simulation could be started by coding with the same input data used in TRANSYT and signal timing from TRANSYT. The simulations were run, then the average measurements of each run, such as delay, travel time and queue length, were obtained. Each scenario was run with varied transit headways and proportionally varied street traffic volumes.

3.4 Signal Phasing and Timing

The signal control of the roundabout was planned as a series of three intersections that were closely located under the same controller. Seven possible movements were placed into three groups, as shown in Figure 6. The traffic signal stages could be arranged as shown in Figure 7, aiming to achieve traffic progression for all legs and prevent spillback.

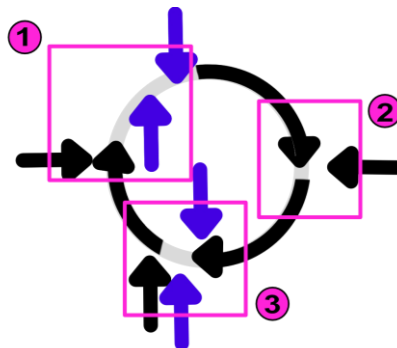


Figure 6 Signal head groups

Considering the width of the intersections within the roundabout, the intergreen and minimum green times were set to 5 and 7 seconds, respectively. For the cycle time of 40 seconds, these were set to 4 and 6 seconds to satisfy the cycle time limit.

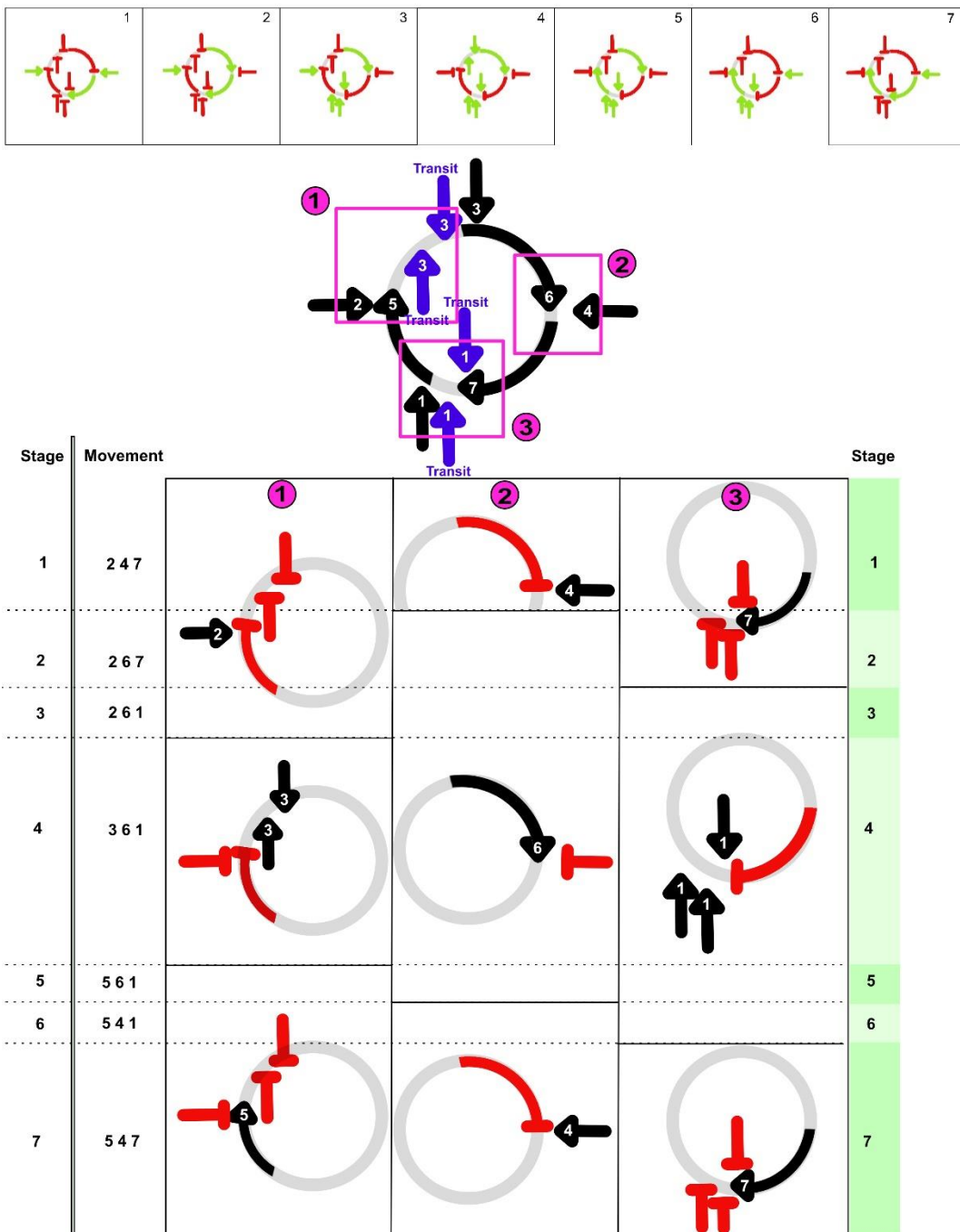


Figure 7 Signal control stages

4. Results and Discussion

The results from TRANSYT and Vissim were collected using different tools. TRANSYT allows the user to collect both total network and individual link performance. The results from Vissim were collected using the Vehicle Travel Time and Queue Counters tool placed on the network.

4.1 Results from TRANSYT

The signal timings are as shown in Table 5. The green time (G) is the difference between the starting green time (G_S) and the ending green time (G_E). Figure 8 shows an example of a signal timing plot at the cycle length of 90 seconds. The horizontal axis represents time and the vertical axis represents signal group/movement.

Table 5 Signal Timing from TRANSYT (s)

Cycle Time (s)	Time in a Cycle	Signal Group/Movement						
		1	2	3	4	5	6	7
40	G_S	33	23	38	13	8	28	18
	G_E	14	34	4	24	19	9	29
	G	21	11	6	11	11	21	11
50	G_S	14	2	20	39	33	8	45
	G_E	40	15	28	3	47	34	9
	G	26	13	8	14	14	26	14
60	G_S	35	22	41	9	3	29	15
	G_E	10	36	58	24	17	4	30
	G	35	14	17	15	14	35	15
70	G_S	18	5	24	57	51	12	68
	G_E	63	19	46	7	70	52	13
	G	45	14	22	20	19	40	15

Table 5 Signal Timing from TRANSYT (s) (continued)

Cycle Time (s)	Time in a Cycle	Signal Group/Movement						
		1	2	3	4	5	6	7
80	G_S	16	74	22	56	50	10	66
	G_E	61	17	45	5	69	51	11
	G	45	23	23	29	19	41	25
90	G_S	16	1	23	68	62	10	81
	G_E	76	18	57	5	86	63	11
	G	60	17	34	27	24	53	20
100	G_S	5	88	14	68	62	99	78
	G_E	73	9	57	94	83	63	100
	G	68	21	43	26	21	64	22
110	G_S	3	88	9	65	59	107	78
	G_E	73	4	54	102	83	60	108
	G	70	26	45	37	24	63	30
120	G_S	58	42	73	21	15	52	32
	G_E	27	68	10	47	37	16	53
	G	89	26	57	26	22	84	21

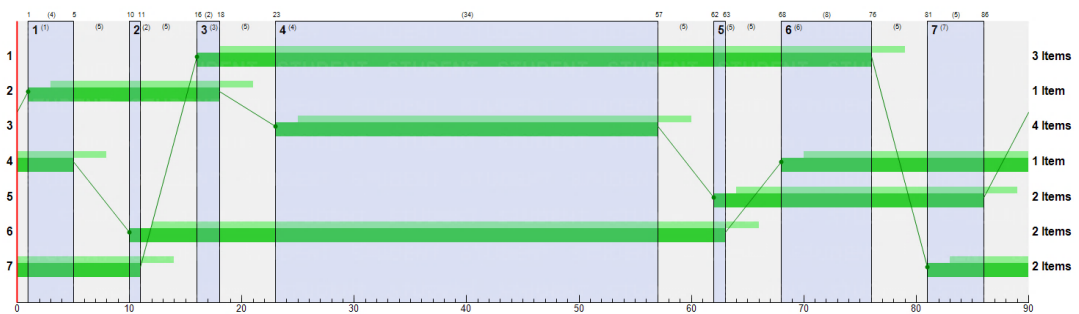


Figure 8 The signal design at cycle length = 90 s from TRANSYT

The network was coded in TRANSYT. The saturation flow rate of each lane was estimated and varied by its turning operation. The exclusive left turn, right turn and through lane had saturation flow rates of 1425, 1600 and 1675 PCUs/hr/lane. The left-through and right-through shared lanes had saturation flow rates of 1600 and 1625 PCUs/hr/lane, respectively.

For the fixed time scenario, various cycle times were tested under prevailing traffic conditions. The signal timings were evaluated using data from TRANSYT. Measures of effectiveness include v/c ratio, delay and bandwidth efficiency and attainability, as shown in Figure 9. Other parameters were external maximum queue length on the roundabout and average delays of southbound, northbound and LRT cars, as shown in Figure 10.

From the evaluation results, a cycle time of 90 seconds was chosen in actuated signal scenarios. The selected cycle time resulted in a low average delay for both street and transit cars, v/c ratio and external max queue length. This cycle time also yielded high bandwidth efficiency.

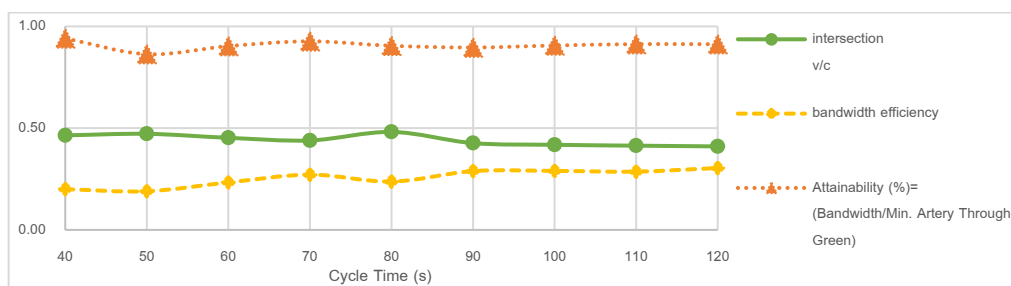


Figure 9 The relationship between v/c ratio, bandwidth efficiency, attainability and cycle time of fixed time scenario

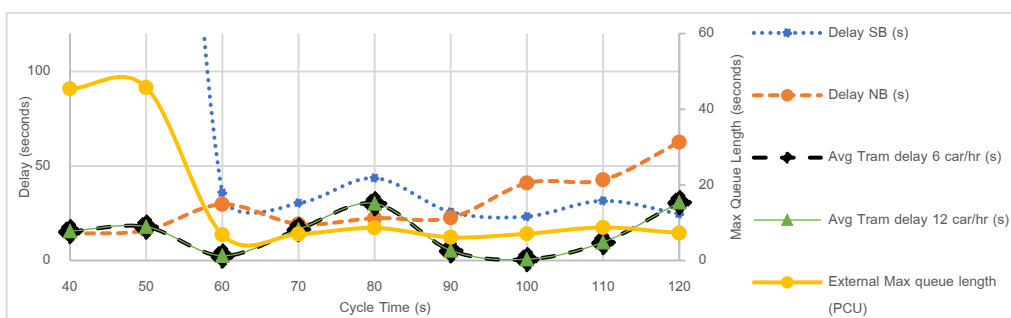


Figure 10 The relationship among average delay, external max queue length and cycle time of the fixed time scenario

4.2 Results from Vissim

Each scenario was simulated with multiple runs with the same set of seeds. The total runtime of each simulation was 4,500 seconds, with the initializing period of 900 seconds or 15 minutes to bring the traffic to the steady state. The statistical data were collected in the next 3,600 seconds or 60 minutes. After the simulation runs had been completed, the average indicators from 5 runs were taken using the queue counter and travel time measurement tool in Vissim for key movements as shown in Figure 11a. The average delay of the roundabout was the result of the weighted mean delay from all movements as shown in Figure 11b. The total and average delay was as shown in Table 6.

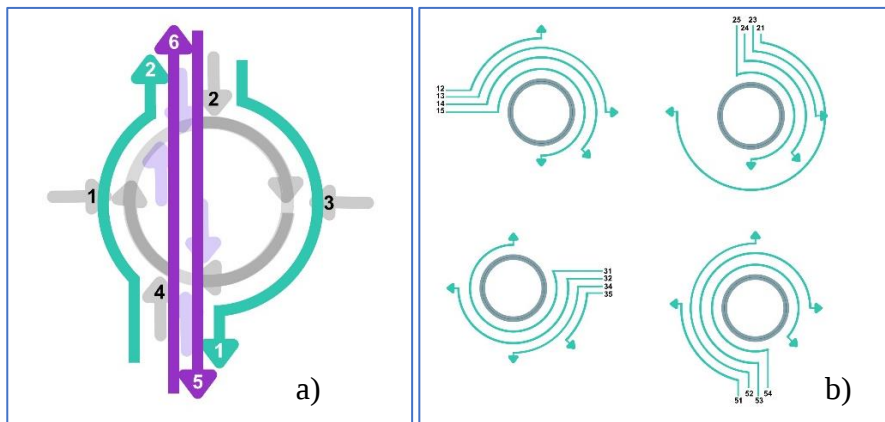


Figure 11 The Vissim Travel Time tool placements a) legs and LRT, b) traffic going through the roundabout

Table 6 The Average Road and LRT Delay Results from Vissim

Scenarios	Avg. Road Delay (s)				Avg. LRT Delay (s)			
	Headway (min)				Headway (min)			
	10	7.5	6	5	10	7.5	6	5
SC1	8.12				5.91			
SC2	7.04	6.66	6.98	6.85	0.04	0.01	0	0
SC3	5.85	5.78	5.78	5.96	1.21	1.21	1.26	1.25
SC4	33.92	33.92	33.92	34.38	16.11	8.76	8.83	16.19
SC5	35.42	34.45	35.18	33.55	11.74	0.78	0.78	8.45

Figure 12 shows that the unsignalized street vehicles control scenarios (SC1, SC2 and SC3) had significantly lower average street vehicles delay compared to the signalized control scenarios (SC4 and SC5). This may be true if the street volumes were not so high and these vehicles were able to maneuver around one another perfectly. Introducing signalized control would inevitably generate additional delay while ensuring a higher level of safety. The street vehicle delay from the actuated signal control scheme (SC5) was slightly higher than that from the fixed-time control (SC4). However, using actuated transit priority control cut down the LRT delay in SC5 approximately by half compared to SC4 as shown in Figure 13. Transit headways ranging from 6 to 7.5 minutes resulted in similar LRT delays for SC2, SC3, and SC5 schemes.

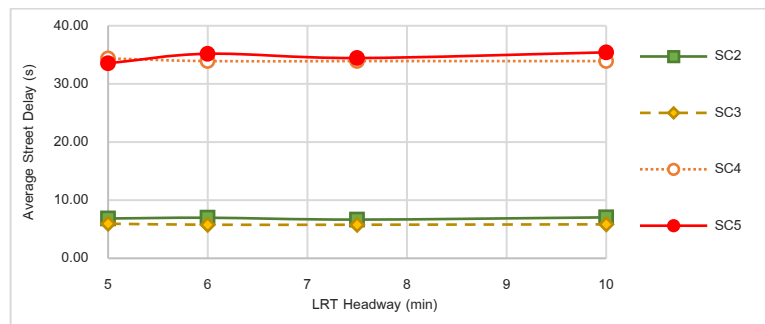


Figure 12 The relationship between average street delay and LRT Headway

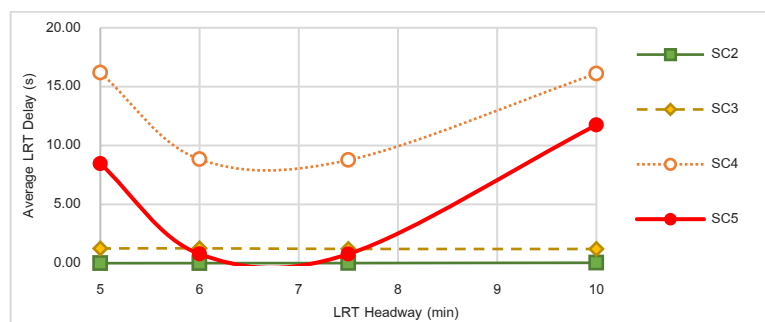


Figure 13 The relationship between average LRT Delay and LRT headway

It is always difficult to claim a good estimate of future traffic volumes with limited data. Instead, different volume growth rates were tested in this study to understand their impacts on street delay, average queue length and maximum queue length, as shown in Figure 14,

Figure 15, and Figure 16. In the morning peak hours, the approach with the heaviest traffic, hence the longest queue, was the southbound direction entering the roundabout.

This southbound leg was considered the critical approach where the delay and queue length were measured. The unsignalized control with transit actuated phase (SC3) showed the lowest delay. The other two unsignalized control schemes (i.e., SC1 and SC2) also showed low street delays but there was a sharp climb when the street volumes increased by 20% and 30%. The street delays from SC4 and SC5 were higher for the current traffic conditions but increased with lower rates at the higher traffic volume. At higher volumes, SC5 with signal control actuation tended to have average shorter queues compared to SC4 as in the previous study [7]. The average queue length presented the same trend for all five scenarios. The maximum queue lengths for unsignalized control schemes, however, increased sharply with street volumes. The delays from these three scenarios almost matched those from signalized schemes when street traffic volume increased by 30%. With extremely unbalanced travel demand, especially the southbound movement, the signal design that based on maximizing bandwidth for vehicle progression was proved to have severe negative effects on side streets for both delay and queue length as in the previous study [9].

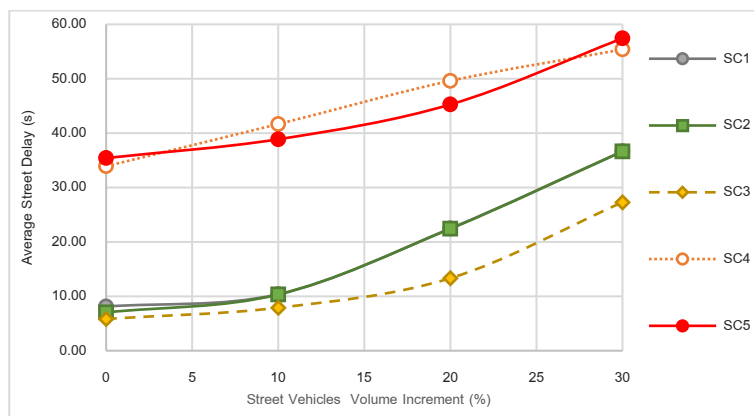


Figure 14 The relationship between average street delay and street vehicles volume increment percentage

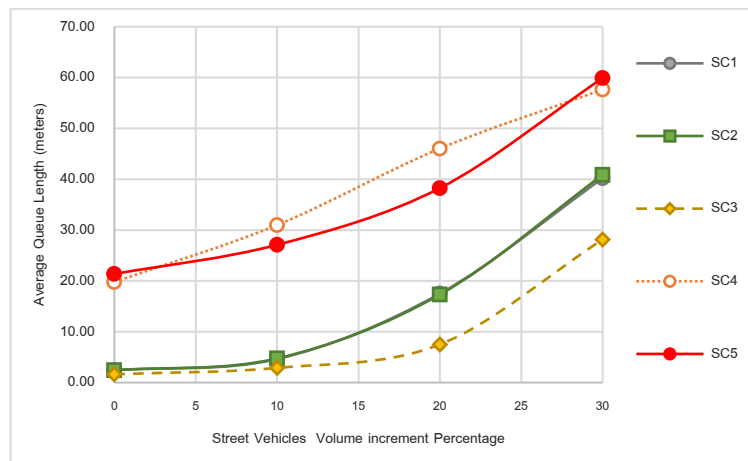


Figure 15 The relationship between average queue length and street vehicles volume increment percentage

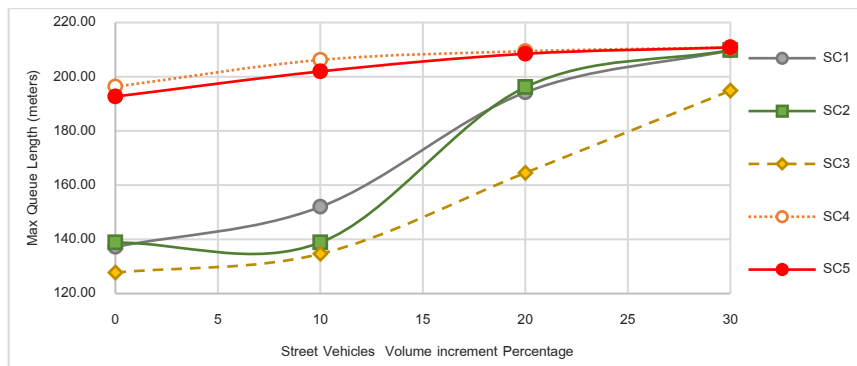


Figure 16 The relationship between max queue length and street vehicles volume increment percentage

5. Conclusion and Recommendation

Surin Clock Tower Roundabout currently accommodates a medium range of traffic demand during peak hours and is expected to carry a much larger volume in the future. The critical movement is necessarily southbound through traffic where the traffic demand is highest and long queues are often observed. However, under the current scheme where the LRT is not in place, the roundabout will be able to accommodate future traffic with reasonably low delays and acceptable queue lengths for all approaches. LRT installation and operation will adversely affect traffic condition. The optimum roundabout control scheme

is needed to balance the trade-off between the street traffic delay and public transport progressive movement. This study investigated and compared four improvement schemes for roundabout control using some measures of effectiveness obtained from microscopic simulations.

Undoubtedly, the unsignalized control with yield scheme (SC2) resulted in the lowest street vehicle and LRT delay as it did not require either to stop or yield unless absolute movement conflicts occurred. The unsignalized roundabout with actuated signal control scheme (SC3) yielded equally low street delay and queue length. This scheme has a slight advantage because it allowed part of the critical southbound street movement to freely enter the roundabout simultaneously with the LRT. Thus, this scheme would receive less delay from this approach and queues could be cleared more easily. Under the actuated public transport priority signal control, the LRT would experience similarly good progression and minimal delay as for the unsignalized control scheme. The fixed-time signal control (SC4) produced by far the worst outcome in terms of both street vehicle and LRT delays as it continually gave green to all approaches regardless of vehicle absence. SC5 which applied the optimum fixed-time signal planning on street vehicles only and inserted an actuated phase for LRT proved to be much more effective in reducing delays to the LRTs although the street vehicle delay was not significantly improved.

For Phuket LRT operations, this study would suggest using SC3: Unsignalized street vehicle control with transit actuated signal control due to its low average street delay, transit delay and queue length. The actuated signal control could provide safer operations while providing necessary transit priority. The automatic physical barrier could be installed at the at-grade intersection to ensure traffic safety. When the street traffic volumes increase in the future, by more than 30% of the current condition, signalized control with transit priority could be considered to minimize the impact of queue length and spillback to the upstream intersection.

This study necessarily focused on transit signal priority through the roundabout in the north-south direction. For future research, the comparison with signal designs on the roundabouts with different characteristics could be implemented. The effects on side streets could also be considered and managed, for example, using the adaptive traffic control system. Moreover, the scope of the study included only an isolated roundabout. Further research could consider a larger part of the network involving traffic signal progression

through the nearby intersections. Other roundabouts could be selected for comparative studies and alternative signal timing strategies could be tested.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Cluster of Logistics and Rail Engineering (CLARE), Faculty of Engineering, Mahidol University, for the support and the PTV group for providing the software license.

References

- [1] The Office of Transport and Traffic Policy and Planning. The feasibility study report Phuket light rail transit project. 2017.
- [2] Bangkok Post Public Company Limited. Tram u-turn a big letdown. 2021 [cited 2022 Mar 13]. Available from: <https://www.bangkokpost.com/opinion/opinion/2117351/tram-u-turn-a-big-letdown>.
- [3] Vuchic VR. Urban Transit: operations, planning, and economics. New Jersey: John Wiley; 2005.
- [4] Google LLC. Surin clock tower roundabout. 2019 [cited 2020 Nov 14]. Available from: <https://goo.gl/maps/tfgrRDTsbtkGsxxi7>.
- [5] McGinley FJ, Stolz DR. The design of tram priority at traffic signals. Journal of Advanced Transportation 1985;19(2):133-51.
- [6] National Association of City Transportation Officials. Active Transit Signal Priority. Transit Street Design Guide. New York: National Association of City Transportation Officials; 2016.
- [7] Wolput B, Tegenbos R, Skabardonis A, Tampère CMJ. Control strategies for transit priority comparing adaptive priority with full transit signal priority. Transportation Research Board 94th Annual Meeting; 2015 Jan 11-15; Washington D.C., USA.
- [8] Wolput B. Optimal signal settings with transit signal priority [PhD Thesis]. Belgium: KU Leuven; 2016.
- [9] Skabardonis A, Christofa E. Impact of transit signal priority on level of service at signalized intersections. 6 th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service; 2011 Jun 28 - Jul 1; Stockholm, Sweden.

- [10] Mishra S, Kattan L, Wirasinghe SC. Transit signal priority along a signalized arterial: a passenger-based approach. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems* 2020;6(1):1-19.
- [11] The Office of Transport and Traffic Policy and Planning. Traffic management standard draft (Traffic data collection and analysis) [Internet]. 2016 [cited 2021 May 13]. Available from: <https://www.phetchaburi.go.th/traffic/traffic2.pdf>. (in Thai)
- [12] Li M, Wu T. Prediction and evaluation of traffic quality by static and dynamic simulation Impact of new bus terminal at Myggenäs intersection [Master of Science Thesis]. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology; 2011.
- [13] Lember M. Vissim tutorial - lesson 15 - VisVap for simple stage controlled actuation. 2015 [cited 2021 Oct 23]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=vMD3-QOaQQQ>.

Author's Profile



Phattarin Yongcharoen, received B.Eng. degree in Civil Engineering from Mahidol University in 2018. She is currently studying in the M.Eng. degree program in Railway Transportation Engineering at the Faculty of Engineering, Mahidol University.



Siradol Siridhara, received Ph.D. in Civil Engineering (Transportation) from Virginia Polytechnic Institute and State University, USA in 2000. He is currently a lecturer at the Faculty of Engineering, Mahidol University.

Article History:

Received: August 17, 2022

Revised: December 7, 2022

Accepted: December 8, 2022

การประยุกต์ใช้สัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์สำหรับการสร้างแบบจำลอง
ระบบไม่เชิงเส้น

THE APPLICATION OF GAUSSIAN WHITE NOISE FOR NONLINEAR
SYSTEM MODELING

ปริญา บุญมาเลิศ¹ และ ธนู ชูยฉาย²

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

¹parinya.boo@kbu.ac.th, ²thanuchouychai@gmail.com

Parinya Boonmalert¹ and Thanu Chouychai²

^{1,2}Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Kasem Bundit University 1761 Pattanakarn Rd. Suanluang, Bangkok 10250, Thailand,

¹parinya.boo@kbu.ac.th, ²thanu.cho@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการแยกฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นของระบบไม่เชิงเส้น โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของสัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์เป็นสัญญาณที่ทางเข้า สัญญาณที่ทางเข้าและทางออกจะถูกเก็บอย่างต่อเนื่องแบบเวลาจริงเพื่อนำสัญญาณมาทำการเฉลี่ยและเพื่อมิให้ต้องใช้หน่วยความจำมากเกินไปจึงได้ประยุกต์ใช้การเก็บข้อมูลแบบวงกลม การทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าวิธีการวัดสัญญาณด้วยวิธีของกอยเดอร์สามารถแยกสัญญาณเชิงเส้นออกมาได้ดีและเมื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ไปคำนวณหาพารามิเตอร์เชิงเส้นของระบบ พบว่าให้ผลถูกต้องแม่นยำและมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.003% จุดอ่อนของการใช้วิธีนี้คือต้องเสียเวลาค่อนข้างมากเนื่องจากต้องทำการเฉลี่ยสัญญาณเป็นเวลานานและต้องตรวจสอบคุณภาพของฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยสายตา การวัดสัญญาณจะยุติเมื่อฟังก์ชันถ่ายโอนมีความเสถียร

คำสำคัญ: สัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์, การเก็บข้อมูลแบบวงกลม, วิธีของกอยเดอร์

ABSTRACT

This research presents the separation of the linear transfer function of nonlinear systems based on the perpendicular properties of the Gaussian White Noise signal as the input signal.

The input and output signals are continuously collected in real time to average the signal and to avoid excessive memory usage, Circular Buffer has been applied. The Goyder's technique performed well in separation linear signal for the mathematical modeling test. The transfer function also produced accurate results with a 0.003% error when it was used to calculate the linear system parameters. This method's drawback is that the signal must be averaged for a considerable amount of time and the transfer function's quality must be visually examined. When the transfer function becomes steady, the signal measurement will come to an end.

KEYWORDS: Gaussian White Noise signal, Circular Buffer, Goyder's technique

1. บทนำ

ในการวิเคราะห์ระบบไม่เชิงเส้นโดยใช้อนุกรมของวอลเตอร์รา (Volterra series) [1] พบว่าจะมีปัญหาเรื่องความซับซ้อนในการคำนวณประกอบกับการประยุกต์ใช้งานจริงในทางปฏิบัติทำได้ยาก ในทางทฤษฎีพบว่าสัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์ (Gaussian White Noise) [1] มีคุณสมบัติเชิงตั้งฉากกันทั้งในโดเมนของเวลาหรือในโดเมนของความถี่ซึ่งแล้วแต่จะเลือกใช้วิธีใด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คุณสมบัติเชิงตั้งฉากในโดเมนของความถี่ตามวิธีการของกอยเดอร์ (Goyder's technique) [2] ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับต่าง ๆ ได้ โดยไม่ต้องแยกสัญญาณที่ทางออกของระบบออกเป็นอันดับต่างตามวิธีการของ Semidor-Signoret [3] ดังนั้นในทางปฏิบัติวิธีของกอยเดอร์จึงใช้งานได้ง่ายกว่าวิธีอื่น ๆ

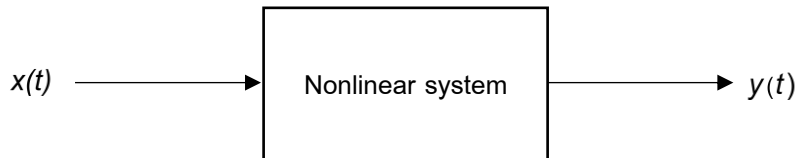
2. งานที่เกี่ยวข้อง

Goyder [2] ได้นำเอาสัญญาณสุ่มแบบเกาส์ มาใช้เป็นสัญญาณที่ทางเข้าของระบบ และเมื่อมีการเฉลี่ยสัญญาณทั้งทางเข้าและทางออกมากพอก็จะทำให้ได้ ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับต่าง ๆ แบบเดียวกับอนุกรมของวอลเตอร์ราได้ แต่เนื่องจากกอยเดอร์ตั้งสมมติฐานการเปลี่ยนสัญญาณแบบมิติเดียวไปเป็นแบบหลายมิติ จึงทำให้รูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนตั้งแต่อันดับที่สองขึ้นไป แตกต่างจากวิธีที่คำนวณโดยตรงจากอนุกรมของวอลเตอร์รา

Boonmalert and Chouychai [4, 5] ได้แสดงวิธีการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับต่าง ๆ ของระบบไม่เชิงเส้นโดยอ้างอิงจากทฤษฎีของอนุกรมของวอลเตอร์รา และได้แสดงวิธีการประยุกต์ใช้เพื่อนำไปหาพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นที่เป็นสปริงแบบไม่เชิงเส้นแบบกำลังสอง (Quadratic Spring)

3. ทฤษฎี

วิธีของกอยเดอร์จะใช้สัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์เป็นสัญญาณที่ทางเข้า เนื่องจากสัญญาณแบบนี้คุณสมบัติเชิงตั้งฉากเมื่อความถี่ไม่ตรงกันและมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ เมื่อทำการจับสัญญาณมาทำการเฉลี่ยให้มากพอ



รูปที่ 1 ระบบไม่เชิงเส้นระดับความสับสนเดียว

จากรูปที่ 1 ระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear system) มีสัญญาณเข้า $x(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์ และสัญญาณออก $y(t)$ ของระบบในรูปของอนุกรมของวอลเตอร์คือ

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i \quad (1)$$

$n \quad \text{time}$

และสัญญาณออกอันดับที่ n ใดๆ ของระบบไม่เชิงเส้น ในโดเมนความถี่คือ

$$Y_n(f_1, f_2, \dots, f_n) = H_n(f_1, f_2, \dots, f_n) \prod_{i=1}^n X(f_i) \quad (2)$$

โดยที่ $H_n(f_1, f_2, \dots, f_n)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ n และ $X(f)$ เป็นสัญญาณเข้าของระบบในโดเมนความถี่กอยเดอร์ตั้งสมมติฐานของการแปลงสัญญาณแบบ n มิติไปเป็นสัญญาณแบบมิติเดียวเป็น

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} Y_n(f - f_2 - \dots - f_n, f_2, f_3, \dots, f_n) df_2 df_3 \dots df_n \quad (3)$$

$n-1 \quad \text{time}$

โดยที่ $f = f_1 + f_2 + \dots + f_n$

เมื่อแทนสมการ (2) ใน (3) จะได้

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_n(f - f_2 - \dots - f_n, f_2, f_3, \dots, f_n) X(f - f_2 - \dots - f_n, f_2, f_3, \dots, f_n) \prod_{i=2}^n X(f_i) df_i \quad (4)$$

$n-1$ $time$

ครอสสเปกตรัม (Cross Spectrum) ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบ ลำดับที่ n ใด ๆ เป็น

$$S_{yx \dots x}(f - f_2' - \dots - f_n', f_2', f_3', \dots, f_n') = E[Y(f) X^*(f - f_2' - \dots - f_n', f_2', f_3', \dots, f_n')] \quad (5)$$

โดยที่ $E[\]$ เป็นค่าเฉลี่ย และ $X^*(f)$ เป็นสังยุคเชิงซ้อน (Complex Conjugate) ของ $X(f)$ เมื่อแทน $Y(f)$ จากสมการ (4) ลงในสมการ (5) จะได้

$$S_{yx \dots x}(f - f_2' - \dots - f_n', f_2', \dots, f_n') = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_n(f - f_2' - \dots - f_n', f_2', \dots, f_n') \cdot E[X(f - f_2 - \dots - f_n) X^*(f - f_2' - \dots - f_n')] \prod_{i=2}^n X(f_i) X^*(f_i') / T df_i \quad (6)$$

$n-1$ $time$

และเมื่อสัญญาณเข้าของระบบเป็นสัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์เทอม $X(f_i) X^*(f_i') = 0$ เมื่อ $f_i \neq f_i'$ และจะมีค่าเมื่อ $f_i = f_i'$ ดังนั้น ครอสสเปกตรัมจะเป็น

$$S_{yx \dots x}(f_1, f_2, \dots, f_n) = H_n(f_1, f_2, \dots, f_n) n! \prod_{i=1}^n S_x(f_i) \quad (7)$$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ n คือ

$$H_n(f_1, f_2, \dots, f_n) = \frac{S_{yx \dots x}(f_1, f_2, \dots, f_n)}{n! \prod_{i=1}^n S_x(f_i)} \quad (8)$$

โดยที่ ครอสสเปกตรัมหาได้จาก

$$S_{y_x \dots x}(f_1, f_2, \dots, f_n) = E \left[Y(f_1 + f_2 + \dots + f_n) \prod_{i=1}^n X^*(f_i) / T \right] \quad (9)$$

และ ออโตสเปกตรัม (Auto Spectrum) คือ

$$S_{xx}(f) = E[X(f)X^*(f)/T] \quad (10)$$

4. การเก็บข้อมูลแบบวงกลม (Circular Buffer)

เนื่องจากวิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีของกอยเดอร์ จะต้องทำการเฉลี่ยสัญญาณตามสมการ (11) ดังนั้นวิธีการที่จะเก็บข้อมูลที่เหมาะสมคือการเก็บข้อมูลแบบเวลาจริง (Real Time) และเพื่อให้ต้องใช้หน่วยความจำมากเกินไปจนจำเป็น จึงใช้หลักการเก็บข้อมูลแบบวงกลม ด้วยขนาดหน่วยความจำ $N = 2^M$ จุด โดยที่ $M = 1, 2, 3, \dots$

$$E[y(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t) dt \quad (11)$$

ตารางที่ 1 การเก็บข้อมูลแบบวงกลม

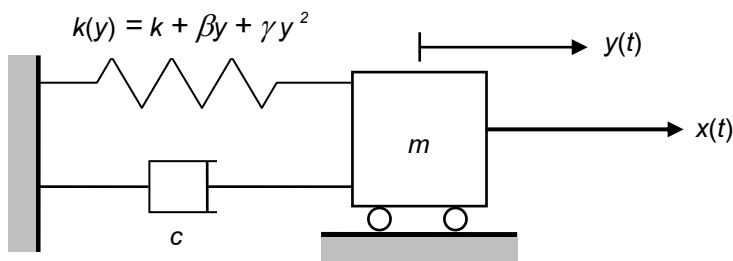
ครั้งที่	0	1	2	3	4	5	.	.	.	N-1
1	start→									end
2	end	start→								
3		end	start→							

การเก็บข้อมูลในครั้งแรกจะเก็บข้อมูลทั้ง N จุด โดยเริ่มจาก start ไปจนถึง end แล้วนำไปคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอน เมื่อทำการเก็บข้อมูลจุดต่อไป ข้อมูลจะถูกเก็บที่ตำแหน่ง 0 ซึ่งเป็น start เดิมและเปลี่ยน start เป็น end ส่วน start จะขยับเลื่อนไปหนึ่งตำแหน่ง ข้อมูลที่จะนำไปคำนวณครั้งต่อไปจะกระทำจาก start ไปจนถึง end เสมอ start และ end จะขยับไป 1 จุดทุก ๆ การเก็บข้อมูลครั้งต่อไป และการคำนวณครั้งต่อไปจะทุกข้อมูลใหม่ที่เก็บเข้ามา 1 จุด การเก็บข้อมูลในลักษณะนี้ทำให้ข้อมูลมีความต่อเนื่อง

5. ผลการคำนวณ

การทดสอบผลการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีของกอยเดอร์ จะใช้ระบบระดับความเสรีขั้นเดียวที่มีสปริงไม่เชิงเส้นและเป็นฟังก์ชันของระยะกระจัดทั้งหมดกำลังหนึ่งและกำลังสอง ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้ระบบเป็นสมการไม่เชิงเส้นกำลังสองและกำลังสาม ดังสมการ (12)

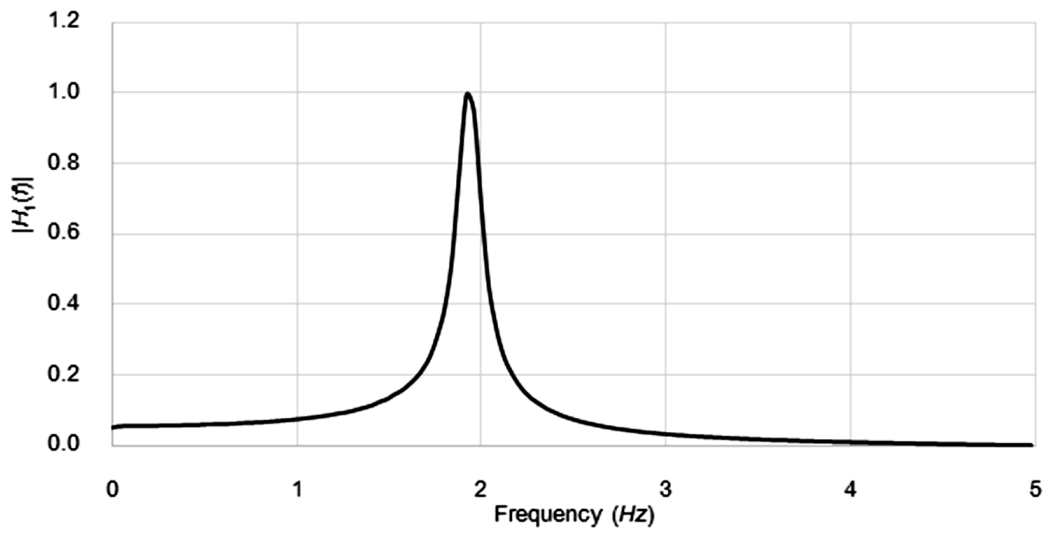
$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) + \beta y^2(y) + \gamma y^3(t) = Ax(t) \quad (12)$$



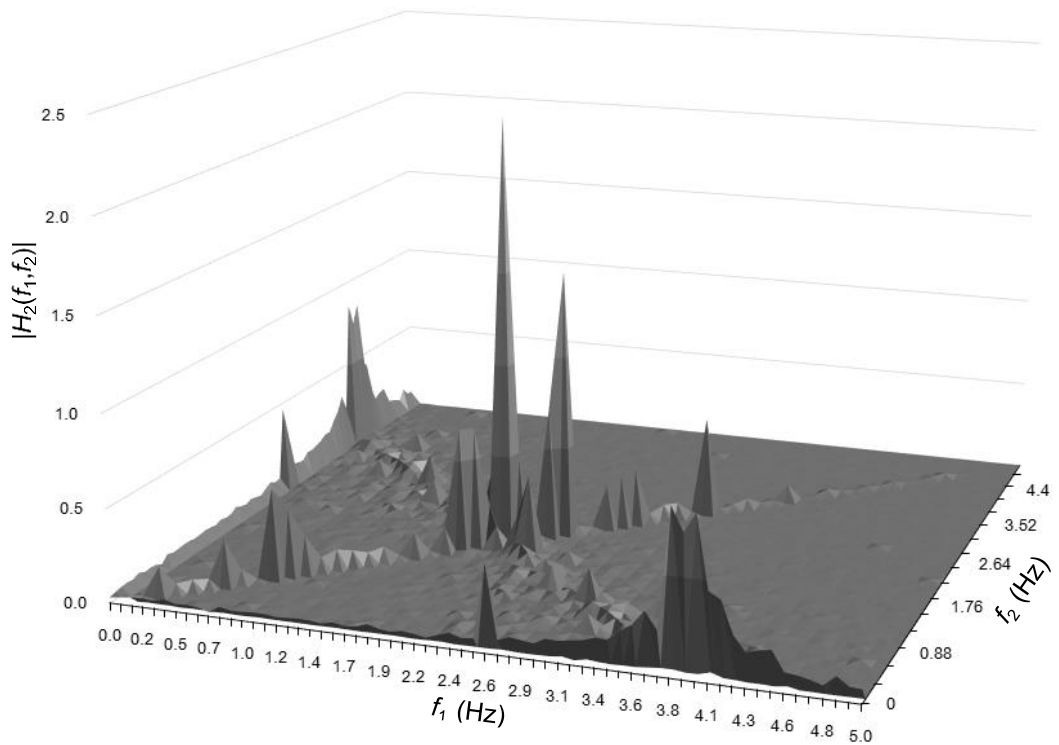
รูปที่ 2 ระบบทางกลที่ใช้ทดสอบ

ในการคำนวณกำหนดให้ $m = 1 \text{ kg}$, $c = 0.1 \text{ N.s/m}$, $k = 150 \text{ N/m}$, $\beta = 10 \text{ N/m}^2$ และ $\gamma = 10 \text{ N/m}^3$ ในส่วนของ $x(t)$ เป็นสัญญาณสุ่มขาวแบบเกาส์ โดยกำหนดให้ มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.1 ส่วน $A = 10 \text{ N}$ เป็นแอมพลิจูดของแรงที่กระทำกับระบบ สำหรับสัญญาณออกของระบบ $y(t)$ จะทำการคำนวณด้วยวิธีของรุงเงกุตต้าอันดับที่สี่ (Fourth order Runge-Kutta Method) [6] ผลการคำนวณสัญญาณทั้งสัญญาณเข้าและสัญญาณออกจะถูกคูณด้วยหน้าต่างของฮานนิง (Hanning Window) ก่อนที่จะทำการแปลงตรงฟูริเยร์ (Direct Fourier Transform) และนำไปคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับต่าง ๆ ตามสมการ (8) ต่อไป

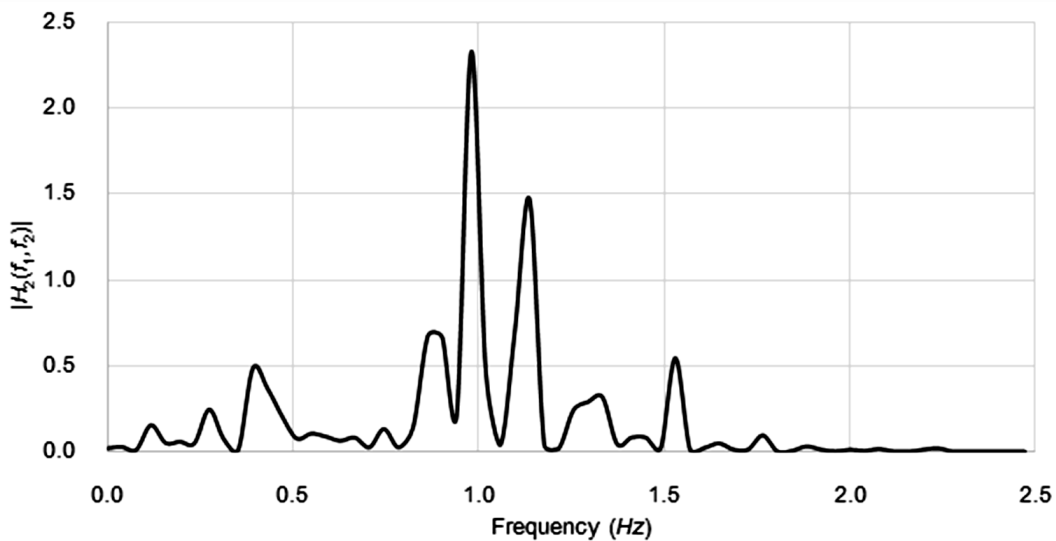
จากข้อมูลของระบบจะได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ คือ $\omega_n = 12.247 \text{ rad/s}$, $s = 1.95 \text{ Hz}$ และ $\zeta = 0.00408$



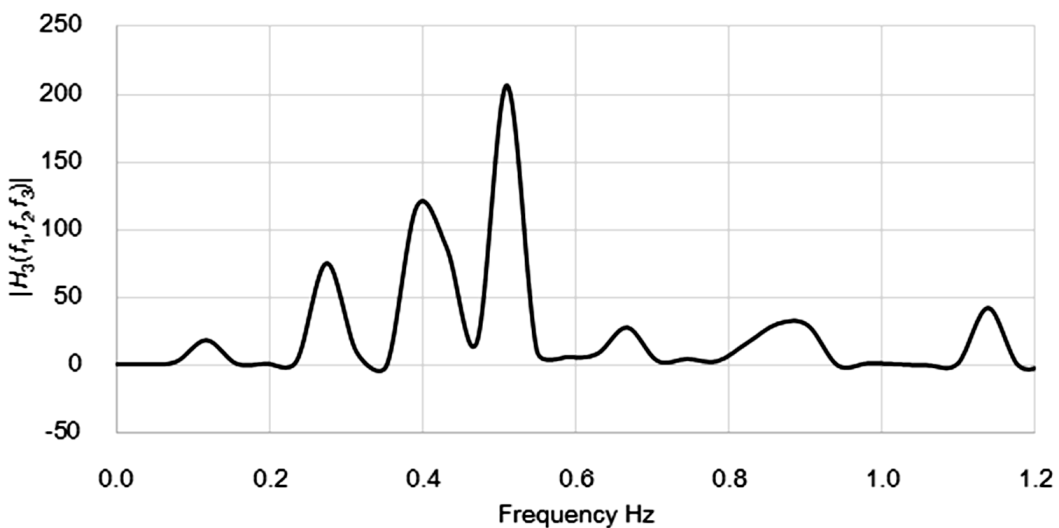
รูปที่ 3 ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง



รูปที่ 4 ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง



รูปที่ 5 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองในแนวเส้นทแยงมุม $H_2(f_1, f_2)$; $f_1 = f_2$



รูปที่ 6 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามในแนวเส้นทแยงมุม $H_3(f_1, f_2, f_3)$; $f_1 = f_2 = f_3$

6. สรุป

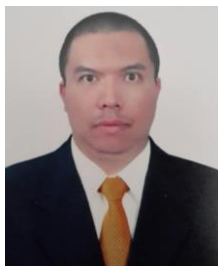
กราฟในรูปที่ 3 เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งซึ่งผ่านการเฉลี่ยมากกว่า 1,000 ครั้ง ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้นและเมื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ไปทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ของระบบเชิงเส้นจะได้ $\omega_n = 12.24701 \text{ rad/s}$ มีความผิดพลาด $8 \times 10^{-5} \%$ และ $\zeta = 0.004079$ มีความผิดพลาด 0.0024% ซึ่งถือว่ามีความเที่ยงตรงสูง ทั้งนี้เป็นเพราะได้แยกเอาฟังก์ชันถ่ายโอน

ของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นออกไปแล้ว ส่วนในรูปที่ 4 และ 5 เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองและฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองที่อยู่ในแนวเส้นทแยงมุม $f_1 = f_2$ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าปรากฏความถี่ซับฮาร์โมนิก (sub harmonic) ที่ประมาณ 0.9 Hz และในรูปที่ 6 เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามในแนวเส้นทแยงมุม $f_1 = f_2 = f_3$ ซึ่งจะเห็นซับฮาร์โมนิกอันดับสามที่ประมาณ 0.5 Hz. แต่จากรูปทั้งสองไม่สามารถมองเห็นซูเปอร์ฮาร์โมนิก (super harmonic) ได้ เนื่องจากช่วงของความถี่สูงไม่สามารถแสดงได้ในฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสูง เพราะว่าฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง จะใช้ความถี่สูงสุดเพียงครึ่งหนึ่งของความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง และฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สาม จะใช้ความถี่สูงสุดเพียง 1/3 ของความถี่สูงสุดของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง ในรูปที่ 5 และ 6 จะมีฮาร์โมนิกอื่น ๆ อีกมากเป็นเพราะฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองและสามยังไม่เสถียรเพียงพอ ถ้าจะให้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองและสามเสถียรจะต้องทำการเจ็ลต่อไปอีก และต้องเขียนกราฟแสดงรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองเพื่อตรวจสอบด้วยสายตา แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะการตรวจสอบคุณภาพของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งเท่านั้น ในการทำการวิเคราะห์โมดัล การใช้สัญญาณแบบสุ่มจะทำได้ง่ายกว่าการใช้สัญญาณแบบอื่น ข้อเสียมีอย่างเดียวคือต้องมีเครื่องมือสร้างสัญญาณแบบสุ่มเท่านั้น

References

- [1] Schetzen M. The Volterra & Wiener theory of nonlinear systems. New York: John Wiley & Sons; 1980.
- [2] Goyder HGD. Vibration analysis and identification of nonlinear structures. United Kingdom: University of Manchester; 1985.
- [3] Semidor-Signoret C. Comportements de hauts polymeres a grande vitesse de deformation, identification d'effet non lineares. [These de 3eme. Cycle en mecanique physique]. Bordeaux, France: Universite de Bordeaux I; 1981.
- [4] Boonmalert P, Chouychai T. The first and second order transfer function of hysteresis damping non-linear system. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(1):152-65.
- [5] Boonmalert P, Chouychai T. Nonlinear parameter extraction of SDOF viscous damping system. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(1):81-92.
- [6] Chapra SC, Canale RP. Numerical methods for engineering. 7th ed. New York, USA: McGraw-Hill; 2015.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต โทรศัพท์
0-2320-2777 ต่อ1203 E-mail: parinya.boon@kbu.ac.th



รศ.ดร.ธนู จุญฉาย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
โทรศัพท์ 0-2320-2777 ต่อ1203 E-mail: thanu.cho@kbu.ac.th

Article History:

Received: October 10, 2022

Revised: December 12, 2022

Accepted: December 20, 2022

การสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลสจากต้นธูปฤาษี
SYNTHESIS OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE FROM
TYPHA ANGUSTIFOLIA L.

มาหามะสุไฮมี มะแซ¹ สุรพล ชูสวัสดิ์² วรวิทย์ ศรีวิทยากุล³ และ พีรวัส คงสง⁴

¹อาจารย์, หน่วยวิจัยเส้นใยและสิ่งทอ สาขาวิศวกรรมเครื่องนุ่งห่ม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, susumeme1983@yahoo.com

^{2,3}อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, ²Suchoosawat@gmail.com, ³chan_worawit@hotmail.com

⁴อาจารย์, สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000, physics_psu@windowslive.com

Mahamasuhami Masae¹, Suraphol Choosawat², Worawit Sriwittayakul³,
and Peerawas Kongsong⁴

¹Lecturer, Fiber and Textile Research Unit, Department of Garment Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya Songkhla,
1 Ratchadamnoennok Rd., Bo Yang, Muang Songkhla, Songkhla 90000, Thailand, susumeme1983@yahoo.com

^{2,3}Lecturer, Department of Industrial Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd., Bo Yang, Muang Songkhla, Songkhla 90000, Thailand, ²Suchoosawat@gmail.com, ³chan_worawit@hotmail.com

⁴Lecturer, 3Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, 744, Suranarai Rd., Muang, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand, physics_psu@windowslive.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การใช้จุลผลึกเซลลูโลสที่สกัดได้จากต้นธูปฤาษี ที่มีอยู่ในพื้นที่จังหวัดสงขลา จุลผลึกเซลลูโลสที่สกัดด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก ผลการ

ทดลองพบปริมาณเฉลี่ยเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส 75.47, 8.33 และ 9.40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ คุณลักษณะของจุลผลึกเซลลูโลสจากต้นธูปฤาษีศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อีมิสชัน (FESEM) จุลผลึกเซลลูโลสมีลักษณะเส้นใยยาว และมีความยาวถึง 230 ไมโครเมตร การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) และวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบโครงสร้างของเซลลูโลสที่ตำแหน่งกราฟที่ 16, 22 และ 35 องศา ซึ่งบ่งบอกถึงระนาบผลึก (101), (101) และ (002) ตามลำดับ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) แสดงการสลายตัวของคาร์บอนในโครงสร้างเซลลูโลส ผลการวิเคราะห์เซลลูโลสด้วยวิธีดีเทอร์เจนท์ที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 75

คำสำคัญ: จุลผลึกเซลลูโลส, ธูปฤาษี, เศษวัสดุทางการเกษตร

ABSTRACT

The objectives of this study were to analyze the use of microcrystalline cellulose extracted from *Typha angustifolia* L. trees obtained from Songkhla province. Microcrystalline cellulose was extracted from *Typha angustifolia* L. trees via hydrolysis treatment using sulfuric acid (H_2SO_4). The study found the Cellulose, Lignin, and Hemicelluloses to be 75.47, 8.33, and 9.40 %, respectively. The morphology of the microcrystalline cellulose was characterized using a field emission scanning electron microscope (FESEM). The result of the physical properties showed a microcrystalline cellulose fiber length of up to 230 micrometers. Fourier-Transform Infrared spectroscopy (FTIR) was used to identify the chemical composition and X-ray diffraction analysis (XRD) showed crystallinity microcrystalline cellulose appearing at peaks 16, 22, and 35 degrees in relation to the plane (101), (101), and (002), respectively. The thermal stability was investigated using the thermogravimetric analysis (TGA) method displayed the decomposition of carbon in the cellulose structure. The detergent method result showed that *Typha angustifolia* L compound produced a high content of phase cellulose of up to 75 %.

KEYWORDS: Microcrystalline cellulose, *Typha angustifolia* L., Agricultural residues

1. บทนำ

โดยปกติเศษผลิตผลทางการเกษตร และวัชพืชที่ขึ้นอยู่โดยทั่วไปจะถูกมองว่าเป็นสิ่งที่ไม่มีความประโยชน์ใด ๆ นอกจากการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ หรือถูกตัด ถาง และทิ้งปล่อยให้ย่อยสลายเอง

ตามธรรมชาติ หรือถูกใช้เป็นปุ๋ยให้กับต้นไม้ต่อไป แต่ก็ยังมีวิธีการเพิ่มมูลค่าพืชพืชหรือเศษผลิตผลเหล่านี้ได้ และถูกใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ มากขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าและมีประโยชน์มากที่สุด โดยเฉพาะพืชหรือผลิตผลทางการเกษตรที่มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบ เช่น ใบเตยทะเล (*Pandanus tectorius*) ผ้าย ปอ ป่าน ชานอ้อย ฟางข้าว และแกลบ (Rice husk) เป็นต้น

เซลลูโลสเป็นไบโอพอลิเมอร์ (Biopolymer) ที่ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น ทนความร้อน มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ ไม่ละลายน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เซลลูโลสถูกใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญได้หลากหลาย ในด้านเภสัชกรรมและเครื่องสำอางใช้เป็นสารเติมแต่ง (Additive) ตัวดูดซับ (Adsorbent) สารเพิ่มความข้น (Thickener) ด้านอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัว (Stabilizers) สารป้องกันการแตก (Cracking agent) ในเศษพืชการเกษตรจะพบเซลลูโลสมากในส่วนต่าง ๆ เช่น ผัสดอง ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการย่อย บด ลดขนาด และกระบวนการต่าง ๆ เพื่อกำจัด เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสิ่งเจือปน จะทำให้ได้ผลิตผลเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ขึ้น นอกจากนี้สัตว์ทะเลและแบคทีเรียบางชนิดก็ยังสามารถสังเคราะห์เซลลูโลสได้จากกลูโคสอีกด้วย [1, 2] งานวิจัยการสังเคราะห์เซลลูโลสจากกากกล้วย โดยเลือกส่วนของท่อน้ำเลี้ยงที่มีเซลลูโลสประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ ตัดและสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ กวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันที่ 80 องศาเซลเซียส แล้วกวนต่อในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) หรือโซเดียมคลอไรต์ (NaClO₂) พบว่าปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ สามารถสังเคราะห์เซลลูโลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 นาโนเมตร ได้ [3] การสังเคราะห์เซลลูโลสจากใบเตยทะเล ด้วยวิธีทางเคมีโดยบดละเอียดแล้วต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และต้มในสารละลายโซเดียมคลอไรต์ความเข้มข้น 1.7 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง และไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สามารถเตรียมเซลลูโลสประมาณ 69.5 เปอร์เซ็นต์ ที่มีเฮมิเซลลูโลสประมาณ 15.9 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเส้นที่มีความยาว 200 นาโนเมตร [2] การสังเคราะห์เซลลูโลสจากแกลบสามารถสังเคราะห์เซลลูโลสประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์ ความเป็นผลึกสูง 46.8 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-15 นาโนเมตร โดยมีเฮมิเซลลูโลสเจืออยู่ประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขั้นตอนการเตรียมจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ แล้วฟอกขาวด้วยกรดอะซิติก (CH₃COOH) ความเข้มข้น 1.7 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก 10 โมลาร์ เวลา 40 นาที ที่ 50 องศาเซลเซียส [4] เซลลูโลสที่สังเคราะห์จากเปลือกมะพร้าวอบบดละเอียดต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกำจัดลิกนินด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรต์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ และปรับ pH 4 ด้วยกรดอะซิติกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถ

สังเคราะห์เซลลูโลสเฟสเบต้าและแกมมา ($I\beta$ และ $I\gamma$) ปริมาณ 72.0 และ 28.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนเซลลูโลสจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้สังเคราะห์เพิ่มขึ้นที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยเฟสเบต้าและแกมมาเซลลูโลสที่สูงจะส่งผลให้ผู้วิจัยสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้ดีต่อไป [5] การศึกษาการเตรียมแผ่นวัสดุผสมอีพอกซีและเส้นใยเบต้าเซลลูโลสจากเปลือกของสัตว์ทะเลจำพวกเพรียงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และกรดซัลฟิวริก สามารถเตรียมเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูง เมื่อนำแผ่นวัสดุผสมดังกล่าวทดสอบแบบการโก่งตัว (Bending test) ก็มีอิทธิพลทำให้แผ่นวัสดุผสมดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลที่ดีและค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้น [6] การศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับสารเติมแต่ง คือ เซลลูโลสที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีจากซังข้าวโพดที่ถูกบดละเอียด โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เซลลูโลสที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกถึง 87 เปอร์เซ็นต์ โดยการเตรียมฟิล์มใช้อัตราส่วนผสม 9 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำให้สมบัติต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นจากเดิม 49 เปอร์เซ็นต์ [7] การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเซลลูโลสด้วยต้นรูปถาษีด้วยวิธีเคมี ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 28 เปอร์เซ็นต์ ผสมแอนทราควิโนน (Anthraquinone) ต้มส่วนผสมที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างและฟอกขาวด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ($NaClO$) 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ 45 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที สามารถสังเคราะห์เซลลูโลสที่มีขนาดผลึก 6.1 นาโนเมตร ความเป็นผลึก 69 เปอร์เซ็นต์ เพื่อนำไปใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านในเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป [8]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ตระหนักถึงการเพิ่มมูลค่าและใช้วัสดุเศษเหลือจากการเกษตรที่มีอยู่อย่างมากมายในท้องถิ่นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการศึกษาการสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลสจากรูปถาษี วิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ และศึกษาสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้งานอื่น ๆ ได้ในอนาคต เช่น วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยจุลผลึกเซลลูโลส เป็นต้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมจุลผลึกเซลลูโลส

งานวิจัยนี้ใช้ต้นรูปถาษี (*Typha angustifolia* L.) จากพื้นที่ อ. เมือง จ. สงขลา ดังรูปที่ 1 (ก) การสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลสมี 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การปรับสภาพผิว (Alkali treatment) โดยนำต้นรูปถาษีตัดเป็นชิ้นขนาด 1-5 มิลลิเมตร ล้างด้วยน้ำเปล่า แล้วอบให้แห้งที่ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง เมื่อต้นรูปถาษีแห้งแล้วบดให้ละเอียด แล้วปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (98% NaOH, Loba chemis) ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต้มและกวนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง แล้ว

ล้างด้วยน้ำสะอาด และต้มอีกครั้งในสารละลายอะซิติกบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 27 กรัม และกรดอะซิติก (CH_3COOH , J.T. Baker) ปริมาตร 75 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการฟอกขาว (Bleaching treatment) และการไฮโดรไลซิส มีขั้นตอนดังนี้ คือ นำรูปถ่ายที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วต้มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (10-13% NaClO_2 , Ajax Finechem) ความเข้มข้น 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนรูปถ่ายต่อสารละลาย 5:100 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และกวน 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างกากด้วยน้ำและอบให้แห้ง 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำกากที่ได้ไปไฮโดรไลซิส โดยใช้อัตราส่วนต่อสารละลายกรดซัลฟิวริก (65.0-68.0% H_2SO_4 , J.T. Baker) ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วน 5:100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต้มส่วนผสมและกวนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 30 นาที แล้วล้างและกรองเก็บตะกอนจน pH 7 อบให้แห้ง 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง [9]

2.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

จุลผลึกเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ศึกษาด้วยฐานวิทยาศาสตร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อีมิสชัน (Field emission scanning electron microscope, FESEM) รุ่น Apreo ยี่ห้อ FEI วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี รุ่น Vertex 70 ยี่ห้อ Bruker ที่ตำแหน่งเลขคลื่นตั้งแต่ 400-4,000 เซนติเมตร⁻¹ (cm^{-1}) และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermogravimetric analyzer, TGA) และอนุพันธ์ทางความร้อน (Differential Thermal Analysis, DTG) ด้วยเครื่อง TGA รุ่น TGA 8000 ยี่ห้อ Perkin Elmer ช่วงอุณหภูมิทดสอบ 25-600 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน (N_2) การวิเคราะห์ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธีดีเทอร์เจนท์ (Detergent method) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์สารอาหารในพืชที่มีเยื่อใยสูง ที่มีส่วนของผนังเซลล์พืช คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งจะเป็นกากที่เหลือจากการต้มด้วยกรดอ่อนและด่าง เมื่อนำไปเผาไหม้เหล่านี้ก็จะสลายไป

ศึกษาโครงสร้างจุลผลึกเซลลูโลสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) รุ่น Empyrean ยี่ห้อ PANalytical และคำนวณขนาดของผลึกของเซลลูโลสโดยใช้สมการของเชียร์ (Scherer equation) ดังสมการที่ (1)

$$d = 0.9\lambda/\beta\cos\theta_B \quad (1)$$

เมื่อ d คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร) λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{CuK}\alpha = 0.15406$ นาโนเมตร) β คือ ความกว้างของกราฟสูงสุดที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง (เรเดียน) และ θ_B คือ มุมสะท้อน (เรเดียน)

คำนวณความเป็นผลึกของเซลลูโลส (Crystallinity index, I_c) จากความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งระนาบ (002) จากผลการทดสอบ XRD ดังสมการที่ (2) [10]

$$I_c = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ I_{002} คือ ความเข้มกราฟที่ตำแหน่ง $2\theta = 22$ องศา ซึ่งเป็นระนาบ (002) ของผลึกเซลลูโลส I_{am} คือ ความเข้มกราฟที่ตำแหน่ง $2\theta = 16$ องศา ที่บ่งบอกถึงโครงสร้างอสัณฐาน

การหาปริมาณความชื้นในจุลผลึกเซลลูโลส ทดสอบได้ด้วยการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังอบ แล้วคำนวณค่าความชื้น (%) ดังสมการที่ (3)

$$\% \text{ความชื้น} = \frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_b และ W_a คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังอบตามลำดับ

การทดสอบความสามารถในการพองตัว โดยมีขั้นตอนการทดสอบ คือ จุลผลึกเซลลูโลส 1 กรัม ชั่งใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำจนเกินพอ และทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นนำไปหมუნเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณค่าการพองตัว (%) ดังสมการที่ (4)

$$\% \text{การพองตัว} = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ W_0 และ W_1 คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนทดสอบ และน้ำหนักตัวอย่างหลังหมუნเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกแล้วตามลำดับ

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะทางกายภาพ ความชื้น และการพองตัวของจุลผลึกเซลลูโลสที่สังเคราะห์

ลักษณะทางกายภาพที่ได้จากการสกัดจุลผลึกเซลลูโลสจากรูปถาษี จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นแผ่นสีน้ำตาลอ่อน ดังรูปที่ 1 (ข) ผลการทดสอบหาปริมาณเซลลูโลสโดยวิธีดีเทอเจนท์ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าเซลลูโลสสังเคราะห์จากรูปถาษีมีปริมาณเซลลูโลสเฉลี่ยสูงถึง 75.47 เปอร์เซนต์ ส่วนเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และความชื้น มีปริมาณ 9.40, 8.33 และ 3.17 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ และมีการพองตัว 6.49 เปอร์เซนต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าปริมาณเซลลูโลสที่สังเคราะห์จากรูปถาษีนั้นมีค่าสูงกว่าเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายและฟางข้าว ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้เพราะปริมาณเซลลูโลสเริ่มต้นของวัตถุดิบมีปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจากการค้นคว้า พบว่าโดยทั่วไปส่วนประกอบของลำต้นของรูปถาษีจะมีปริมาณเซลลูโลสสูงถึง 63.0 เปอร์เซนต์ ในขณะที่ฟางข้าวและใบของเตยทะเลมีปริมาณเซลลูโลสเพียง 32.2 และ 37.3 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ จึงทำให้ปริมาณเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จึงมีปริมาณมากน้อยแตกต่างกันตามพืชแต่ละชนิด [2, 11]



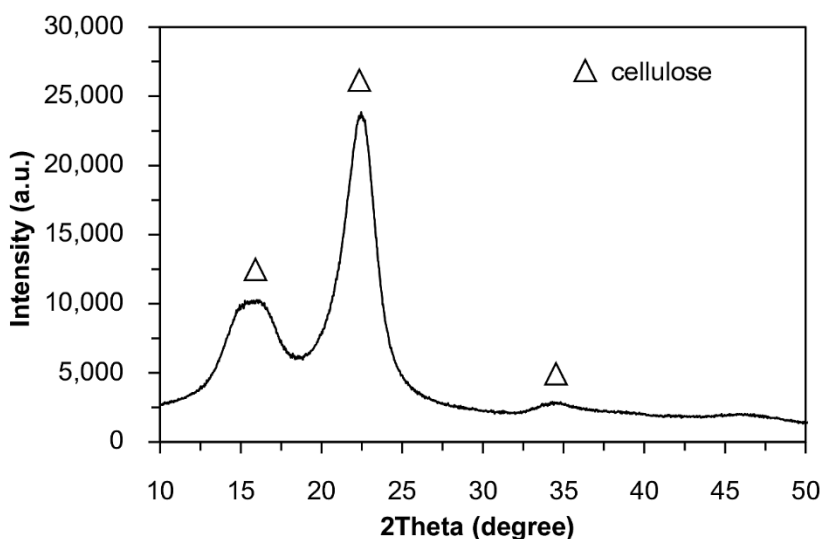
รูปที่ 1 (ก) ต้นรูปถาษี และ (ข) ลักษณะจุลผลึกเซลลูโลสจากรูปถาษีที่เตรียมได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของจุลผลึกเซลลูโลสจากรูปถาษี เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

วัสดุ	Cellulose (%)	Lignin (%)	Hemicelluloses (%)	อ้างอิง
ใบเตยทะเล	81.6	0.8	15.9	[2]
ชานอ้อย	77.6	0.87	21.4	[12]
ฝ้าย	75.1	0.94	19.3	[12]
ฟางข้าว	71.2	1.32	17.4	[12]
แกลบ	33.0	7.0	26.0	[13]
รูปถาษี	75.47	8.33	9.40	งานวิจัยนี้

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

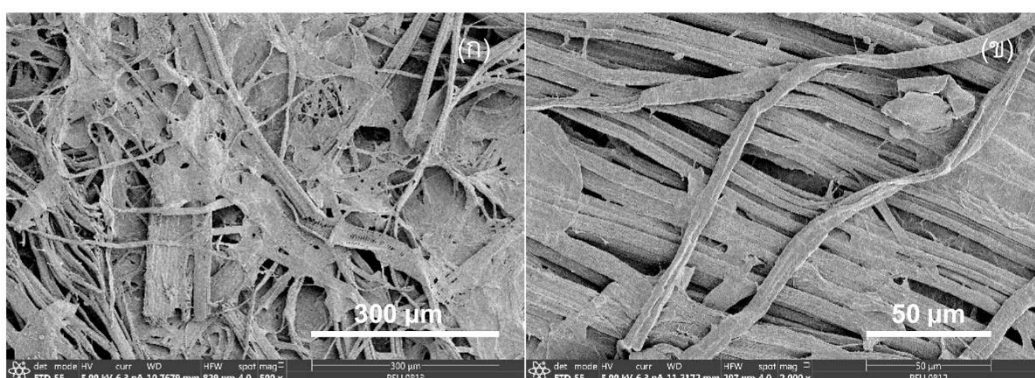
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค XRD จุลผลึกเซลลูโลสที่สังเคราะห์จากธูปฤาษี แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสแสดงที่ตำแหน่งหลัก 2θ ที่ 16, 22 และ 35 องศา บ่งบอกถึงตำแหน่งของโครงสร้างของเซลลูโลส I (Cellulose I) ระนาบ (101), (101) และ (002) ตามลำดับ (JCPDS. No. 03-0226) เมื่อคำนวณความเป็นผลึก (Crystallinity index, I_c) จากความเข้มของตำแหน่งระนาบ (002) ผลการวิเคราะห์ XRD โดยเปรียบเทียบ I_{002} คือ ความเข้มของกราฟที่ตำแหน่ง $2\theta = 22$ องศา ซึ่งเป็นระนาบ (002) ของผลึกเซลลูโลส และ I_{am} คือ ความเข้มของกราฟที่ตำแหน่ง $2\theta = 16$ องศา ซึ่งเป็นโครงสร้างอสัณฐาน ซึ่งโครงสร้างหลักที่พบได้ตามธรรมชาติและมีส่วนประกอบของโครงสร้าง 2 แบบ คือ เซลลูโลส I_α (Celluloses I_α) มีโครงสร้างไตรคลินิก (Triclinic) และเซลลูโลส I_β (Celluloses I_β) จะมีโครงสร้างโมโนคลินิก [13,14] จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2) พบว่าปริมาณเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้มีค่าความเป็นผลึกประมาณ 56.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารที่สังเคราะห์จากธูปฤาษีด้วยเทคนิค FTIR พบตำแหน่งเลขคลื่นตำแหน่งหลักที่สอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน [10] ซึ่งผลการทดลองการดูดความชื้นและความสามารถในการพองตัว ที่คำนวณด้วยสมการที่ (3) และ (4) พบว่าเซลลูโลสมีความชื้น 3.17 เปอร์เซ็นต์ การพองตัวอยู่ที่ 6.49 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2 XRD จุลผลึกเซลลูโลสจากธูปฤาษี

3.3 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของจุลผลึกเซลลูโลสด้วยเทคนิค FESEM แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าลักษณะจุลผลึกเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นเส้นที่มีความยาวประมาณ 230 ไมโครเมตร และกว้างประมาณ 8.33 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3 (ข) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3 (ก) กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นว่าเส้นจุลผลึกเซลลูโลสเกิดการซ้อนทับกัน จุลผลึกเซลลูโลสเมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นด้วยเทคนิค FESEM ของจุลผลึกเซลลูโลสจะยังมีลักษณะเป็นเส้นที่มีความยาวและเกิดการซ้อนกันจนเป็นแผ่น เนื่องจากกระบวนการเตรียมต้นรูปถ่ายที่เกิดจากการตัดให้เป็นชิ้นขนาด 1-5 มิลลิเมตร แล้วบดให้ละเอียดก่อนนำไปสังเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ทำให้เซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีขนาดเป็นเส้นยาวอยู่ และลักษณะจุลผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดแตกต่างกันนั้นเกิดจากผนังเซลล์ของต้นรูปถ่ายที่มีขนาดแตกต่างกันนั่นเอง ซึ่งจุลผลึกเซลลูโลสจะพบอยู่มากในส่วนผนังเซลล์ของต้นรูปถ่าย

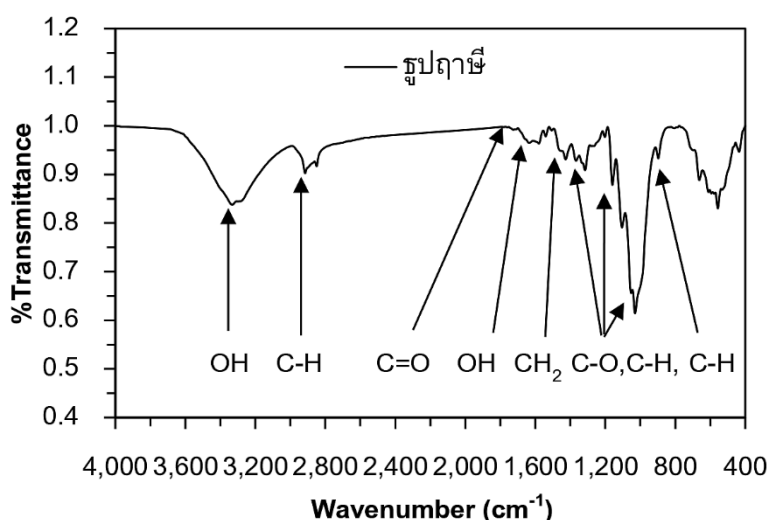


รูปที่ 3 ภาพถ่าย FESEM ของจุลผลึกเซลลูโลสจากรูปถ่ายที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ

3.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

ผลจากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย FTIR ของจุลผลึกเซลลูโลสที่สังเคราะห์จากรูปถ่าย แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1,634-1,640 cm^{-1} และ 3,300 cm^{-1} แสดงถึงการยืด (Stretching) และดัด (Bending) ของหมู่ฟังก์ชัน OH พันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่มีในโครงสร้างเซลลูโลส ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2,800-2,900 cm^{-1} แสดงถึงการยืดออกของ C-H ตำแหน่งเลขคลื่น 1,731 cm^{-1} บ่งบอกถึงหมู่ C-H และ C=O ในหมู่ฟังก์ชันอะซิetyl (Acetyl group) ในโครงสร้างของเอมิเซลลูโลส และ

ตำแหน่งเลขคลื่น 1,640 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการยืดออกของ C=O เอไมด์ (Amides) องค์ประกอบของลิกนินจะพบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,600-1,300 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงลิกนินและการสั่นของวงแหวนอะโรมาติก ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1,330-1,380 เซนติเมตร⁻¹ และ 1,420-1,430 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการดัดของ CH₂ และแสดงถึงการสั่น (Vibration) หมู่ C-H และ C-O ในโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกของพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ตำแหน่งเลขคลื่น 1,250 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการยืดออกของ C-O ในหมู่เอซิล (Aryl group) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,050 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการยืดของ C-O ของแอลกอฮอล์ในโครงสร้างของเซลลูโลสและลิกนิน และการยืดออกของโครงสร้าง C-O-C ในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส [10, 15]

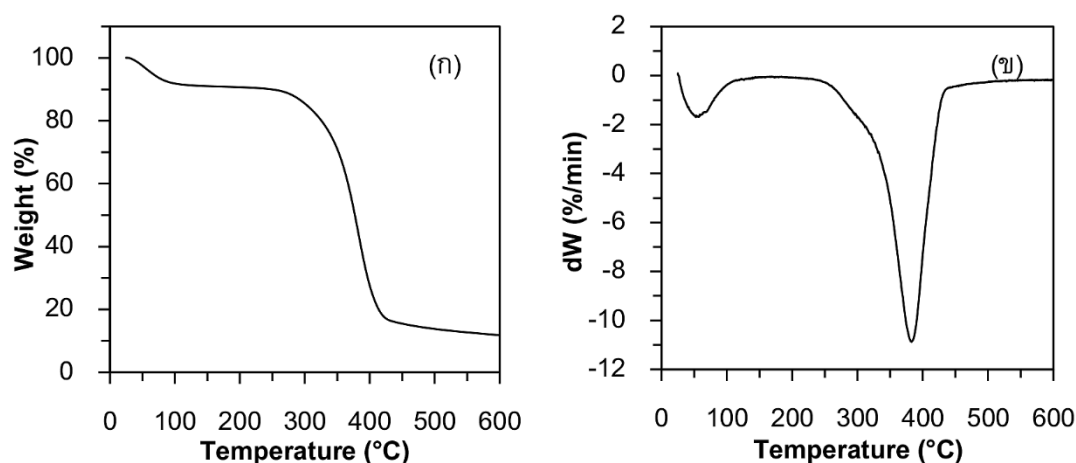


รูปที่ 4 FTIR จุลผลึกเซลลูโลสจากต้นรูปถ่าย

3.5 การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน (TGA) และอนุพันธ์ทางความร้อน (DTG) ของจุลผลึกเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นการทดสอบที่ช่วยวิเคราะห์องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีอยู่ในตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ทางหนึ่ง โดยสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 25-600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน รูปที่ 5 (ก) พบว่าน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบมีการสูญเสียที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เกิดจากการระเหยของน้ำ และความชื้นที่อยู่ในจุลผลึกเซลลูโลส (ตารางที่ 1) ในขณะที่อุณหภูมิ 384 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าน้ำหนักตัวอย่างลดลงเหลืออยู่เพียง 44.4 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากการสลายตัวของคาร์บอนในโครงสร้างเซลลูโลส ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลงระหว่างการทดสอบ ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยของ Brown R. พบว่าการสลายตัว

ของลิกนินจะเกิดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 160 องศาเซลเซียส ในขณะที่การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 315 องศาเซลเซียส [16] ส่วนโครงสร้างเซลลูโลสนั้นผลการทดลองพบอุณหภูมิสลายตัวของเซลลูโลสที่จะเริ่มเกิดการสลายตัวที่ 350 องศาเซลเซียส และพบตำแหน่งกราฟการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 380 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5 (ข) ซึ่งผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้รายงานว่าเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวสูงสุดที่ 370 องศาเซลเซียส ซึ่งจะส่งผลให้น้ำหนักตัวอย่างลดลงเหลือเพียงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ [2, 4, 16, 17]



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ (ก) TGA และ (ข) DTG ของจุลผลึกเซลลูโลสจากธูปฤาษี

4. สรุปผลการวิจัย

การสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลสจากธูปฤาษี ปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดอะซิติก ฟอกขาวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และไฮโดรไลซิสกรดซัลฟิวริก สามารถสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลสจากธูปฤาษีที่มีอัตราผลผลิต 24 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างแสดงโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ผสมกับลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส โดยมีความเป็นผลึกประมาณ 56.6 เปอร์เซ็นต์ผลการเมื่อวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีดีเทอร์เจนท์ที่มีปริมาณเฉลี่ยสูงถึง 75.47 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่เตรียมได้จะมีลักษณะเป็นเส้นซ้อนทับกัน และแต่ละเส้นวางขนานกันเป็นส่วนมาก โดยมีความยาวประมาณ 230 ไมโครเมตร และกว้างประมาณ 8.33 ไมโครเมตร จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตัวอย่างด้วย FTIR พบตำแหน่งเลขคลื่นที่บ่งบอกลักษณะของโครงสร้างของเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ผลการทดสอบอื่น ๆ พบว่าจุลผลึกเซลลูโลสมีความชื้น 3.17 เปอร์เซ็นต์ อัตราการพองตัวอยู่ที่ 6.49 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบตัวอย่างเกิดการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 380 องศาเซลเซียส ที่บ่งบอกได้ถึงโครงสร้างเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากธูปฤาษีนั่นเอง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบรายได้ปี 2562 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

References

- [1] Trache D, Hussin MH, Chuin CT, Sabar S, Fazita MN, Taiwo OF, et al. Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application-a review. International Journal of Biological Macromolecules 2016;93:789-804.
- [2] Sheltami RM, Abdullah I, Ahmad I, Dufresne A, Kargarzadeh H. Extraction of cellulose nanocrystals from mengkuang leaves (*Pandanus tectorius*). Carbohydrate Polymers 2012;88(2):772-9.
- [3] Zuluaga R, Putaux JL, Cruz J, Vélez J, Mondragon I, Gañán P. Cellulose microfibrils from banana rachis: Effect of alkaline treatments on structural and morphological features. Carbohydrate Polymers 2009;76(1):51-9.
- [4] Johar N, Ahmad I, Dufresne A. Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. Industrial Crops and Products 2012;37(1):93-9.
- [5] Kanokpanont S, Inthaphunt S, Bunsiri A. Synthesis of carboxymethyl cellulose from young coconut husk. Songklanakarin Journal of Plant Science 2017;4(4):60-5.
- [6] Šturcová A, Davies GR, Eichhorn SJ. Elastic modulus and stress-transfer properties of tunicate cellulose whiskers. Biomacromolecules 2005;6(2):1055-61.
- [7] Silvério HA, Neto WPF, Dantas NO, Pasquini D. Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from corncob for application as reinforcing agent in nanocomposites. Industrial crops and products 2013;44:427-36.
- [8] Barragán EUP, Guerrero CFC, Zamudio AM, Cepeda ABM, Heinze T, Koschella A. Isolation of cellulose nanocrystals from *Typha domingensis* named southern cattail using a batch reactor. Fibers and Polymers 2019;20(6):1136-44.
- [9] Rosa MF, Medeiros ES, Malmonge JA, Gregorski KS, Wood DF, Mattoso LHC, Glenn G, Orts WJ, Imam SH. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. Carbohydrate Polymers 2010;81(1):83-92.

- [10] Kargarzadeh H, Ahmad I, Abdullah I, Dufresne A, Zainudin SY, Sheltami RM. Effects of hydrolysis conditions on the morphology, crystallinity, and thermal stability of cellulose nanocrystals extracted from kenaf bast fibers. *Cellulose* 2012;19(3):855-66.
- [11] Samitinand T. *Thai Plant Names, The Forest Herbarium*. Royal Forest Dept. Bangkok, Thailand; 2001.
- [12] El-Sakhawy M, Hassan ML. Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues. *Carbohydrate Polymers* 2007;67(1):1-10.
- [13] Agblevor FA, Ibrahim MM, El-Zawawy WK. Coupled acid and enzyme mediated production of microcrystalline cellulose from corn cob and cotton gin waste. *Cellulose* 2007;14(3):247-56.
- [14] El-Naggar ME, Shaarawy S, Hebeish A. Bactericidal finishing of loomstate, scoured and bleached cotton fibres via sustainable in-situ synthesis of silver nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules* 2018;106:1192-202.
- [15] Pasta PC, Silva AC, Jorgetto AO, Saeki MJ, Pedrosa VDA, Martines MA, Schneider JF, et al. Use of *Typha angustifolia* L. as biosorbent to remove chloramphenicol in aqueous samples. *European Journal of Advanced Chemistry Research* 2022;3(1):64-86.
- [16] Brown R. Biochar production technology. In: Lehmann J, Joseph S, editors. *Biochar for environmental management: Science and technology*. London: Earthscan; 2010. p.127-46.
- [17] Li H, Qu Y, Xu J. Microwave-assisted conversion of lignin. In: Fang Z, Smith, Jr. RL, Qi X, editors. *Production of biofuels and chemicals with microwave*. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2015. p. 61-82.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ. สุรพล ชุสวัสต์ สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ต. บ่อทราย อ. เมือง จ. สงขลา 90000 โทรศัพท์ 074-317100 E-Mail: suraphol.c@rmusv.ac.th
 คุณวุฒิ: วศ.ม. วิศวกรรมเหมืองแร่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2546,
 คอ.บ. อุตสาหกรรมเครื่องกล
 งานที่สนใจ: กระบวนการผลิต, วัสดุวิศวกรรม, แม่พิมพ์โลหะ แม่พิมพ์พลาสติก



ผศ. วรวิทย์ ศรีวิทยากุล สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ต. บ่อยาง อ. เมือง จ. สงขลา 90000 หมายเลขโทรศัพท์ 074-317100 E-Mail: worawit.s@rmusv.ac.th

คุณวุฒิ: คอ.ม. เครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2551, อส.บ. เทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ 2548

งานที่สนใจ: กระบวนการเพิ่มผลผลิต, กระบวนการขึ้นรูป ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล



รศ.ดร. มหามะสุไฮมี มะแซ สาขาวิศวกรรมเครื่องนุ่งห่ม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ต. บ่อยาง อ. เมือง จ. สงขลา 90000 หมายเลขโทรศัพท์ 074-324246, 074-316260-3 ต่อ 1205 โทรศัพท์มือถือ 089-6540828, 088-3590728 โทรสาร 074-326492 E-Mail: susumeme1983@yahoo.com

คุณวุฒิ: วศ.ด. วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2554, วศ.ม. วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2550, วศ.บ. วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2549

งานที่สนใจ: Experimental diagnostics in micro/nanoscale systems, Multifunctional ceramic composite coatings, Nanoparticle colloidal suspensions, Conventional and advanced ceramic, Superhydrophobicity/ Superhydrophilicity, Micro/Nano particles, Droplet, spray and sol-gel technologies, Recycle material, Fluid/particle intercalation in molecular structure



ผศ.ดร. พีรวัส คงสง สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เลขที่ 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 หมายเลขโทรศัพท์ 044-233073 ต่อ 3350-3352 โทรศัพท์มือถือ 085-7884988 โทรสาร 044-233074 E-Mail: physics_psu@windowslive.com

คุณวุฒิ: วศ.ด. วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2558, วศ.ม.
วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2554, วท.บ. ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2551

งานที่สนใจ : Superhydrophobicity/Superhydrophilicity, Micro/Nano
particles, Droplet, spray and sol-gel technologies, Photocatalytic
Materials, Nano-Materials, Self-Cleaning Materials, Surface Engineering

Article History:

Received: August 2, 2022

Revised: December 19, 2022

Accepted: December 20, 2022

ELEVATED CYCLE PATH: IS IT SUITABLE FOR BANGKOK, THAILAND?

Bhawat Chaichannawatik¹ and Usanee Raha²

¹Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, 1761 Soi Pattanakarn 37, Pattanakarn Road, Suanluang, Bangkok 10250, Thailand, bhawat.cha@kbu.ac.th

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamheang University, 282 Ramkhamhaeng Road, Hua Mak, Bang Kapi, Bangkok 10240, Thailand, Usanee.raha@gmail.com

ABSTRACT

This paper shows suggestions to develop the elevated cycle path in Bangkok, Thailand. Previous bicycle-related studies in Thailand as well as various completed and successful sky lane projects from other megacities were reviewed. Subsequently, difficulties and potentials to promote bicycle usage in Thailand were identified and grouped into eight key issues consisting of 1) Weather conditions, 2) Number of cyclists, 3) Unsafe conditions, 4) Standard and Regulations, 5) Thai peoples' undesirable values, 6) Bicycle facilities, 7) Limitation of the project area and Connectivity to local business, and 8) Economically feasible but not in finance. Furthermore, while the introduction of elevated bike lane projects in Bangkok will alleviate some problems, it will exacerbate financial difficulties. Finally, some policy-related recommendations for the development of elevated cycle paths in Thailand were introduced.

KEYWORDS: Elevated Bike Lane, Elevated Cycle Path, Sky Lane, Sustainable Transportation.

1. Background

Non-motorized transport modes are often considered an essential element of the sustainable transport system. These include walking, cycling, rickshaws, animal-drawn carts, and rollerblading or skating. Cycling is widely recognized as an environmentally friendly and healthy mode of transportation. Moreover, cycling is an individual mode not only short but medium-distance travel with low costs and high efficiency in the use of road space [1,2].

However, many studies [3-7] point out some limitations to implementing bicycle paths and encouraging cycling in Thailand. The problems are the extremely hot and rainy weather conditions in Thailand, the unsafe condition, and the very high risk of road accidents to cyclists due to lack of bicycle paths, no separated bike lanes, and facilities, etc. while the classic problem is the limitation of the existing roadway to widen or make standard cyclist path, etc.

According to the limitations of land acquisition for road widening designed for a bike lane, many cities planned to build the grade separation bikeway to ensure safety and mobility for cyclists. For example, The Bay Bridge Trail is a 2.2 miles bicycle and pedestrian elevated path from Oakland to Yerba Buena Island that opened in September 2013 [8]. Norman Foster introduced a blueprint for an airborne cycleways network in London in 2014, called “Sky Cycle” 140 miles of elevated, car-free, 50-foot-wide bike paths which can connect six million people, accommodating 12,000 riders an hour [9].

In 2015, the Nelson Street Cycleway is a cycleway (and in some sections, a shared pathway for walking and cycling) in Auckland, New Zealand. Stage 1 of the project was opened on 3 December 2015, and Stage 2 opened in December 2017. The last part of the route to the waterfront is still incomplete as of 2019. Once completed, the route will give access from Upper Queen Street to the Auckland CBD and the cycleway along the waterfront [10]. In 2016, one of the Sky Cycle project’s leaders said that the \$10.7 billion infrastructure project was still in the works, but there are no visible signs of progress [11]. In 2016, Melbourne also considered constructing a \$100 million elevated bicycle superhighway, which would separate cyclists from motorists in the central business district by building out a network of bike corridors in the sky [12]. In 2017, Davies [13] showed that BMW wants to build networks of Elevated Cycling Paths called the E3 Way—that are for elevated, electric, and efficient. In 2019, Seoul would like to create a safer cycling infrastructure in the city. There are currently around 900 kilometers of ground-level bike lanes in Seoul. However, only the paths along the Han River Park — around 260 kilometers — provide a continuous and safe path separated from vehicles and pedestrians [14].

For Thailand, according to some limitations to implementing normal cycle paths, in 2014, the Expressway Authority of Thailand (EXAT) [15] studied the feasible to develop a bicycle network master plan along the area under the 207.9 km of expressway with some elevated sections within the standard of operation and the convenience to the travel need of daily activities’ area user in which the project can support convenience, easiness, safety and

economical uses; then, it can also support the daily bicycle use practically under the concept of "Bicycle Expressway" (See Figure 1). Moreover, in 2019, Smart City Innovative Research Academy (Scira) under King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang has come up with an idea it calls "The Sky cycle Project". The project proposes the construction of a 21 km elevated bicycle route that will run parallel with the Airport Rail Link (ARL) which starts from Phaya Thai BTS station and terminates in Lat Krabang [16] (See Figure 2). However, both elevated bike path projects in Thailand are still not implemented.



Figure 1 "Bicycle Expressway" a pilot bicycle route along the expressway (Ramindra - Rama 9 – Ratchadapisek Rd.), Bangkok. [15]



Figure 2 "The Sky cycle Project" elevated bicycle route that will run parallel with the Airport Rail Link (ARL). [16]

2. Completed and Successful Sky Lane Projects

There are not so many places that have successfully made elevated bike paths. In the Netherlands, the cities of Eindhoven and Veldhoven have lifted cyclists above a busy intersection without harm since June 2012. Hovenring, this stylish roundabout replaced the former level crossing here, which could not cope with growing traffic. Eindhoven City Council refrains from cyclist underpasses and wanted a separate-level roundabout, they asked Dutch bridge specialists to investigate possible solutions. A circular cable-stayed bridge soon was the best choice [17]. Copenhagen's "Cykelslangen", "Bicycle Snake" in Danish, is just 721 feet long but allows the city's many bikers to pedal over a waterfront shopping area, instead of pushing through its crowds of pedestrians, elevated 5.5 meters above ground level at its highest point, the Bicycle Snake has replaced what used to be an uncomfortable bicycle trek down two steps of stairs, followed by a slow, cautious ride through crowded pedestrian plazas [18].

From Oakland to Yerba Buena Island, the Bay Bridge Trail is a 2.2-mile elevated bicycle and pedestrian path. It is a part of the San Francisco Bay Trail. To ensure user safety, the 15.5-foot-wide path has one lane in each direction for bicyclists and an outside lane designated for pedestrians. The total bicycle and pedestrian usage of this link are both more than 420,000 trips since November 2016 [8]. The detail of the monthly distribution of bikes and pedestrians is shown in Figure 3.

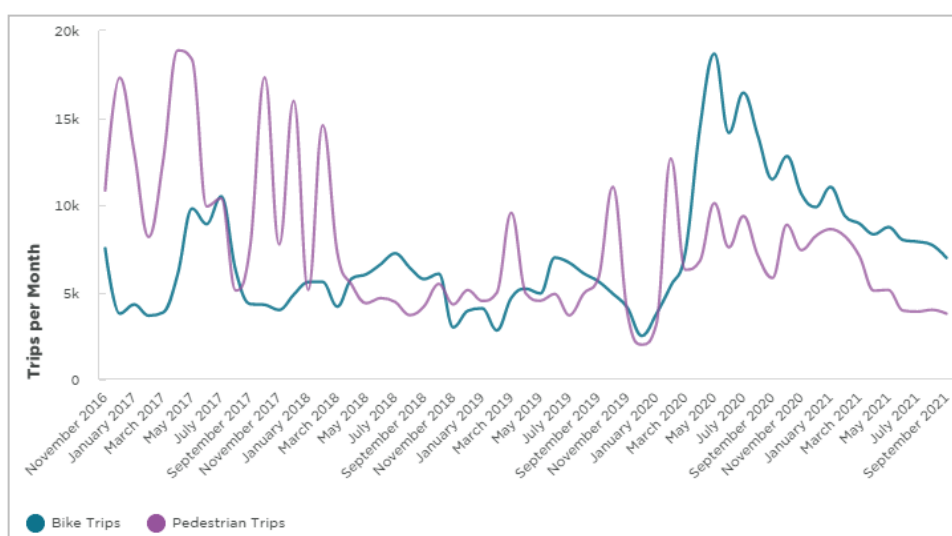


Figure 3 Monthly bike and pedestrian traffic on San Francisco-Oakland Bay Bridge [8]

In 2016, Rio de Janeiro, Brazil opened the new Avenida Niemeyer bicycle lane which runs along the Atlantic coastline. Rio has the most extensive network of urban bike lanes in Latin America and is attempting to finish construction on other lanes linking more parts of the city to the area where the Olympic Park is located. The Rio 2016 Olympic Games began in August [19, 20]. In January 2017, Xiamen, in southeast China, opened the world's longest example, which connects to small side bridges with parking for bicycles, service facilities, and access to shopping centers and bus stations at the same height as the cycle path [21]. Figures 4 to 11 show the physical geometry of the above sky lane projects.



Figure 4 “Sky Cycle” of London [9]



Figure 5 Xiamen's elevated bikeway [21]



Figure 6 “Hovenring” in the Netherlands [17]

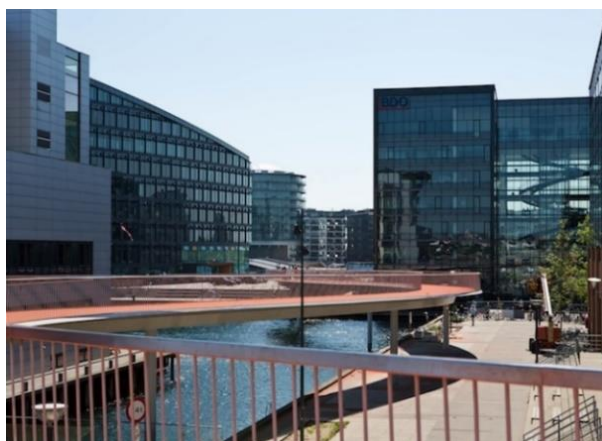


Figure 7 “Cykelsangen” (Bicycle Snake Bridge) in Copenhagen [18]



Figure 8 “Under the C” Seoul, Korea [14]



Figure 9 “The Pink Bike Path” Nelson Street Cycleway, New Zealand [22]



Figure 10 Avenida Niemeyer, Rio, Brazil [20]



Figure 11 Bicycle “superhighway”, Melbourne’s west, Australia [23]

3. Problems and Suggestions of Bicycle Path Implementation in Thailand

Several studies have been conducted in other countries to investigate the problem of using bicycle lanes. However, due to the limitations of Bangkok, study areas may cause some other specific problems. Therefore, a review related to the problem of bicycle usage in the Bangkok area was reviewed. According to the literature of earlier bicycle studies in Bangkok, Thailand [3-6, 24-34], problems and suggestions for bicycle path implementation in Thailand could be summarized into eight groups, as shown in Table 1.

Table 1 Problems and Suggestions to implement cycle path in Thailand

Issues	Detail of Problems	Suggestions
1. Weather conditions	- Hot and rainy weather makes short possible biking distance.	- Make beautiful, covered bike paths with trees or roofs.
2. Number of cyclists	- Not so many bicycle users in daily travel for work or school trips. - No bicycle user statistics are collected. - The normal distance for work and school trips is much greater than the possible biking distance.	- Promote daily non-motorized travel. - New Mixed land use planning. - Promote electric bicycles and Personal Mobility Vehicles (PMV).
3. Unsafe conditions	- No separation from motor vehicles (using the same lane). - No continuity of the bike lane (a lot of traffic conflicts, and obstructions) - The bad pavement of the sidewalk - No lighting	- Provide more safety by making a continuous and separated bicycle network (elevated/underground) with good pavement and lighting.
4. Standard and Regulations	- No laws and regulations for cyclists. - No standard of bicycle facilities design.	- Develop and improve special laws and regulations for cyclists. - Develop standards and guidelines for bicycle design.

Table 1 Problems and Suggestions to implement cycle path in Thailand (continued)

Details	Problems	Suggestions
5. Thai people's undesirable values	- The private car is the most popular mode even on short-distance trips. - Low priority of cyclists compared to other modes.	- Give priority to walking and cyclists. - Promote other road users to change their cultural attitudes to ride a bicycle.
6. Bicycle facility	- Safe parking area. - Lack of fix and repair shop. - Not enough public bathrooms.	- Provide more bicycle facilities along with the network.
7. Limitation of project area and connectivity to local business	- In CBD, it is hard for land acquisition to build bike paths. - Some concept routes seem too far from CBD. For the suburban area, there are not so many activities and users.	- Sky lane development. - Select a suitable location to connect with communities and businesses. - Make better connectivity with other private and public transportation systems such as The Metropolitan Rapid Transit (MRT), Bangkok Mass Transit System (BTS), Airport Rail Link (ARL), Expressway, bus, train, canal, riverboat, etc.
8. Economically feasible but not in finance	- Most projects required a lot of budgets for investment. - Not so much direct benefit due to fewer bicycle users in daily travel.	- Provide investment budget from other sources such as Oil Fuel Fund (OFF), car-toll fee, congestion charge, or revenue from advertisement and rents space for commercial development, etc.

4. Discussion and Conclusion for Elevated Cycle Path Development in Thailand

Nowadays, many megacities are interested to promote bicycle travel, a non-motorized transport, for healthy, safe, and environmental sustainability development. Consequently, the

concept of an elevated bike lane is also introduced in Bangkok, Thailand according to the limitation of land acquisition and extreme traffic jams in Bangkok.

However, consistent with the literature, problems, and suggestions to encourage bicycle usage were found and summarized into 8 groups as follows: 1) Weather conditions, 2) Number of cyclists, 3) Unsafe conditions, 4) Standard and Regulations, 5) Thai peoples' undesirable values, 6) Bicycle facilities, 7) Limitation of the project area and connectivity to local business, and 8) Economically feasible but not in finance as shown in Table 1.

For Bangkok, some conceptual projects of elevated cycle lanes [15, 16] were introduced to lessen the problems of the unsafe conditions, land acquisition, weather conditions, the design standards, together with the development of related facilities for cyclists such as safe parking, public bathrooms, storage lockers, etc. Although the improvement in elevated cycle infrastructure and facilities can encourage more biking. However, the grade separation will lead to exacerbating financial problems.

On the other hand, some policy-related suggestions from earlier research [34-40] could be implemented in Thailand. For example, the local government, Bangkok Metropolitan Administration (BMA), should provide comprehensive policy approaches empowering all levels (society, city, neighborhood, and individual) and promote plans to increase bicycle usage such as bike-sharing campaigns, tax reduction for cyclists, cash incentives for employees instead of parking fees, and electric bike promotion, etc. Moreover, BMA should select a suitable location to connect with communities and businesses and make an alliance between the public and private sectors to take part in partnership in activities. For example, a pilot project involving the private sector to participate in bike-sharing, private bathrooms, private bicycle service and maintenance, private tunnel connection, etc. Furthermore, the office of transport and traffic policy and planning (OTP) and the Department of Land Transport (DLT) should develop and improve special laws and regulations to prioritize and protect cyclists.

Besides that, Hull and O'Holleran [38] pointed out that funding is the major factor to encourage best practices. The Netherlands, Cambridge, and Edinburgh governments spend 45, 17, and 6.5 to 8.0 USD per person on cycling provision. Hence, the Government of Thailand also should allocate the budget for the subsidy from income resulting from other sources such as congestion charges, increased excise taxes, or Oil Fuel Fund (OFF), toll fees, or revenue from advertising revenue, and rents space for commercial development,

etc. Hence, there will obtain a continuous and sufficient amount of budget. This will help to continuously prepare a project as design, build, operation and maintenance without compromising the quality of service.

Lastly, BMA, as the local government, should assist in the development of community bike paths surrounding the pilot project area in order to achieve the bicycle network completeness, and cooperate with other agencies concerned with public transportation to help in developing the travel connections in case of the bicycle paths connect through the public transportation such as MRT, BTS, ARL, bus, train, canal, and Chao Phraya riverboat, etc.

References

- [1] Gatersleben B, Appleton KM. Contemplating cycling to work: Attitudes and perceptions in different stages of change. *Transportation Research Part A Policy and Practice* 2007;41(4):302-12.
- [2] Pucher J, Buehler R. Making cycling irresistible: lessons from the Netherlands, Denmark and Germany. *Transport Reviews* 2008;28(4):495-528.
- [3] Kasetsart University. A summary report on the evaluation of the bicycle routes in Bangkok. Bangkok Metropolitan Administration (BMA), BKK, Thailand; 2013. (In Thai)
- [4] Chaichannawatik B, Boonyoo T, Punurai S, Leuanpech P, Lueangvilai E. Travel Demand Forecasting on Bicycle Route under Expressway in Thailand. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* 2017;6(4):293-7.
- [5] Srisurapanon V, Tangtrongchit MP, Ard-Onk K, Limsuttiruch P, Kiatpanachart K, Luengsirinapha P. Guideline for improvement the usage of bicycle in Bangkok. Sponsored by The Thailand Research Fund; 2003. (In Thai)
- [6] Raha U, Taweessin K. Encouraging the use of non-motorized in Bangkok. *Procedia Environmental Sciences* 2013;17:444-51.
- [7] Limsuttiruch P. Guide of Improvement Crossway and Intersection for Bicyclist [Master Thesis]. Bangkok, Thailand: King Mongkut's University of Technology; 2002. (In Thai)
- [8] San Francisco-Oakland Bay Bridge [Internet]. Metropolitan Transportation Commission. 2021 [cited 2022 Sep 6]. Available from: <https://mtc.ca.gov/operations/programs-projects/bridges/san-francisco-oakland-bay-bridge>

- [9] Stone M. Plans for A futuristic elevated bike path could put London cyclists in the sky [Internet]. Insider. 2014 [cited 2021 Sep 19]. Available from: <https://www.businessinsider.com/london-elevated-bike-path-plan-2014-1>
- [10] Wikipedia contributors. Nelson Street Cycleway [Internet]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2021 [cited 2021 Sep 19]. Available from: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nelson_Street_Cycleway&oldid=1028786632
- [11] Beach J. Whatever happened to London's Sky Cycle project? [Internet]. BikeRadar. 2016 [cited 2021 Sep 19]. Available from: <https://www.bikeradar.com/features/whatever-happened-to-londons-sky-cycle-project/>
- [12] Kinney J. Melbourne floats idea of elevated bike path [Internet]. Nextcity.org. [cited 2021 Sep 19]. Available from: <https://nextcity.org/daily/entry/melbourne-elevated-bike-path-cycleway-congestion>
- [13] Davies A. So, BMW wants to build networks of elevated cycling paths. Wired [Internet]. 2017 Nov 24 [cited 2022 Sep 6]; Available from: <https://www.wired.com/story/bmw-elevated-bike-cyclist-paths-concept/>
- [14] L. Suh-yoon, Seoul unveils blueprint for elevated bike paths [Internet]. The Korea Times. 2019 [cited 2022 Sep 6]. Available from: https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2019/02/281_263179.html
- [15] The Expressway Authority of Thailand (EXAT). Executive Summary Report: Feasibility study in engineering, Economics, and Financial for the development of bicycle network master plan in the area of expressway. Bangkok, Thailand; 2014. (In Thai)
- [16] Wacharoen S. "Skycycle lane" offers elevated congestion-free travel [Internet]. <https://www.bangkokpost.com>. 2019 [cited 2021 Sep 19]. Available from: https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1750494/skycycle-lane-offers-elevated-congestion-free-travel?utm_medium=Social&utm_source=Facebook
- [17] Marsal A. The dutch have built an elevated roundabout just for bikes [Internet]. We Love Cycling magazine. We Love Cycling; 2016 [cited 2021 Sep 19]. Available from: <https://www.welovecycling.com/wide/2016/11/02/dutch-built-elevated-roundabout-just-bikes/>
- [18] Natalie Gulsrud HS. Cykelslangen Copenhagen: An urban snake [Internet]. Topos Magazine. 2016 [cited 2021 Sep 19]. Available from: <https://www.toposmagazine.com/copenhagen-cykelslangen>

- [19] Tribune news services. Part of elevated bike lane built for Rio Olympics collapses, killing 2. Chicago tribune [Internet]. 2017 Nov 18 [cited 2021 Sep 20]; Available from: <https://www.chicagotribune.com/sports/olympics/ct-rio-olympics-evelated-bike-line-death-20160421-story.html>
- [20] Bicycle path in Rio DE Janeiro - all you need to know [Internet]. Free Walker Tours. 2019 [cited 2021 Sep 18]. Available from: <https://freewalkertours.com/bicycle-path-in-rio-de-janeiro-all-you-need-to-know/>
- [21] The World's Longest Elevated Cycle Path Built in Record Time [Internet]. State of Green. 2017 [cited 2021 Sep 20]. Available from: <https://stateofgreen.com/en/partners/dissingweitling-architecture/news/the-worlds-longest-elevated-cycle-path-built-in-record-time>
- [22] This pink cycling lane in New Zealand amazed the world [Internet]. LifeGate. 2016 [cited 2021 Sep 20]. Available from: <https://www.lifegate.com/pink-cycling-lane-new-zealand>
- [23] Bicycle "super highway" planned for Melbourne's west [Internet]. Landscape Australia. [cited 2021 Sep 20]. Available from: <https://landscapeaustralia.com/articles/bicycle-super-highway-planned-for-melbournes-west/>
- [24] Pongprasert P, Kubota H. Factors Affecting Residents Living near Transit stations to Use Non-Motorized Access Mode: Case study about Daily Travel in Bangkok, Thailand. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 2017;12:854-73
- [25] Likitmanchai C. Legal Measures to Support Bicycle Culture in Bangkok Province [Master Thesis]. Bangkok, Thailand: Thammasat University; 2015. (In Thai)
- [26] Kumkheaw P. Evaluation of Community Bicycle Route: A Case Study of the Rattanakosin Island. In: the 3rd National RMUTR Conference. Prachuap Khiri Khan, Thailand; 2018. p. 8-15 (In Thai)
- [27] Upala P. A modal Integration between Bicycle and Mass Transit System (BTS): A Case Study on Ari Station. Bangkok [Master Thesis]. Bangkok, Thailand: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang; 2002. (In Thai)
- [28] Prasert P. Guidelines for The Development of Areas under The Expressways [Master Thesis]. Bangkok Thailand: Chulalongkorn University; 2003. (In Thai)
- [29] Suwansung K, Chaiyot C, Rimnate W, Nokkaew N. A Satisfaction study for bikeway users along Klong Rungsit (Klong 3-5). Journal of Engineering, RMUTT 2008;12:27-39. (In Thai)

- [30] Assawabunyalert J. Why do Thai people not use bicycles? In: 1st Bike and Walk Forum. Bangkok, Thailand; 2013. (In Thai)
- [31] Rotchanatham N, Supapipat S. Development of Infrastructure for Bicycle Users in Bangkok's Public Transportation System. In: 4th Bike and Walk Forum. Bangkok, Thailand; 2016.
- [32] Pittangnapho V. Factors Affecting the Decision on Bicycle Daily Uses in Thailand for Bike Users. 1st Bike and Walk Forum. Bangkok, Thailand; 2013.
- [33] Kaewnark P, Vijitsrikamol K, Karnnasuta S. A Study of Bike Way Utilization on Bangkok Using Binary Logit Model. Journal of the Association of Researchers 2018;23(1):167-78.
- [34] Bakker S, Guillen MD, Nanthachatchavankul P. Cycling as a mobility option for ASEAN megacities. Developments in Bangkok and metro manila. GIZ; 2016.
- [35] Winters M, Buehler R, Götschi T. Policies to promote active travel: Evidence from reviews of the literature. Current Environmental Health Reports [Internet]. 2017;4(3):278-85. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s40572-017-0148-x>
- [36] Mateu G, Sanz A. Public policies to promote sustainable transports: Lessons from Valencia. Sustainability [Internet]. 2021;13(3):1141. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/su13031141>
- [37] Moving toward active transportation: How policies can encourage walking and bicycling [Internet]. Activelivingresearch.org. [cited 2022 Sep 6]. Available from: https://activelivingresearch.org/sites/activelivingresearch.org/files/ALR_Review_ActiveTransport_January2016.pdf
- [38] Hull A, O'Holleran C. Bicycle infrastructure: can good design encourage cycling? Urban, Planning and Transport Research [Internet]. 2014;2(1):369-406. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/21650020.2014.955210>
- [39] Martin A, Suhrcke M, Ogilvie D. Financial incentives to promote active travel: an evidence review and economic framework. American Journal of Preventive Medicine [Internet]. 2012;43(6):e45-57. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amepre.2012.09.001>
- [40] Pucher J, Buehler R. Cycling towards a more sustainable transport future. Transport Reviews [Internet]. 2017;37(6):689-94. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2017.1340234>

Author's Profile

Asst.Prof.Bhawat Chaichannawatik, Ph.D. He is the Associate Dean for Research Affairs, Faculty of Engineering, and Director of Transportation Sustainability and Innovation of Technology research center (TransIT) at Kasem Bundit University (KBU), Thailand. He got a Doctoral of Philosophy (Transportation Engineering) from the Asian Institute of Technology (AIT). He teaches at Civil Engineering Department responsible for highway and transportation engineering subjects since 2007. His major responsibilities are management & administration of several R&D and academic service projects of TransIT, KBU. His research interest fields are the research of Traffic and Transportation Engineering, Traffic Planning and Management, Road Safety, etc.



Asst.Prof.Usanee Raha. She graduated with a Master of Engineering (Transportation Engineering) from King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand. She is a lecturer in Civil Engineering Department responsible for highway and transportation engineering subjects at Ramkhamheang University (RU), Thailand. for 18 years. She is a registered professional engineer of Thailand (Civil Engineering). She is also a member of the Engineering Institute of Thailand Under H.M.King's Patronage (Thailand) as a Civil Engineering Fellow. Her research interest fields are the research of Non-Motorized Transportation Engineering, Traffic Planning, Management, etc.

Article History:

Received: February 8, 2022

Revised: September 6, 2022

Accepted: December 20, 2022

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคตารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดาการ	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghmati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุ่ง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณฐา คุปต์ขันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนุ ฉุยฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมื่อวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภูวโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	รองอธิการบดี สายงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สื่อเจีย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทรัชย์ บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วรพจน์ กริสรุเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชร เพ็ญสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิรักษ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรันดร จิตต์โสภักตร์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน
รศ.วิญญู แสงสนิทกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจรรย์ประวัตติ	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตติ	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณทล ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เขมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จรรุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าฤทธิธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาศาสปิ	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุนนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ แทะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ สุขมิตรโยธิน	โปรแกรมวิทยาศาตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พงษ์สัณฐ์ ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ. ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ฐันทนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรัญญู วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.วินัย ไฉกล้ำ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริชล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนธิ วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนคร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิตางศุ์ พิลัยหล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อนุญัย ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษฎชัย วิถีพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิหิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย นเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณภา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐกรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
อ.ดร.คุณหญิง สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิชญ์พิบูล	คณะกรรมการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการ จัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงศิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

อ.ดร.ปริญญา บุญณินฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ปรารภนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชญุตม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ภักพัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตนโกสินทร์
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อ.ดร.ศรินทร์น์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณ สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
อ.ดร.อติเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.พุทธิพงศ์ เหล็กรัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

อ.จีรวัฒน์ ปลั่งไหม	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนันท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทร์เรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.นิติมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
อ.สมเดช อิงคะวะระ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



ปรัชญา ปณิธาน

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมที่มีคุณภาพ เพื่อสนองความต้องการของส่วนราชการ เอกชน ให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ
2. ค้นคว้าและวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะสิ่งที่ยังประโยชน์ให้เกิดแก่ประเทศไทยโดยตรง
3. บริการวิชาการ และให้คำปรึกษาแนะนำทางวิศวกรรมศาสตร์แก่หน่วยงานของรัฐและเอกชน รวมทั้งประชาชนทั่วไป

เป้าหมาย และวัตถุประสงค์

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อแสวงหาเทคโนโลยีที่ทันสมัย อันนำไปสู่การพัฒนาตนเองทางเทคโนโลยีในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ
2. ให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์แก่สังคม

วิสัยทัศน์

**“คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เป็นคณะวิศวกรรมศาสตร์
ที่ติดอันดับ 1 ใน 10 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอกชน ที่เป็นที่ยอมรับ
โดยมุ่งเน้นผลิตบัณฑิตวิศวกรนักปฏิบัติที่มีมั่นคงและยั่งยืน”**

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์ต้นฉบับบทความ มาที่

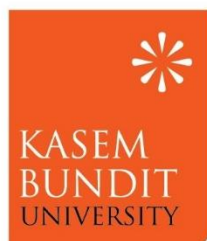
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

และสมัครสมาชิกพร้อมส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

ท่านที่สนใจสามารถดูรายละเอียดและดาวน์โหลดแบบฟอร์มต่างๆ หรือสอบถามเพิ่มเติม ได้ที่

- เว็บไซต์: http://eng.kbu.ac.th/home/?main_page=research&page=engineer_journal
- E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th
- <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>
- โทรศัพท์: 0-2320-2777 ต่อ 1211



www.kbu.ac.th

วิทยาเขตพัฒนาการ

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ 10250
โทร. 0-2320-2777
Fax : 0-2321-4444

วิทยาเขตร่มเกล้า

60 ถนนร่มเกล้า เขตมีนบุรี
กรุงเทพฯ 10510
โทร. 0-2904-2222
Fax : 0-2904-2200