

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ISSN 2286-668X

KASEM BUNDIT

Engineering Journal



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2564
Vol.11 No.3 September - December 2021

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2564

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

Volume 11 No.3 September-December 2021

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

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนา 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
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือคัดลอกมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 2 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 ไชยชาวนาทิก	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.จีรานุช 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 วรากุลศิริพันธ์	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	คุณกรศิริ จันท์สุขเจริญจินดา
คุณรุ่งนภาพร ภูธรธราช	

บทบรรณาธิการ

ในวาระที่วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตได้ดำเนินงานครบ 11 ปี ทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ รู้สึกเป็นเกียรติที่ได้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของประเทศไทย และมีความก้าวหน้าและเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยปัจจุบันวารสารมีกำหนดการเผยแพร่ทุก 4 เดือน (3 ฉบับต่อปี) โดยในการพิจารณาบทความทางวารสารฯ ยังได้เพิ่มจำนวนผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความภายนอกจากหลากหลายสถาบันเป็น 3 ท่าน เพื่อให้สอดคล้องกับประกาศ ก.พ.อ. วันที่ 26 เมษายน 2564 เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2564 นับจากวันที่ประกาศข้างต้นแล้ว

หนึ่งในช่วงสองปีที่ผ่านมา ทั่วโลกได้ประสบกับปัญหาการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) โดยมีจำนวนผู้ติดเชื้อทั่วโลกทั้งสิ้นกว่า 278 ล้านคน เสียชีวิตกว่า 5.4 ล้านคน คิดเป็นอัตราผู้เสียชีวิต 691.9 คนต่อประชากรล้านคน สำหรับประเทศไทยมีจำนวนผู้ติดเชื้อกว่า 2.2 ล้านคน เสียชีวิต 21,500 คน คิดเป็นอัตราผู้เสียชีวิต 307 คนต่อประชากรล้านคน (ข้อมูลจาก worldometers.info) และปัจจุบันยังได้กลายพันธุ์เป็นสายพันธุ์ Omicron ที่สามารถแพร่ได้เร็วกว่า Delta ถึง 4 เท่า

จากสถานการณ์ข้างต้น ดังนั้นในวาระดิถีปีใหม่ 2565ที่กำลังจะมาถึงนี้ กองบรรณาธิการใคร่ขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายในสากลโลก โปรดดลบันดาลให้นักวิชาการ นักวิจัย และผู้เขียนทุกท่านมีสุขภาพพลานามัยแข็งแรง ปลอดภัย สามารถดำเนินกิจกรรมด้านการวิจัยและสร้างสรรค์ผลงานวิจัยและวิชาการ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศได้อย่างต่อเนื่อง และสัมฤทธิ์ผลในสิ่งอันพึงปรารถนาทุกประการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ

บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

- การประยุกต์ใช้อัณุกรมของวอลเตอร์กับระบบระดับความเสรีหลายชั้นแบบไม่เชิงเส้น
THE APPLICATION OF VOLTERRA SERIES FOR MDOF NONLINEAR SYSTEM 1
ปริญญา บุญมาเลิศ และ ธนุ ญญา
- การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกสารทำงานของระบบปั๊มความร้อน
สำหรับงานอบแห้งอุณหภูมิปานกลาง
DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL TO SELECT THE WORKING
FLUIDS OF HEAT PUMP SYSTEMS FOR MEDIUM-TEMPERATURE DRYING 17
APPLICATIONS
สรวิศ สอนสารี สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์ และ วิสุทธิ์ แซ่มสะอาด
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น
DESIGN AND DEVELOPMENT A SLICED BAMBOO-SHOOTS CUTTER 38
สุวิมล เจียรธรวาณิช
- ผลกระทบมาตรการความปลอดภัยต่อผลิตภาพแรงงานในกิจกรรมฝ้าเพดาน
IMPACT OF SAFETY MEASURE ON LABOR PRODUCTIVITY IN CEILING 56
ACTIVITIES
สุนันท์ มนต์แก้ว
- การอบแห้งกล้วยหอมดิบด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบ
ความร้อนเสริมควบคุมทางไกลผ่านสมาร์ตโฟน
BANANA CHIPS DRYING IN SOLAR GREENHOUSE IN ASSOCIATION WITH 72
SMARTPHONE-CONTROLLED HEAT SYSTEM
ฤทธิ์รงค์ เสนาโนฤทธิ์ และ กมลวรรณ จิตจักร
- PAVING BLOCKS FOR THE ELDERLY: A STUDY OF THE PREPARATION OF
CONCRETE MIXED WITH CRUMB RUBBER AND BONDED RUBBER 90
Chaiwute Vudjung and Suwimon Thiakthum

การประยุกต์ใช้อ่อนุกรมของวอลเตอร์รากับระบบระดับความเสรีหลายชั้น แบบไม่เชิงเส้น

THE APPLICATION OF VOLTERRA SERIES FOR MDOF NONLINEAR SYSTEM

ปริญญาน บัญมาเลิศ¹ และ ธนู จุยฉาย²

^{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

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการใช้อ่อนุกรมของวอลเตอร์รากับระบบระดับความเสรีหลายชั้นแบบไม่เชิงเส้น โดยได้แสดงผลในรูปแบบของเมตริกซ์เพื่อลดความซับซ้อนในการนำเสนอ เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจนในการใช้อ่อนุกรมของวอลเตอร์รากับระบบระดับความเสรีหลายชั้น ในงานวิจัยนี้ได้แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้อ่อนุกรมของวอลเตอร์รากับระบบระดับความเสรีสองชั้นที่ไม่เชิงเส้นแบบหนึ่งสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก โดยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สองที่ได้จากการคำนวณได้นำเสนอในรูปแบบของกราฟ จากกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองนำเสนอที่ความถี่ $\omega_{r1} = \omega_{r2}$ พบว่าความถี่ซ้ำฮาโมนิกที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่มูลฐานครึ่งหนึ่ง ในส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามได้นำเสนอฟังก์ชันถ่ายโอนในแนวเส้นทแยงมุมที่ $\omega_{r1} = \omega_{r2} = \omega_{r3}$ จากกราฟจะสามารถมองเห็นความถี่ซ้ำฮาโมนิกที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่มูลฐานโดยมีค่าเป็นหนึ่งในสามของความถี่มูลฐานและพบว่าบางความถี่เข้าไปแทรกแซงความถี่มูลฐานด้วย ซึ่งความถี่แบบนี้จะไม่สามารถเห็นได้ในฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง และในทางปฏิบัติความถี่ซ้ำฮาโมนิก เหล่านี้อาจปรากฏในฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการวัดสัญญาณได้

คำสำคัญ: อ่อนุกรมของวอลเตอร์รา, ระดับความเสรีหลายชั้นแบบ, ความถี่ซ้ำฮาโมนิก, ความถี่มูลฐาน

ABSTRACT

This research presents the method of using the Volterra series for MDOF nonlinear system. It is displayed in the form of a matrix to simplify the presentation. To achieve an understanding of the use Volterra series with MDOF nonlinear system. Volterra series is applied to the two degrees of freedom nonlinear system in single input multi output (SIMO). The calculated first and second-order transfer functions are presented as graphs. The graphs of the second-order transfer functions are presented at frequency $\omega_{r1} = \omega_{r2}$. It can be seen the subharmonic frequency is half of the fundamental frequency. The graphs of the third order transfer functions are presented at a diagonal line at $\omega_{r1} = \omega_{r2} = \omega_{r3}$. From the graph, it can be seen the subharmonic frequency is lower than the fundamental frequency, which is one-third of the fundamental frequency, and it is found that some frequencies interfere with the fundamental frequency. This kind of frequency cannot be seen in the first-order transfer function. In practice, this subharmonic frequency may appear in the transfer function obtained from the signal measurement.

KEYWORDS: Volterra series, MDOF, Subharmonic frequency, Fundamental frequency

1. บทนำ

โดยปรกติแล้วอนุกรมของวอลเตอร์รา [1] จะนิยมใช้กับระบบระดับความถี่ชั้นเดียวที่ไม่เชิงเส้น เนื่องจากง่ายต่อการนำเสนอฟังก์ชันถ่ายโอนลำดับต่าง ๆ ของอนุกรม แต่ในกรณีของระบบระดับความถี่หลายชั้นเมื่อนำอนุกรมของวอลเตอร์รามาใช้ จะทำให้เกิดความยุ่งยากในการนำเสนอ งานวิจัยนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้ออนุกรมของวอลเตอร์รากับระบบระดับความถี่หลายชั้นที่มีสปริงไม่เชิงเส้นแบบคิวบิก เนื่องจากในความเป็นจริงทิศทางของแรงที่เกิดกับสปริงจะแปรผันไปกับระยะการยืดหดและทิศทางของการยืดหดของสปริง โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์เพื่อลดความซับซ้อนในการนำเสนอ สำหรับการหาคำตอบของระบบสมการจะทำการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนในรูปแบบเทมเพลตไลบารี โดยจะทำการคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบและแสดงผลลัพธ์ของกราฟฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบลำดับที่หนึ่ง สอง และสาม

2. งานที่เกี่ยวข้อง

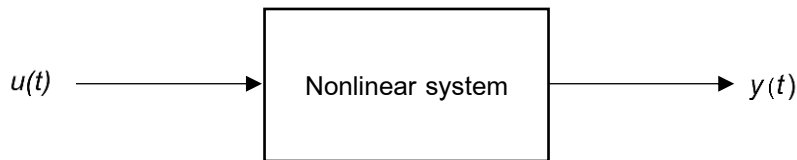
Boonmalert and Chouychai [2, 3] ได้แสดงวิธีการใช้ออนุกรมของวอลเตอร์รา และการหาพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นของระบบไม่เชิงเส้นของระบบระดับความเสรีขึ้นเดียวซึ่งสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้

Peng et al [4] ได้แสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบระดับความเสรีหลายชั้นและได้แสดงการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปของจำนวนเชิงซ้อน

Worden and Tomlinson [5] ได้นำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์ระบบไม่เชิงเส้นในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ

3. ทฤษฎี

ระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear system) ที่มีสัญญาณเข้าเป็น $u(t)$ จะมีสัญญาณออกของระบบเป็น $y(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีสัญญาณออกในรูปแบบอนุกรมของวอลเตอร์รา สำหรับระบบระดับความเสรีขึ้นเดียว (Single degree of freedom, SDOF) เป็น



รูปที่ 1 ระบบไม่เชิงเส้นระดับความเสรีขึ้นเดียว

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} {}_n y(t) \quad (1)$$

โดยที่การตอบสนองลำดับที่ n ของอนุกรมของวอลเตอร์ราเป็น

$${}_n y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} {}_n h u(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

สำหรับระบบระดับความเสรีหลายชั้น (Multi degree of freedom, MDOF) ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถเขียนการตอบสนองในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\{y(t)\} = \sum_{n=1}^{\infty} \{{}_n y(t)\} \quad (3)$$

โดยที่ $\{y(t)\} = \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) & \dots & y_{N_0}(t) \end{bmatrix}^T$

และ $\{ {}_n y(t) \} = \sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} {}_n y_1(t) & {}_n y_2(t) & \dots & {}_n y_{N_0}(t) \end{bmatrix}^T$

$$\begin{bmatrix} {}_n y_1(t) \\ {}_n y_2(t) \\ \vdots \\ {}_n y_{N_0}(t) \end{bmatrix} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} {}_n h_{11}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) & {}_n h_{12}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) & \dots & {}_n h_{1N_F}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \\ {}_n h_{21}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) & {}_n h_{22}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) & \dots & {}_n h_{2N_F}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ {}_n h_{N_0 1}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) & {}_n h_{N_0 2}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) & \dots & {}_n h_{N_0 N_F}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \prod_{i=1}^n u_1(t - \tau_i) d\tau_i \\ \prod_{i=1}^n u_2(t - \tau_i) d\tau_i \\ \vdots \\ \prod_{i=1}^n u_{N_F}(t - \tau_i) d\tau_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่ ${}_n y_i(t)$ คือ สัญญาณออกที่จุด i ลำดับที่ n ของอนุกรมวอลเตอร์รา

${}_n h_{ij}(t_1, t_2, \dots, t_n)$ คือ การตอบสนองแบบดล ลำดับที่ n ของอนุกรมวอลเตอร์ราที่มีสัญญาณออกที่จุด i และมีสัญญาณเข้าที่จุด j ($i = 1, 2, 3, \dots, N_0$; $j = 1, 2, 3, \dots, N_F$)

$u_j(t)$ คือ สัญญาณเข้าที่จุด j

N_0 คือ จำนวนสัญญาณออกที่ทำการวัด

N_F คือ จำนวนสัญญาณเข้าที่ทำการวัด

ในระบบไม่เชิงเส้นระดับความถี่หลายชั้นตามรูปที่ 2 นั้นสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกต่อสัญญาณเข้าจุดต่อจุด ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) & \dots & \dots & H_{1N_F}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \dots & \dots & H_{2N_F}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_0 1}(\omega) & H_{N_0 2}(\omega) & \dots & \dots & H_{N_0 N_F}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ $H_{ij}(\omega)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้นของระบบที่มีสัญญาณออกที่จุด i และมีสัญญาณเข้าที่จุด j ซึ่งจะหาได้จาก

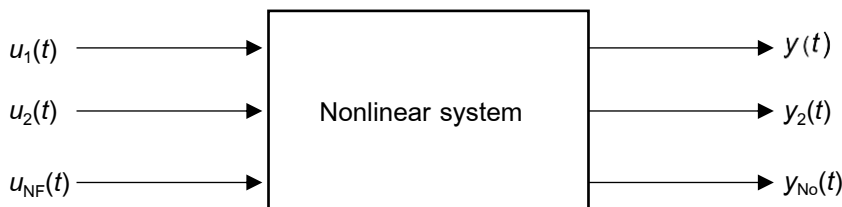
$$H_{ij}(\omega) = \frac{Y_i(\omega)}{U_j(\omega)} \quad (6)$$

สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนไม่เชิงเส้นลำดับที่ n ใด ๆ ของระบบจะหาได้จากอนุกรมของวอลเตอร์รา

เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้น ในงานวิจัยนี้จะขอยกตัวอย่างโดยทำการพิจารณาระบบระดับความเสรีสองขั้นที่ไม่เชิงเส้น แบบหนึ่งสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (Single input multi output, SIMO) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งระบบมีสปริงไม่เชิงเส้นในรูปแบบสมการกำลังสาม (Cubic spring) สมการการเคลื่อนที่ของระบบที่อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1(t) \\ \ddot{y}_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 y_1^2(t) + \gamma_1 y_1^3(t) - \beta_2 (\Delta y)^2 - \gamma_2 (\Delta y)^3 \\ \beta_2 (\Delta y)^2 + \gamma_2 (\Delta y)^3 + \beta_3 y_2^2(t) + \gamma_3 y_2^3(t) \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

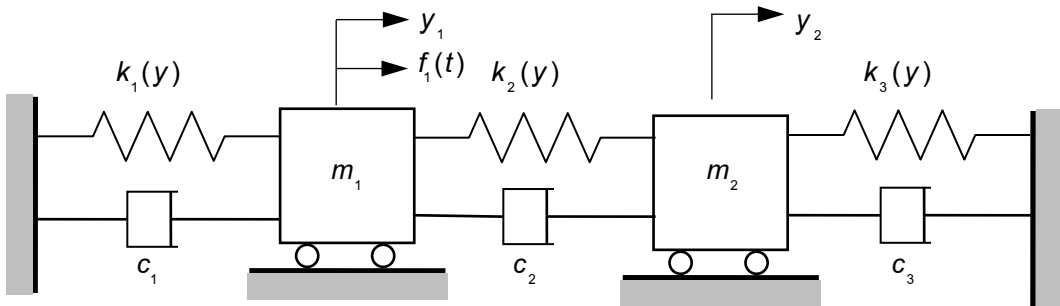
โดยที่ $\Delta y = y_2 - y_1$; $(\Delta y)^2 = y_2^2 - 2y_1 y_2 + y_1^2$; $(\Delta y)^3 = y_2^3 - 3y_1 y_2^2 + 3y_1^2 y_2 - y_1^3$, และ β_i ; γ_i ; ($i = 1, 2, 3$) เป็นค่าคงที่ของสปริงไม่เชิงเส้นในเทอมควอดราติก และคิงบิก ตามลำดับ



รูปที่ 2 ระบบไม่เชิงเส้นระดับความเสรีหลายขั้น

ถ้าให้สัญญาณเข้าเป็น $f_1(t) = Ff(t)$ โดยที่แรงมีแอมพลิจูดเป็น F และมีสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันของเวลาเป็น $f(t)$ สัญญาณออกของระบบในรูปแบบของอนุกรมของวอลเตอร์ราจะเป็น

$$\{y(t)\} = \sum_{n=1}^{\infty} F^n \{ {}_n y(t) \} = \sum_{n=1}^{\infty} F^n \begin{Bmatrix} {}_n y_1(t) \\ {}_n y_2(t) \end{Bmatrix} \quad (8)$$



$$k_1(y) = k_1 + \beta_1 y + \gamma_1 y^2; \quad k_2(y) = k_2 + \beta_2 y + \gamma_2 y^2; \quad k_3(y) = k_3 + \beta_3 y + \gamma_3 y^2$$

รูปที่ 3 ระบบระดับความเสรีสองขั้นที่มีสปริงไม่เชิงเส้น

เมื่อแทนสมการ (8) ในสมการ (7) แล้วทำการเทียบสัมประสิทธิ์ F^1 (ที่ $n = 1$) ซึ่งจะได้

$$[M] \{ {}_1 \ddot{y}(t) \} + [C] \{ {}_1 \dot{y}(t) \} + [K] \{ {}_1 y(t) \} = \{ f(t) \} = {}_1 H^{-1} [{}_1 y(t)] \quad (9)$$

โดยที่ ${}_n H [\quad]$ คือ โอเปอเรเตอร์ (Operator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ n ของระบบ

${}_n H^{-1} [\quad]$ คือ โอเปอเรเตอร์ผกผัน (Inverse operator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ n ของระบบ

สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งของระบบสามารถเขียนได้เป็น

$$[{}_1 H(\omega)] = \begin{bmatrix} {}_1 H_{11}(\omega) & {}_1 H_{12}(\omega) \\ {}_1 H_{21}(\omega) & {}_1 H_{22}(\omega) \end{bmatrix} \quad (10)$$

เมื่อ

$${}_1 H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{A_{ri}}{j\omega - \lambda_{ri}} + \sum_{r=1}^N \frac{A_{ri}^*}{j\omega - \lambda_{ri}^*} \quad (11)$$

โดยที่ $j = \sqrt{-1}$

A_{ri} คือ ค่าคงที่ที่ฐานนิยม i

$$\lambda_{ri} = -\zeta_{ri}\omega_{ri} \pm j\omega_{ri}\sqrt{1-\zeta_{ri}^2}$$

ω_r = ความถี่ธรรมชาติไม่ถูกหน่วงที่ฐานนิยม i

A_{ri}^*, λ_{ri}^* คือ สังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของ A_{ri} และ λ_{ri} ตามลำดับ

p คือ จุดที่วัดสัญญาณออก (output)

q คือ จุดที่วัดสัญญาณเข้า (input)

สัญญาณออกของระบบในรูปของการประสาน (Convolution) เป็น

$${}_1y_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{11}(\tau)f(t-\tau)d\tau \quad (12)$$

$${}_1y_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{21}(\tau)f(t-\tau)d\tau \quad (13)$$

สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง สามารถหาได้โดยแทนสมการ (8) ใน (7) แล้วทำการเทียบสัมประสิทธิ์ของ F^2 (ที่ $n = 2$) ซึ่งจะได้

$$[M]\{ {}_2\ddot{y}(t) \} + [C]\{ {}_2\dot{y}(t) \} + [K]\{ {}_2y(t) \} = - \begin{bmatrix} \beta_1({}_1y_1^2(t)) - \beta_2(\Delta y)^2 \\ \beta_2(\Delta y)^2 + \beta_3({}_1y_2^2(t)) \end{bmatrix} \quad (14)$$

หรือ

$$\{ {}_2y(t) \} = -{}_1H \begin{bmatrix} \beta_1({}_1y_1^2(t)) - \beta_2(\Delta y)^2 \\ \beta_2(\Delta y)^2 + \beta_3({}_1y_2^2(t)) \end{bmatrix} = -{}_1H \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

และในรูปของการประสานเป็น

$${}_2y_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{11}(\tau)u_1(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} {}_2h_{11}(\tau_1, \tau_2)f(t-\tau_1)f(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 \quad (16)$$

$${}_2y_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{21}(\tau)u_2(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} {}_2h_{21}(\tau_1, \tau_2)f(t-\tau_1)f(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 \quad (17)$$

เมื่อแทน $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ จากสมการ (15) ในสมการ (16), (17) และแทนสมการ (12), (13) ในสมการ (16), (17) จะได้

$$\begin{aligned} {}_2y_1(t) = & - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{11}(\tau) [\beta_1 {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{11}(\xi_2 - \tau) \\ & - \beta_2 \{ {}_1h_{21}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) - 2 {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) \\ & + {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{11}(\xi_2 - \tau) \}] f(t - \xi_1) f(t - \xi_2) d\tau d\xi_1 d\xi_2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} {}_2y_2(t) = & - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{21}(\tau) [\beta_3 {}_1h_{21}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) \\ & + \beta_2 \{ {}_1h_{21}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) - 2 {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) \\ & + {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{11}(\xi_2 - \tau) \}] f(t - \xi_1) f(t - \xi_2) d\tau d\xi_1 d\xi_2 \end{aligned} \quad (19)$$

เมื่อเทียบสมการ (18), (19) กับสมการ (16), (17) จะได้การตอบสนองแบบดลอันดับที่สองเป็น

$$\begin{aligned} {}_2h_{11}(\xi_1, \xi_2) = & - \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{11}(\tau) [\beta_1 {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{11}(\xi_2 - \tau) \\ & - \beta_2 \{ {}_1h_{21}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) - 2 {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) \\ & + {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{11}(\xi_2 - \tau) \}] d\tau \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} {}_2h_{21}(\xi_1, \xi_2) = & - \int_{-\infty}^{\infty} {}_1h_{21}(\tau) [\beta_3 {}_1h_{21}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) \\ & + \beta_2 \{ {}_1h_{21}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) - 2 {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{21}(\xi_2 - \tau) \\ & + {}_1h_{11}(\xi_1 - \tau) {}_1h_{11}(\xi_2 - \tau) \}] d\tau \end{aligned} \quad (21)$$

และเมื่อใช้การแปลงของฟูริเยร์สองมิติจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองเป็น

$$\begin{aligned} {}_2H_{11}(\omega_1, \omega_2) = & {}_1H_{11}(\omega_1 + \omega_2) [(\beta_1 - \beta_2) {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{11}(\omega_2) \\ & - 2\beta_2 {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{21}(\omega_2) + \beta_2 {}_1H_{21}(\omega_2) {}_1H_{21}(\omega_2)] \end{aligned} \quad (22)$$

$${}_2H_{21}(\omega_1, \omega_2) = {}_1H_{21}(\omega_1 + \omega_2) \left[2\beta_2 {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{21}(\omega_2) - \beta_2 {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{11}(\omega_2) \right. \\ \left. - (\beta_2 + \beta_3) {}_1H_{21}(\omega_1) {}_1H_{21}(\omega_2) \right] \quad (23)$$

สัญญาณออกอันดับที่สามของอนุกรมวอลเตอร์รา หาได้จากการเทียบสัมประสิทธิ์ F^3 (ที่ $n = 3$) ได้

$$\{ {}_3y(t) \} = - {}_1H \left[\begin{aligned} & 2(\beta_1 - \beta_2) {}_1y_1(t) {}_2y_1(t) + (\gamma_1 - \gamma_2) {}_1y_1^3(t) \\ & 2(\beta_2 + \beta_3) {}_1y_2(t) {}_2y_2(t) + (\gamma_2 + \gamma_3) {}_1y_2^3(t) \\ & + 2\beta_2 \{ {}_2y_2(t) {}_2y_2(t) - {}_1y_1(t) {}_2y_2(t) - {}_2y_1(t) {}_1y_2(t) \} \\ & + 2\beta_2 \{ {}_1y_1(t) {}_2y_1(t) - {}_1y_1(t) {}_2y_2(t) - {}_2y_1(t) {}_1y_2(t) \} \\ & - \gamma_2 \{ {}_1y_1^3(t) - 3 {}_1y_1(t) {}_1y_2^2(t) + 3 {}_1y_1^2(t) {}_1y_2(t) \} \\ & + \gamma_2 \{ {}_1y_1^3(t) - 3 {}_1y_1(t) {}_1y_2^2(t) + 3 {}_1y_1^2(t) {}_1y_2(t) \} \end{aligned} \right] \quad (24)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปของการประสานโดยใช้หลักการเดียวกันกับสมการ (20), (21) จะทำให้ได้สัญญาณแบบดลอันดับที่สามและเมื่อใช้การแปลงของฟูริเยร์แบบสามมิติจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามเป็น

$${}_3H_{11}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = - {}_1H_{11}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \left[\begin{aligned} & 2(\beta_1 - \beta_2) {}_1H_{11}(\omega_1) {}_2H_{11}(\omega_2, \omega_3) \\ & + (\gamma_1 - \gamma_2) {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{11}(\omega_2) {}_1H_{11}(\omega_3) \\ & - 2\beta_2 \{ {}_1H_{21}(\omega_1) {}_2H_{21}(\omega_2, \omega_3) - {}_1H_{11}(\omega_1) {}_2H_{21}(\omega_2, \omega_3) \\ & - {}_2H_{11}(\omega_1, \omega_2) {}_1H_{21}(\omega_3) \} \\ & - \gamma_2 \{ {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{11}(\omega_2) {}_1H_{11}(\omega_3) - 3 {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{21}(\omega_2) {}_1H_{21}(\omega_3) \\ & + 3 {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{11}(\omega_2) {}_1H_{21}(\omega_3) \} \end{aligned} \right] \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
{}_3H_{21}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = & -{}_1H_{21}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \left[2(\beta_2 + \beta_3) {}_1H_{21}(\omega_1) {}_2H_{21}(\omega_2, \omega_3) \right. \\
& + (\gamma_2 + \gamma_3) {}_1H_{21}(\omega_1) {}_1H_{21}(\omega_2) {}_1H_{21}(\omega_3) \\
& + 2\beta_2 \left\{ {}_1H_{11}(\omega_1) {}_2H_{11}(\omega_2, \omega_3) - {}_1H_{11}(\omega_1) {}_2H_{21}(\omega_2, \omega_3) \right. \\
& \left. \left. - {}_2H_{21}(-{}_2H_{11}(\omega_1, \omega_2) {}_1H_{21}(\omega_3)) \right\} \right. \\
& + \gamma_2 \left\{ {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{11}(\omega_2) {}_1H_{11}(\omega_3) - 3 {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{21}(\omega_2) {}_1H_{21}(\omega_3) \right. \\
& \left. \left. + 3 {}_1H_{11}(\omega_1) {}_1H_{11}(\omega_2) {}_1H_{21}(\omega_3) \right\} \right] \quad (26)
\end{aligned}$$

จากสมการ (22) และ (23) พบว่ามีฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งในรูป ${}_1H_{11}(\omega_1 + \omega_2)$ และ ${}_1H_{21}(\omega_1 + \omega_2)$ ซึ่งอยู่ในรูปของความถี่ $\omega_1 + \omega_2$ โดยจะส่งผลทำให้เกิดความถี่ซบฮาร์โมนิกอันดับที่สอง (Subharmonic) และสมการ (25) และ (65) จะมีเทอม ${}_1H_{11}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ และ ${}_1H_{21}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ ซึ่งจะมีความถี่เป็น $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ โดยจะส่งผลทำให้เกิดความถี่ซบฮาร์โมนิกอันดับที่สาม ซึ่งโดยปกติแล้วฮาร์โมนิกเหล่านี้อาจพบได้ในการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ

$$H_{ij}(\omega) = \frac{Y_i(\omega)}{U_j(\omega)} \text{ ซึ่งผู้ที่ทำการวัดสัญญาณอาจเกิดความเข้าใจผิดคิดว่าเป็นตำแหน่งของความถี่พ้อง}$$

(Resonance frequency) ได้ แต่ถ้าทำการแยกสัญญาณเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามงานวิจัย [2,3] แล้วเทียบสมการกับสมการ (22), (23), (25) และ (26) แล้วก็จะสามารถหาความถี่พ้องที่แท้จริงได้

สำหรับการเกิดซบฮาร์โมนิกนั้นเมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองและสามจะพบว่าในสมการจะประกอบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งที่มีความถี่ผสมอยู่โดยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองจะมีเทอม ${}_1H_{pq}(\omega_1, \omega_2)$ เมื่อความถี่ $\omega_1 + \omega_2 = \omega_{r1}$ หรือ $\omega_1 + \omega_2 = \omega_{r2}$ ก็จะทำให้แอมพลิจูดของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองสูงขึ้นทำให้เห็นเหมือนเกิดความถี่ธรรมชาติ ทั้ง ๆ ที่ความถี่ ω_1 และ ω_2 ยังมีค่าต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง และในทำนองเดียวกันกับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามก็จะเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันนี้

4. ผลการคำนวณ

เพื่อให้เห็นถึงวิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับต่าง ๆ ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไป จะทำการคำนวณเชิงตัวเลขของระบบตามรูปที่ 3 โดยกำหนดให้ $m_1 = m_2 = 1 \text{ kg}$; $c_1 = 0.3 \text{ Ns/m}$, $c_2 = 0.2 \text{ Ns/m}$, $c_3 = 0.3 \text{ Ns/m}$; และ $k_1 = k_2 = k_3 = 10 \text{ N/m}$ ซึ่งจะทำให้ได้ $\omega_{r1} = 3.16228$; $\omega_{rd1} = 3.15872$;

$$\zeta_{r_1} = 0.04743; \{u\}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \text{ และ } \omega_{r_2} = 5.447723; \omega_{rd2} = 5.46603; \zeta_{r_2} = 0.06390;$$

$$\{u\}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \text{ และค่าของสปริงไม่เชิงเส้นเป็น } \beta_1 = 1; \beta_2 = 2; \beta_3 = 3 \text{ และ } \gamma_1 = 1; \gamma_2 = 2;$$

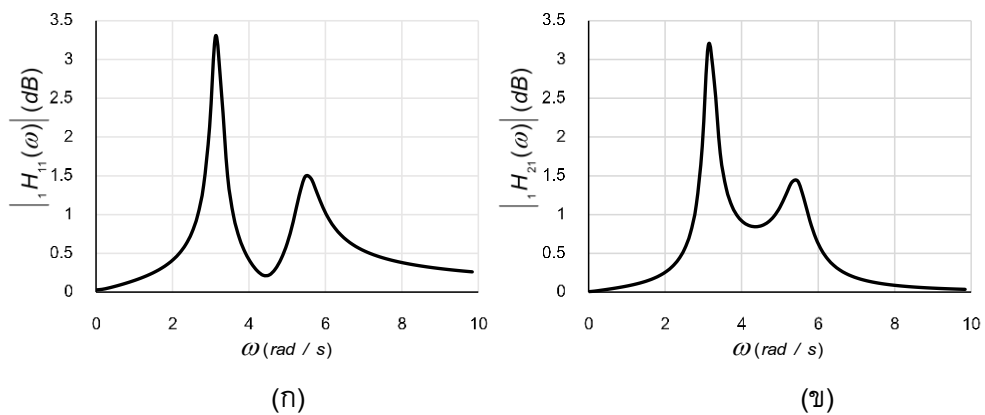
$\gamma_3 = 3$ ผลการคำนวณในรูปแบบที่ 4 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งตามสมการ (11) จะ ในรูปที่ 5 และ 6 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองตามสมการ (22) และ (23) จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า ความถี่มูลฐาน (ความถี่ธรรมชาติ) ตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง แต่จะมีชูปเปอร์ฮาร์โมนิกเกิดขึ้นที่ความถี่เป็นสองเท่าของความถี่มูลฐานทั้งสองแกน ส่วนความถี่ซับฮาร์โมนิกจะเห็นได้ในการนำเสนอในรูปแบบที่ 7 และ 8 ในแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งเป็นกราฟของโบดในแกนตั้งแบบล็อก ส่วนในรูปแบบที่ 9 และ 10 เป็นกราฟโบดในแกนแอมพลิจูดแบบล็อกของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามตามสมการ (25), (26) ซึ่งเป็นการนำเสนอในแนวเส้นทแยงมุมที่ $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ ซึ่งจะเห็นซับฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่มูลฐานสามเท่า

5. สรุป

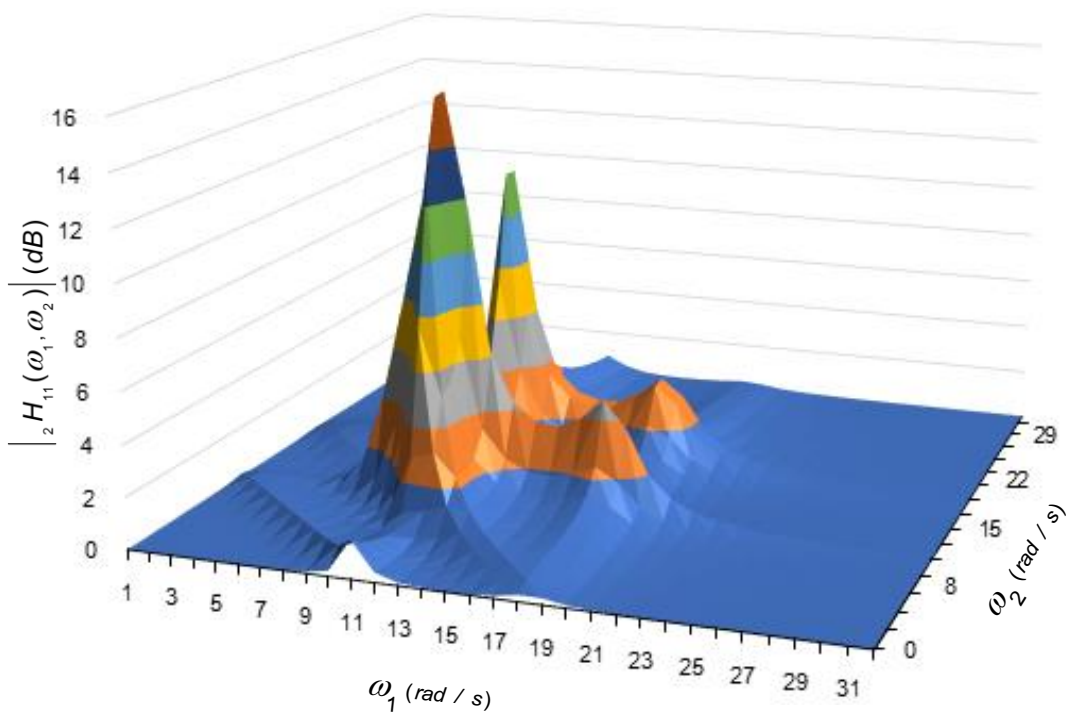
จากการประยุกต์ใช้ออนุกรมของวอลเตอร์รา กับระบบระดับความถี่สองชั้นแบบสองสัญญาณ ออกหนึ่งสัญญาณเข้า จะเห็นว่าการหาฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับต่าง ๆ ของระบบจะทำได้ยาก จากกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับต่าง ๆ ของอนุกรมของวอลเตอร์รา จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองและสาม เมื่อนำเสนอแบบมิติเดียวด้วยแอมพลิจูดแบบล็อก จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนมีซับฮาร์โมนิกปรากฏอย่างชัดเจน ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองจะมีซับฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่มูลฐานสองเท่าซึ่งได้มาจากความถี่ $\omega_1 + \omega_2 = 2\omega$ ในเทอมแรกของสมการ (22) และ (23) ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สาม จะมีซับฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่มูลฐานสามเท่า ซึ่งมาจากเทอมแรกทางขวามือของสมการ (25) และ (26) ซึ่งมาจากเทอม $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 3\omega$ ซึ่งในทางปฏิบัติเทอมซับฮาร์โมนิกเหล่านี้จะปรากฏรวมอยู่ในฟังก์ชันถ่าย

โอนอันดับที่หนึ่ง เนื่องจากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนในทางปฏิบัติจะหาจาก $H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{U(\omega)}$ การ

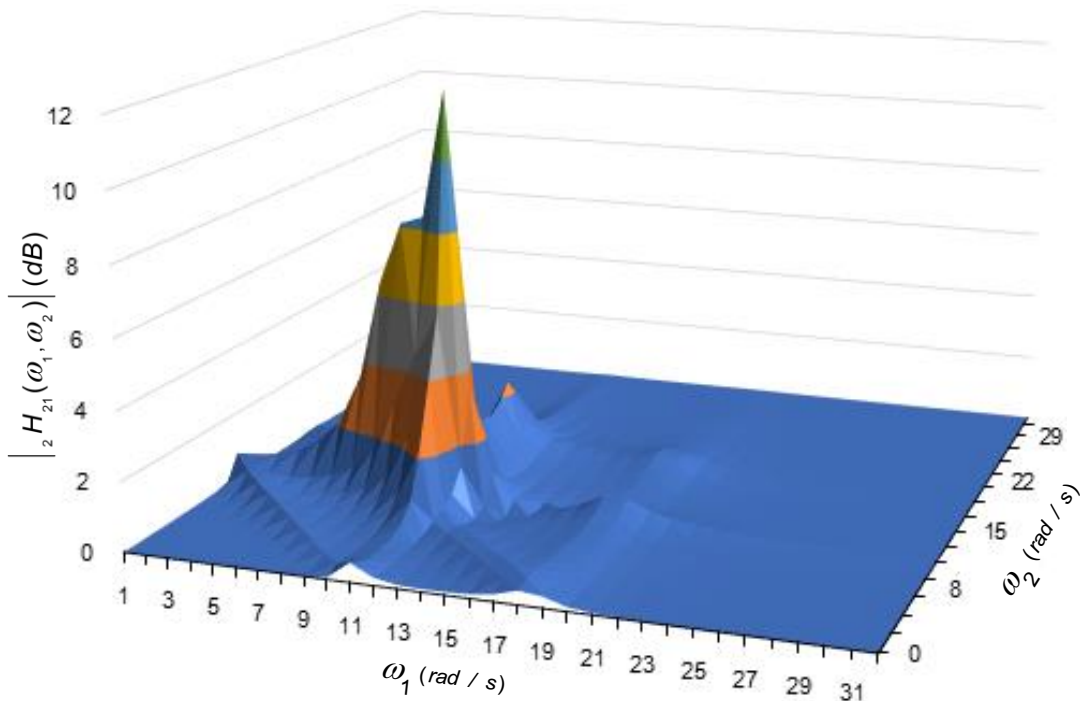
หลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการวัดฟังก์ชันถ่ายโอนในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยใช้สัญญาณเข้าที่มีขนาดเล็กน้อย ๆ ซึ่งจะทำให้เทอมที่ไม่เชิงเส้นปรากฏออกมาน้อย



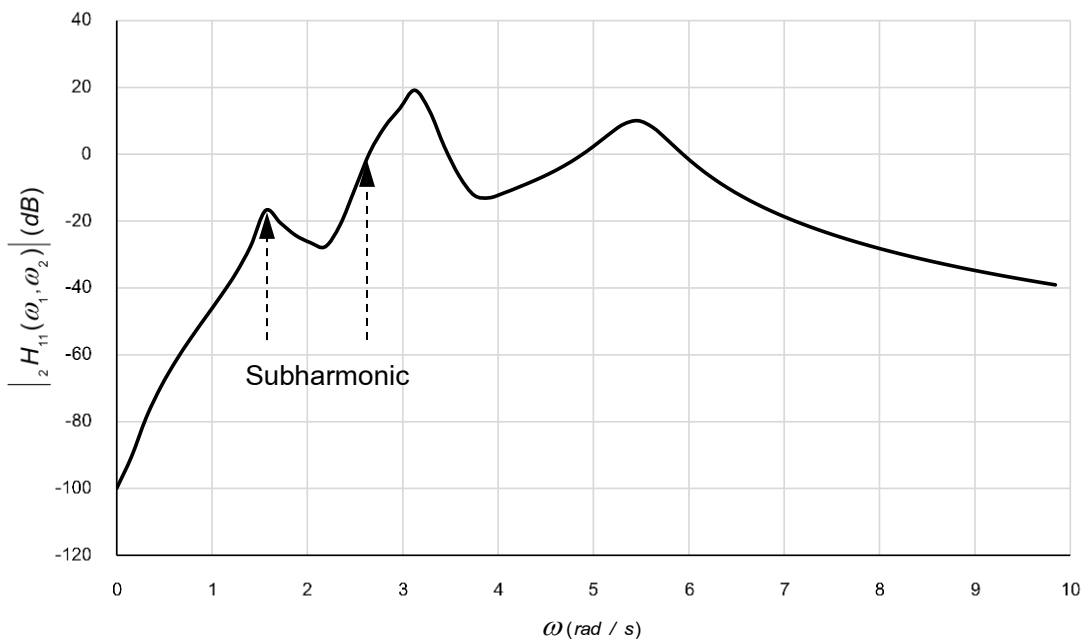
รูปที่ 4 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง (Bode plot) (ก) $_1H_{11}(\omega)$ และ (ข) $_1H_{21}(\omega)$



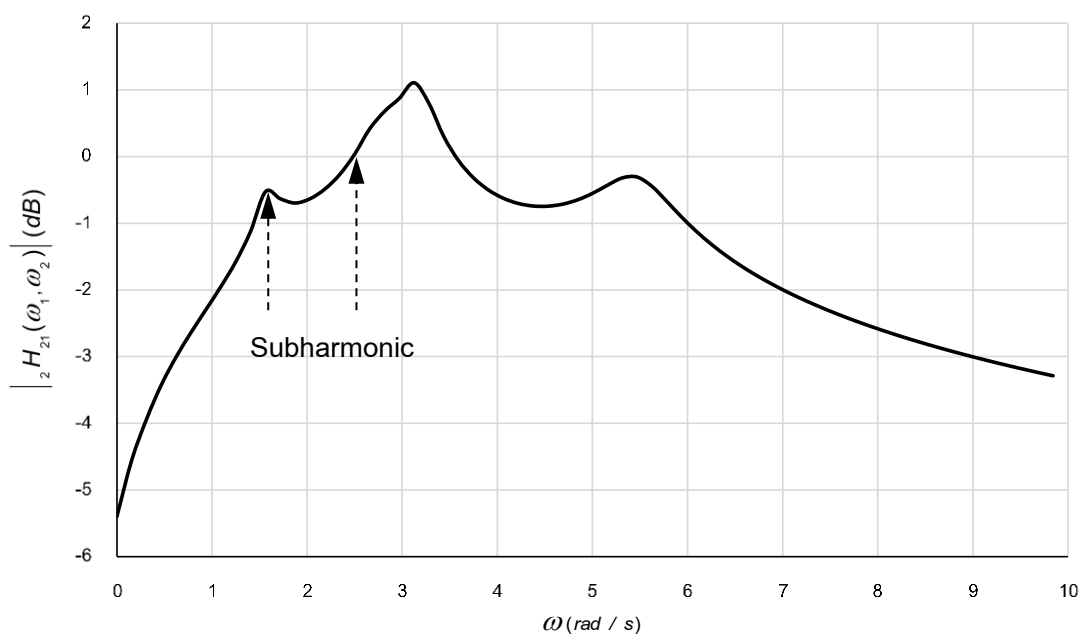
รูปที่ 5 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง $_2H_{11}(\omega_1, \omega_2)$



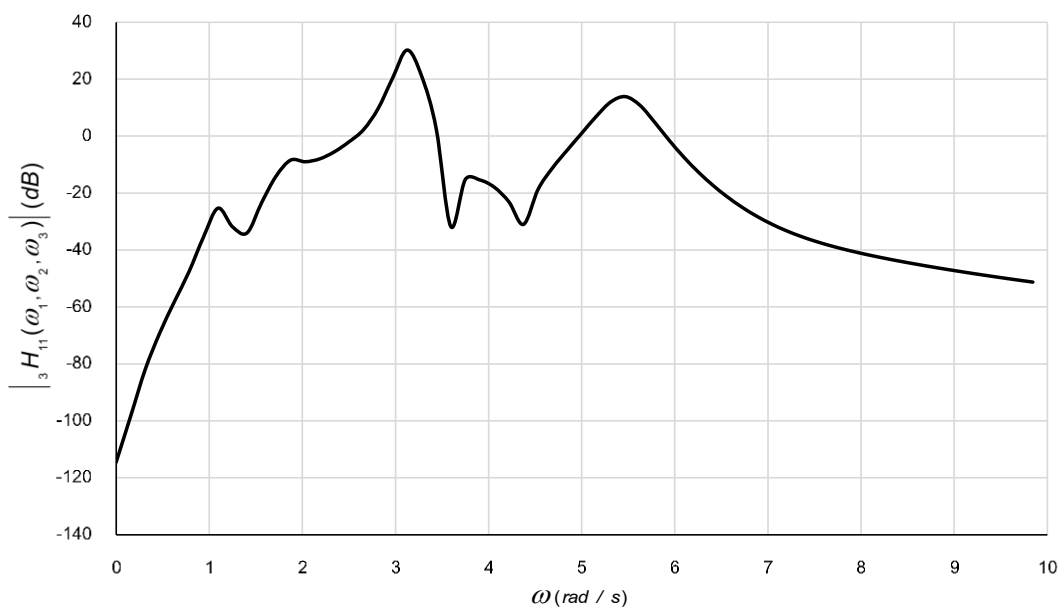
รูปที่ 6 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง $_2H_{21}(\omega_1, \omega_2)$



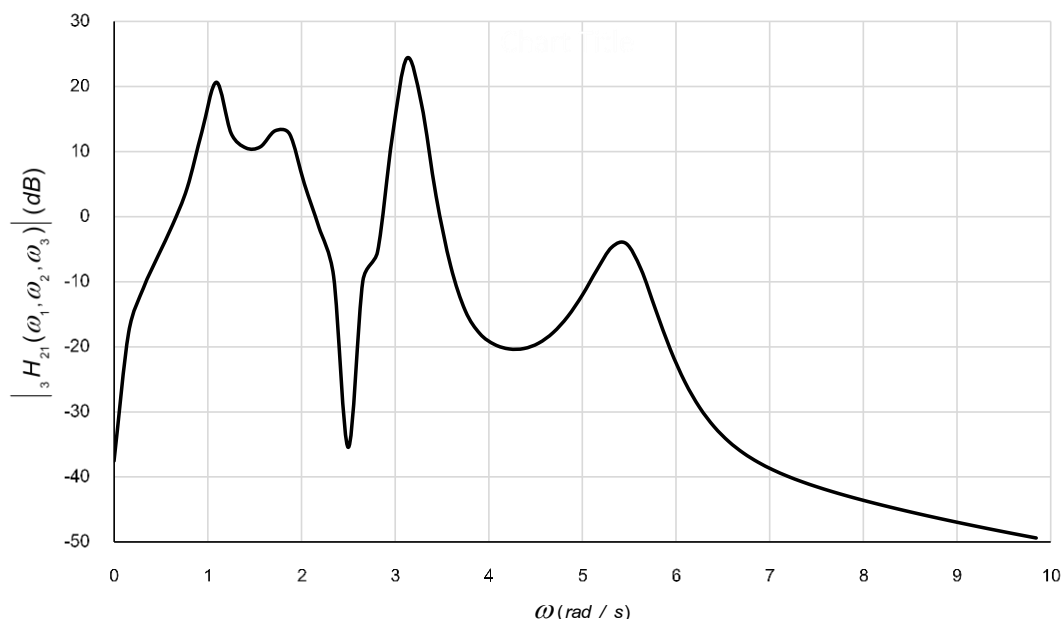
รูปที่ 7 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง $_2H_{11}(\omega_1, \omega_2)$



รูปที่ 8 ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง $H_2(\omega_1, \omega_2)$



รูปที่ 9 ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สาม $H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$



รูปที่ 10 ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สาม $H_{21}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$

References

- [1] Schetzen M. The Volterra & Wiener theory of nonlinear systems. New York: John Wiley & Sons; 1980.
- [2] 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.
- [3] Boonmalert P, Chouychai T. Nonlinear parameter extraction of SDOF viscous damping system. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(1):81-92.
- [4] Peng Z K, Lang Z Q, Billings S A. Analysis of multi-degree of freedom nonlinear systems using nonlinear output frequency response functions. Research Report. ACSE Research Report 2006; no.927.
- [5] Worden K and Tomlinson GR. Nonlinearity in structural dynamics detection, identification and modelling. Florida: CRC Press; 2019.

ประวัติผู้เขียนบทความ

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



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

Article History:

Received: May 28, 2021

Revised: November 10, 2021

Accepted: November 12, 2021

**การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกสารทำงานของ
ระบบปั๊มความร้อน สำหรับงานอบแห้งอุณหภูมิปานกลาง
DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL TO SELECT THE
WORKING FLUIDS OF HEAT PUMP SYSTEMS FOR MEDIUM-
TEMPERATURE DRYING APPLICATIONS**

สรวิศ สอนสารี¹ สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์² และ วิสุทธิ์ ชำมะสะอาด³

¹อาจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล จังหวัดพิษณุโลก 65000, sorawitsonsaree@psru.ac.th

²อาจารย์, หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ จังหวัดพิษณุโลก 65000, somchaij@nu.ac.th

³อาจารย์, วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ จังหวัดพิษณุโลก 65000, Wisutc@nu.ac.th

Sorawit Sonsaree¹ Somchai Jiajitsawat² and Wisut Chamsa-ard³

¹Lecturers, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,
156 Mu 5 Plaichumpol Sub-district, Phitsanulok 65000, sorawitsonsaree@psru.ac.th

²Lecturer, Energy Research and Promotion Center, Faculty of Science,
Naresuan University, 99 Mu 9 Tha Pho Sub-district, Phitsanulok 65000, somchaij@nu.ac.th

³Lecturer, School of Renewable Energy and Smart Grid Technology (SGtech),
Naresuan University, 99 Mu 9 Tha Pho Sub-district, Phitsanulok 65000, Wisutc@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกสารทำงานของระบบปั๊มความร้อน สำหรับงานอบแห้งอุณหภูมิปานกลาง ในการศึกษา 7 ตัวแปรสำคัญประกอบไปด้วย (1) อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ (2) อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในระบบ (3) ปริมาตรการอัดในเครื่องอัดไอ (4) ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่น (5) อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ (6) อัตราส่วนความดัน และ (7) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของปั๊มความร้อน (COP_{VCHP}) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนจำนวน 15 สาร ผลการศึกษาเมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมี

อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พบว่า ตัวแปรที่ (1) ถึง (6) จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิและความดันแตกต่างกันที่เพิ่มขึ้น ส่วนตัวแปรที่ (7) นั้น จะมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่น โดยผลการศึกษาเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งในส่วนของ การทำลายโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (ODP) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) รวมถึงความปลอดภัยต่อการใช้งาน (การติดไฟและความเป็นพิษ) พบว่า R-1234ze(E) เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุดเนื่องด้วยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ รองลงมา คือ R-1234yf R-1234ze(Z) R-1233zd(E) R-290 R-600 R-245ca R-245fa และ R-236fa ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, บั้มความร้อน, สารทำงาน

ABSTRACT

The purpose of this research was to develop a mathematical model for selecting the working fluids of the heat pump system for medium-temperature drying applications. In this study, seven variables consisted of (1) Mass of refrigerant per unit heat output (MPH), (2) Vapor volume flow rate, (3) Displacement volume, (4) Discharge pressure, (5) Discharge temperature, (6) Pressure ratio, and (7) Coefficient of performance of heat pump (COP_{VCHP}). These variables were used to compare 15 substances used in the heat pump systems. The results showed that when the condenser temperature increased, the variables (1) to (6) tended to increase with the difference in temperature and pressure. As for variable (7), it tends to decrease with increasing temperature and pressure on the condenser. Moreover, the results showed that when the environmental impact of both low ozone depletion potential (ODP), low global warming potential (GWP), as well as safety (non-flammable and non-toxic) of use is considered. R-1234ze(E) was found to be the most suitable substance because it has the least impact on the environment and has a high COP_{VCHP} compared to other substances. Then, followed by R-1234yf, R-1234ze(Z), R-1233zd(E), R-290, R-600, R-245ca, R-245fa, and R-236fa, respectively.

KEYWORDS: Mathematical model, Heat pump and Working fluids

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง โดยมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี เท่ากับ $17.6 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ [1] จากปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ได้รับดังกล่าว

ประกอบกับการที่ภาครัฐให้การสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ ดังจะเห็นได้จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 - 2580 (Alternative Energy Development Plan : AEDP 2012 – 2021) [2] จึงทำให้เกิดการประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ อย่างมากมายไม่ว่าจะเป็นการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) การผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar hot water system) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) เป็นต้น [3] สำหรับงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจไปที่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการเกษตร กล่าวคือ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงทำให้รายได้ของประชากรส่วนหนึ่งนั้นมากจากอาชีพเกษตรกรรม นอกจากนี้ในบางครั้งเกษตรกรก็มักจะนิยมปลูกพืชผลทางการเกษตรที่คล้ายกันเนื่องมาจากการต้องการรายได้ที่เพิ่มขึ้นจากผลผลิตที่เห็นว่ามีความเป็นไปได้หรือมีความต้องการของตลาดในขณะนั้น ๆ ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ในบางฤดูกาลมีปริมาณพืชผลทางการเกษตรออกมามากเกินความต้องการของตลาด ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาได้โดยการถนอมอาหารในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการแช่แข็ง การอบแห้ง และการตากแห้ง เป็นต้น [4] และเมื่อพิจารณาไปที่การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรนั้นจะพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่นิยมและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งก็คือเรื่องของความไม่เสถียรของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ซึ่งเป็นไปตามฤดูกาล ประกอบกับการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถอบแห้งได้ในช่วงระยะเวลากลางวันเพียงเท่านั้น ดังนั้นหากต้องการประยุกต์เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ให้สามารถอบแห้งได้ตลอด 24 ชั่วโมง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาเทคโนโลยีที่สามารถผลิตพลังงานความร้อนเพื่อป้อนให้กับระบบอบแห้งได้

ปั๊มความร้อน (Heat pump) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในเพิ่มคุณภาพความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำให้เป็นแหล่งความร้อนพร้อมใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงได้ ในปัจจุบันจึงมักนิยมนำเอาปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้งานเพื่อผลิตน้ำร้อนไม่ว่าจะเป็นในโรงแรม โรงพยาบาล และ/หรือ โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มศักยภาพในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยการนำเอาปั๊มความร้อนมาใช้ในการเพิ่มคุณภาพความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ได้จากความร้อนเหลือทิ้ง และ/หรือ ความร้อน (น้ำร้อน) ที่ผลิตได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 50 °C เนื่องจากปั๊มความร้อนมีการใช้พลังงานเพียง 1 ใน 3 ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเมื่อเทียบกับขดลวดไฟฟ้า [5-8] แต่อย่างไรก็ตามการนำเอาปั๊มความร้อนมาใช้งานนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาทั้งขนาดของระบบ และรวมถึงปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ การเลือกสารทำงานในระบบ (Working fluid) ที่จะต้องมีความเหมาะสมทั้งในเรื่องของประสิทธิภาพ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [9] เนื่องจากสารทำงานแต่ละชนิดมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่า

การเลือกสารทำงานที่เหมาะสมจะเป็นการช่วยลดผลกระทบที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อม และจะได้ระบบที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่หมายรวมถึงการลดต้นทุนทางไฟฟ้า หรือการลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการใช้งานของปั๊มความร้อนได้อีกด้วย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนประกอบไปด้วย Mota-Babiloni et al [10] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการทำงานของระบบปรับอากาศเมื่อระบบมีการใช้สารทำความเย็นชนิด R-32 ผลการศึกษาพบว่า สารทำความเย็น R-32 มีคุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนในระดับดี และระบบจะมีประสิทธิภาพที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ถึงแม้การระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นไม่ดี ในส่วนประสิทธิภาพของระบบนั้นระบบที่มีการใช้สารทำความเย็น R-32 จะมีประสิทธิภาพเทียบเคียงได้กับระบบที่มีการใช้สารทำความเย็น R-410A Juhasz [11] ในการเลือกสารทำงานนั้นจำเป็นต้องพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกสารทำงานในระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) แต่อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคือเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะสารทำงานที่ถูกนำมาใช้ควรจะเป็นสารที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก (Climate change) ในระดับที่ต่ำ จากการศึกษาพบว่า สารทำความเย็นชนิด HFO-1336mzz(E) เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสมเนื่องจากเป็นสารที่ไม่ติดไฟ มีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) ที่ต่ำ Zühlsdorf et al [12] ศึกษาเปรียบเทียบสารทำความเย็นชนิดสารบริสุทธิ์และสารผสมที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะช่วยให้การทำงานของปั๊มความร้อนมีประสิทธิภาพสูง ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีสารผสมระหว่าง โพรพิลีน (Propylene) และ R-1234ze(Z) ที่อัตราส่วน 30:70 จะช่วยให้ค่าใช้จ่ายจำเพาะด้านความร้อนของระบบลดลงร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้แอมโมเนีย (Ammonia) และในกรณีที่สารผสมระหว่าง โพรพิลีน (Propylene) และบิวเทน (Butane) ที่อัตราส่วน 60:40 จะช่วยให้ค่าใช้จ่ายของระบบลดลงร้อยละ 8 และจะช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้สารทำงานที่ดีที่สุดที่เป็นสารบริสุทธิ์ Frutiger et al [13] สารทำงาน 13 ชนิด ได้ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อหาการทำงานที่ดีที่สุดของปั๊มความร้อนอุตสาหกรรมที่ใช้แหล่งความร้อนจากความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ไซโคเพนเทน (Cyclopentane) เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อน (COP_{VCHP}) ของระบบสูงสุดเท่ากับ 3.06 ± 0.05

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การศึกษาการเลือกสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนนั้นมีความสำคัญทั้งในเรื่องของพลังงาน (Energy) ศักยภาพในการทำงาน (Exergy) เศรษฐศาสตร์ (Economy) และสิ่งแวดล้อม (Environment) [9] สำหรับงานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญไปที่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกสารทำงานของระบบปั๊มความร้อนอุณหภูมิปานกลาง (60 – 80 °C) สำหรับงานอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ทั้งนี้นอกจากจะช่วยให้ได้สารทำงานที่มีความเหมาะสมแล้ว

ยังจะช่วยก่อให้เกิดความเข้าใจในการเลือกสารทำงานที่ดีที่สุดทั้งในเรื่องของพลังงาน และรวมถึงความเหมาะสมทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารทำงานในระบบ

การเลือกสารทำงานของระบบถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสารทำงานแต่ละชนิดมักจะมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ เช่น ประสิทธิภาพของระบบ ค่าใช้จ่ายของระบบ ขนาดของอุปกรณ์ที่จะถูกนำมาใช้ ความเสถียรของการทำงานของระบบ ความปลอดภัย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [14, 15] โดยตัวอย่างของสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญประกอบไปด้วย

- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เมื่อปริมาตรจำเพาะต่ำจะส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าต่ำ ซึ่งหมายถึงการเลือกอุปกรณ์ของระบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะสามารถเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเล็กได้

- ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environment impacts) อาทิ ระดับในการทำลายโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (Ozone Depletion Potential: ODP) ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) และ การคงสภาพของสารทำความเย็นในบรรยากาศ (Atmospheric Lifetime: ALT)

- ความปลอดภัย (Safety) โดยทั่วไปคำแนะนำในการเลือกสารทำงานของระบบ คือสารทำงานจะต้องไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากการรั่วไหลของสารทำงานต่าง ๆ

- ความเข้ากันได้ของวัสดุและสารทำงาน (Material compatibility) สารทำงานที่เลือกนำมาใช้งานร่วมกับวัสดุใด ๆ จะต้องไม่กัดกร่อน หรือมีสมบัติที่ก่อให้เกิดความเสียหายกับวัสดุ/อุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานในระบบ เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และข้อต่อต่าง ๆ เป็นต้น

- ความหนืด (Viscosity) สารทำงานควรมีความหนืดต่ำทั้งในสถานะของเหลวและในสถานะไอ โดยสารทำงานที่มีความหนืดต่ำจะช่วยให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่นำมาใช้งานมีขนาดเล็ก และจะช่วยลดการสูญเสียเนื่องมาจากความเสียดทานในระบบได้

2.2 ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

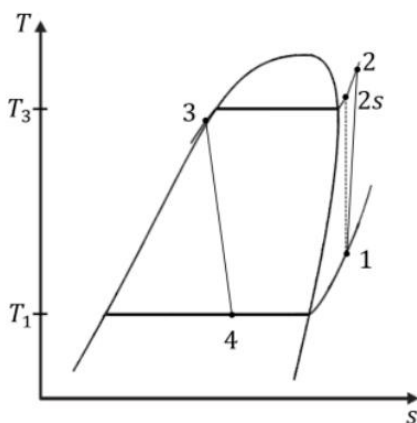
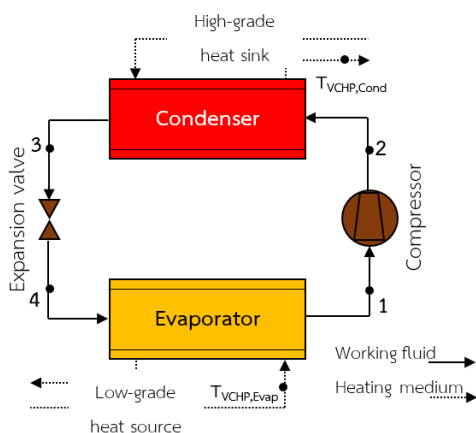
ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (Vapor compression heat pump: VCHP) ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์สำคัญในการอนุรักษ์พลังงาน กล่าวคือ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้ในการเพิ่มคุณภาพความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ให้เป็นแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ก่อนที่จะนำเอา

ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ บั้มความร้อนแบบอัดไอประกอบไปด้วย 4 อุปกรณ์หลัก คือ เครื่องทำระเหย (Evaporator) เครื่องอัดไอ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) และวาล์วลดความดัน (Expansion valve) แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีหลักการทำงานดังนี้

ณ สภาวะที่ 4 สารทำงานที่มีอุณหภูมิต่ำในเครื่องทำระเหยจะรับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในสภาวะความดันคงที่ จากนั้นสารทำงานจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นก่อนถูกส่งเข้าเครื่องอัดไอ ที่สภาวะ 1 ไป 2 เครื่องอัดไอจะทำหน้าที่อัดไอสารทำงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันจนกระทั่งสารทำงานอยู่ในสภาวะไอตรง (Superheated) ก่อนส่งไปยังเครื่องควบแน่น (ที่สภาวะ 2 ไป 3) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในสภาวะความดันคงที่ จากนั้นที่สภาวะ 3 ไป 4 สารทำงานดังกล่าวจะถูกลดความดันผ่านวาล์วลดความดัน ก่อนที่สารทำงานดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปรับความร้อนที่เครื่องทำระเหยอีกครั้ง โดยสมการพื้นฐานที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละอุปกรณ์แสดงได้ดังนี้ [16]

อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำระเหย ($\dot{Q}_{Evap}$):

$$\dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_r (h_1 - h_4) = (\dot{m}c_p)_w (\Delta T)_{Heat source} \quad (1)$$



(ก) แผนภาพการทำงานอย่างง่ายของระบบฯ (ข) แผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปีของระบบฯ [16]

รูปที่ 1 ระบบบั้มความร้อนแบบอัดไอ (VCHP)

อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น ($\dot{Q}_{Cond}$):

$$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_r (h_2 - h_3) = (\dot{m}c_p)_w (\Delta T)_{Heat sink} \quad (2)$$

งานที่ต้องใส่เข้าไปในระบบปั๊มความร้อน ($\dot{W}_{Comp}$):

$$\dot{W}_{Comp} = \dot{Q}_{Cond} - \dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_r (h_2 - h_1) \quad (3)$$

$$\dot{W}_{Comp,el} = \frac{\dot{W}_{comp}}{\eta_{Comp,ME} \eta_{Comp,MO}} \quad (4)$$

$$\eta_{Comp,Isen} = \frac{h_{2,Isen} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

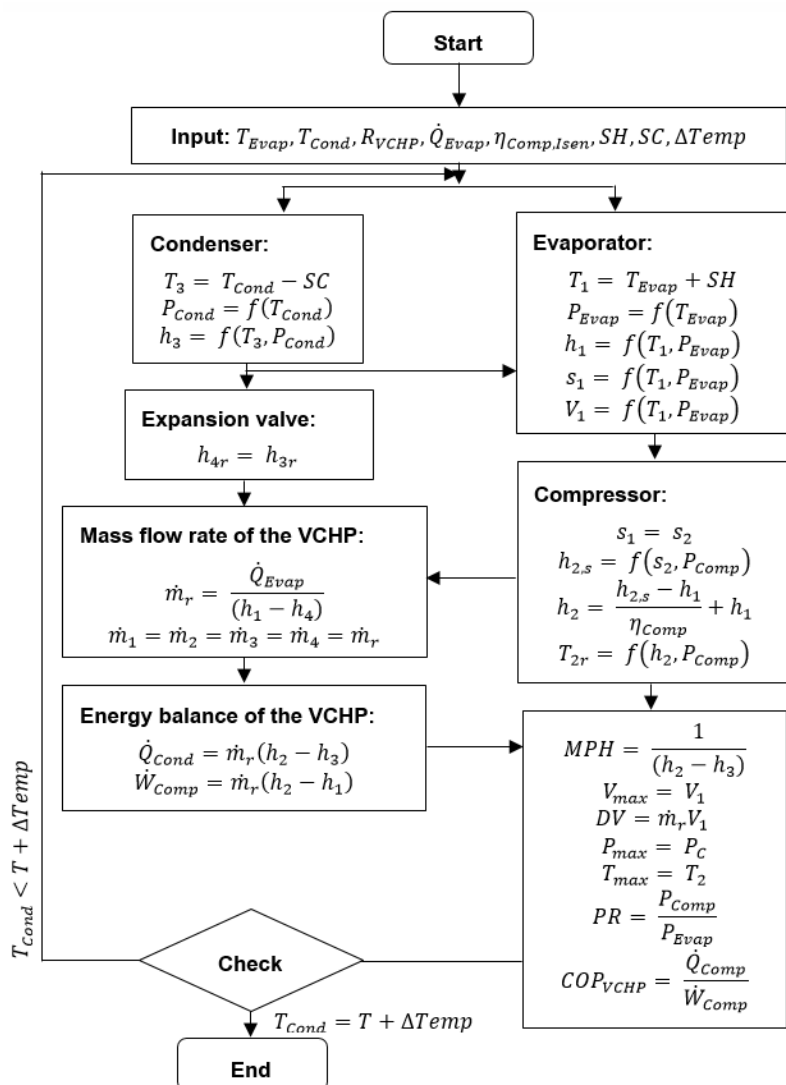
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient Of Performance, COP_{VCHP}) การทำความร้อนของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ:

$$COP_{VCHP} = \frac{\dot{Q}_{Cond}}{\dot{W}_{Comp}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

เมื่อ $\dot{m}_r$ คือ อัตราการไหลของสารทำงานในระบบปั๊มความร้อน (kg/s) h คือ เอนทาลปี (Enthalpy) ที่สภาวะการทำงานต่างๆ (kJ/kg-K) $\dot{m}_w$ คือ อัตราการไหลของน้ำ (Liter/s) (ในงานวิจัยนี้หมายถึงอัตราการไหลของน้ำร้อนที่ถูกดึงไปใช้งานในกระบวนการอบแห้ง) $C_{p,w}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K) ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อน (°C) $\eta_{Comp,ME}$ คือ ประสิทธิภาพทางกลของเครื่องอัดไอ (%) $\eta_{Comp,MO}$ คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์ของเครื่องอัดไอ (%) และ $\eta_{Comp,Isen}$ คือ ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก (Isentropic) ของเครื่องอัดไอ (%)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอเพื่อใช้ในการทำนายสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มคุณภาพความร้อนระดับปานกลางก่อนนำไปใช้งานเพื่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดัง **Error! Reference source not found.** [17] เงื่อนไขและสมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- อุณหภูมิของเครื่องทำระเหย (T_{Evap}) คือ 50 °C (เมื่อสมมติให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนดังกล่าวได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และ/หรือ ความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น)

- ขนาดของปั๊มความร้อน คือ 10 kW (เป็นค่าสมมติฐานในการทำงานของระบบปั๊มความร้อนเท่านั้น สามารถลด/เพิ่มขนาดปั๊มความร้อนได้ เนื่องจากในงานวิจัยได้ให้ความสำคัญไปที่สารทำงานในระบบที่มีความเหมาะสมที่สามารถผลิตอุณหภูมิน้ำร้อนให้อุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะถูกดึงไปใช้งานในกระบวนการอบแห้งได้)

- อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น (T_{Cond}) คือ 60 ถึง 80 °C (เป็นช่วงอุณหภูมิที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายโดยเฉพาะในกระบวนการอบแห้ง ประกอบกับสามารถลดคุณภาพความร้อนหรืออุณหภูมิที่กำหนดได้เมื่อนำไปใช้งานจริง)
- ไม่คิดความดันลด (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นในเครื่องทำระเหย และเครื่องควบแน่น
- ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเครื่องอัดไอ (Isentropic efficiency) คือ 80%
- อุณหภูมิของของเหลวเย็นยิ่งยวด (Sub-cooling, SC) และอุณหภูมิของสภาวะไอร้อนยิ่งยวด (Superheating, SH) คือ 5 °C
- สมบัติของสารทำงานในระบบอ้างอิงจากโปรแกรม REFPROP Mini 7.0 (Free License) [18]
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนาจะถูกคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB (Academic License)

โดยขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกสารทำงานที่มีความเหมาะสมในระบบแสดงดังรูปที่ 2 มีหลักการทำงานดังนี้ กำหนดข้อมูลนำเข้าซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิของเครื่องทำระเหย (T_{Evap}) อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น (T_{Cond}) ชนิดของสารทำงานในระบบ (สำหรับงานวิจัยนี้สารทำงานในระบบจำนวน 15 สาร แสดงดังตารางที่ 1 ถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบ) ขนาดของปั๊มความร้อน ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเครื่องอัดไอ อุณหภูมิของของเหลวเย็นยิ่งยวด (T_{SC}) และอุณหภูมิของสภาวะไอร้อนยิ่งยวด (T_{SH}) จากนั้น (1) คำนวณหาความดันของเครื่องควบแน่น (P_{Cond}) ที่ได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่น [19] จากนั้นคำนวณหา เอนทาลปี (h_3) ด้านออกของเครื่องควบแน่นที่ได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันของเครื่องควบแน่น ในลำดับนี้จะทำให้ทราบเอนทาลปี (h_4) ด้านออกของวาล์วลดความดัน (2) คำนวณหาความดันของเครื่องทำระเหย (P_{Evap}) ที่ได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิด้านเครื่องทำระเหย [19] จากนั้นคำนวณหาเอนทาลปี (h_1) เอนโทรปีจำเพาะ (s_1) และปริมาตร (V_1) ด้านออกของเครื่องทำระเหยที่ได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันของเครื่องทำระเหย (3) คำนวณหาเอนทาลปี (h_2) และอุณหภูมิสารทำงาน (T_2) ด้านออกจากเครื่องอัดไอ (4) คำนวณหาอัตราการไหลของสารทำงานในระบบ (5) จากสมมูลพลังงานในระบบจะทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากเครื่องควบแน่น ($\dot{Q}_{Cond}$) และงานที่ต้องใส่เข้าไปในระบบปั๊มความร้อน ($\dot{W}_{Comp}$) จากนั้นค่าต่างๆ ที่คำนวณได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องควบแน่น ($\Delta Temp$) ครั้งละ 1 °C (60, 61, 62, ..., 78, 79 ถึง 80 °C) จะถูกนำมาคำนวณหาอัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ (Mass of refrigerant per unit heat output, MPH) อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในระบบ (Volume flow rate of refrigerant, V_{max}) ปริมาตรการอัดในเครื่องอัดไอ (Displacement volume, DV) ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่น (High-side pressure) อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ อัตราส่วนความดัน (Pressure ratio, PR) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อน (COP_{VCHP}) เมื่อ

สมมติให้ระบบปั๊มความร้อนทำการเพิ่มคุณภาพความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำประมาณ 50 °C ให้เป็นแหล่งความร้อนพร้อมใช้งานที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 60 ถึง 80 °C

ตารางที่ 1 สมบัติทางฟิสิกส์ของสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกนำมาพิจารณา [10, 20-24]

Working Fluid	ODP ¹	GWP ²	Normal Boiling Point (°C)	Critical Temperature (°C)	Critical Pressure (bar)	Safety Class ³
R-290	0	0	42.00	96.68	4.25	A3
R-236fa	0	9,810	-1.40	124.29	3.20	A1
R-245ca	0	693	25.00	174.42	3.93	-
R-245fa	0	820	15.10	154.01	3.65	B1
R-600	0	4.0	-0.50	152.00	38.00	A3
R-1234yf	0	<1	-26.00	94.70	33.80	A2L
R-1234ze(E)	0	<1	-19.00	109.40	36.40	A2L
R-1234ze(Z)	0	<1	9.80	150.10	35.10	A2L
R-1233zd(E)	~0	4.5	17.90	166.50	36.20	A1
R-32	0	677	-51.91	78.11	57.82	A2L
R-410a	0	1,725	-51.62	71.34	49.01	Non
R-407c	0	1,520	-43.80	96.10	49.90	Non
R-404a	0	3,800	-46.50	72.10	37.40	A1
R-507a	0	3,900	-46.70	70.90	37.90	A1
R-502	0.221	4,500	-45.40	80.70	40.20	A1

หมายเหตุ:¹ODP (Ozone Depletion Potential) คือ ค่าการทำลายชั้นโอโซนหรือชั้นบรรยากาศ (ค่า ODP จะถูกเทียบกับสารทำความเย็น R-11 หรือ CFC-11 ที่มีค่าเท่ากับ 1 ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ R-502 มีค่า ODP เท่ากับ 0.221 ซึ่งหมายความว่า R-502 มีค่าการทำลายชั้นบรรยากาศ เท่ากับ ร้อยละ 22.10 เมื่อเทียบกับ R-11 ที่มีค่าการทำลายชั้นบรรยากาศ เท่ากับ ร้อยละ 100

²GWP (Global Warming Potential) คือ ค่าการสร้างความร้อนเรือนกระจก ค่า GWP จะถูกเทียบกับค่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่มีค่าเท่ากับ 1 ยกตัวอย่างเช่น R-32 มีค่า GWP เท่ากับ 677 ซึ่งหมายถึง มีค่าการสร้างความร้อนเรือนกระจกเท่ากับ 677 เท่าของ CO₂

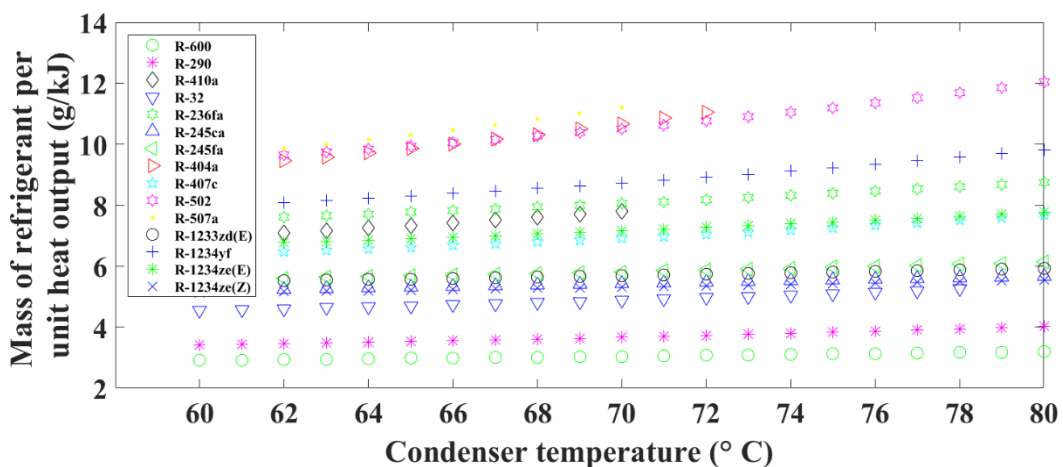
³Safety Class: No flame propagation (ไม่ติดไฟและไม่มีการลุกลามต่อเนื่องจากการวาบไฟ) ประกอบด้วย A1 (ความเป็นพิษต่ำ) และ B1 (ความเป็นพิษสูง) Lower flammability (ติดไฟได้ระดับปานกลาง) ประกอบด้วย A2L (ความเป็นพิษต่ำ) Higher flammability (ติดไฟง่ายสุด) ประกอบด้วย A3 (ความเป็นพิษต่ำ)

4. ผลการศึกษา และวิจารณ์ผลการศึกษาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การทำงานของสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนที่มีความเหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อน และอุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนมีค่าเท่ากับ 50 °C และ 60 – 80 °C ตามลำดับ จากนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรสำคัญซึ่งประกอบไปด้วย (1) อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ (MPH) (2) อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในระบบ (3) ปริมาตรการอัดในเครื่องอัดไอ (4) ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่น (5) อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ (6) อัตราส่วนความดัน และ (7) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อน (COP_{VCHP}) [19] ผลการศึกษาสามารถแสดงได้ดังนี้

4.1 อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้

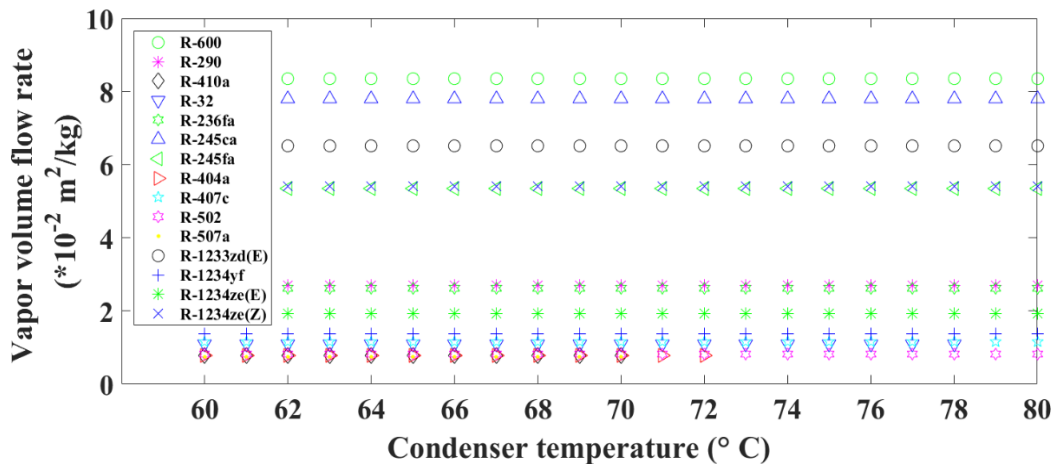
อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ (Mass of refrigerant per unit heat output, MPH) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของสารทำงานในระบบที่ถูกใช้งานต่อปริมาณพลังงานความร้อนที่ระบบปั๊มความร้อนผลิตได้ กล่าวคือ เปรียบเทียบปริมาณพลังงานความร้อนที่ระบบผลิตได้เท่ากัน สารทำงานในระบบชนิดใดที่มีปริมาณของอัตราการไหลของสารทำงานในระบบสูง แสดงให้เห็นถึงปริมาณของสารทำงานที่ใช้ในระบบจะมีปริมาณที่สูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลต่อกำลังงานที่ต้องป้อนให้กับระบบที่สูงขึ้นและรวมถึงขนาดของเครื่องอัดไอที่จะต้องมีความใหญ่อีกด้วย ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3 พบว่า อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิใช้งานด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิใช้งานที่ 80 °C อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้สูงที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-502 รองลงมาคือ R1234yf R236fa R-1234ze(E) และ R-407c ตามลำดับ และสารทำงานที่มีอัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ต่ำที่สุด 5 อันดับแรก (เป็นสารทำงานที่เหมาะสมในเรื่องของการใช้ปริมาณสารทำงานน้อยแต่ได้ปริมาณความร้อนออกมามาก) คือ R-600 เนื่องจากสารดังกล่าวเมื่อนำมาใช้กับปั๊มความร้อนที่มีขนาดเท่ากัน อุณหภูมิใช้งานเท่ากัน จะส่งผลให้สารทำงานที่จะนำมาใช้ในระบบน้อยที่สุด รองลงมา คือ R-290 R-1234ze(Z) R-245ca และ R-1233zd(E) ตามลำดับ



รูปที่ 3 อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่าง ๆ

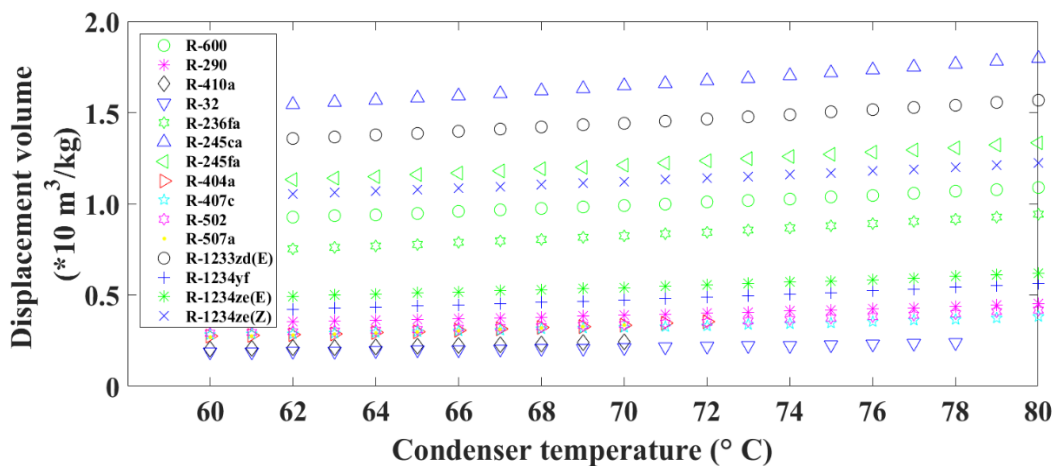
4.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตร และปริมาตรการอัดในเครื่องอัดไอของสารทำงานในระบบ

อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Vapor volume flow rate) ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นจะสอดคล้องกับปริมาตรการอัด (Displacement volume) ที่เกิดขึ้นในเครื่องอัดไอ และเมื่อปริมาตรการอัดในเครื่องอัดไรมีค่าสูงจะหมายถึงขนาดของเครื่องอัดไอที่จะต้องใช้ในการระบบจะต้องมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้ก็เพื่อให้เครื่องอัดไอสามารถทำงานได้ตรงกับความต้องการนั่นเอง โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำความเย็นแต่ละชนิดในระบบเมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 4 และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิใช้งานที่ 80 °C พบว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในระบบสูงที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-600 รองลงมา คือ R-245ca R-1233zd(E) R-1234ze(Z) และ R-245fa ตามลำดับ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในระบบต่ำที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-502 เนื่องจากสารดังกล่าวเมื่อถูกนำมาใช้งานในระบบปั๊มความร้อนจะทำให้เครื่องอัดไอในระบบปั๊มความร้อนมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับระบบปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงานอื่น ๆ รองลงมา คือ R-407c R-1234yf R-1234ze(E) และ R-236fa และ R-290 (R-236fa และ R-290 มีค่าใกล้เคียงกัน) ตามลำดับ



รูปที่ 4 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในระบบ เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่าง ๆ

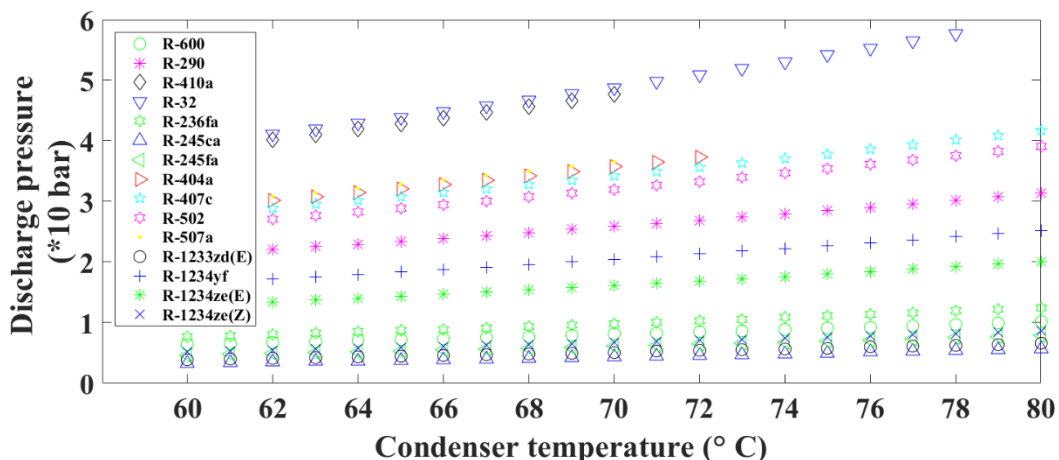
ในส่วนปริมาตรการอัดของเครื่องอัดไอสารทำงานในระบบ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5 พบว่า เมื่อพิจารณาอุณหภูมิใช้งานที่ 80 °C ปริมาตรการอัดของเครื่องอัดไอของสารทำงานในระบบสูงที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-245ca รองลงมา คือ R-1233zd(E) R-245fa R-1234ze(Z) และ R-600 ตามลำดับ โดยปริมาตรการอัดของเครื่องอัดไอของสารทำงานในระบบต่ำที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-407c เนื่องจากที่ความต้องการอุณหภูมิเท่ากัน ขนาดของปั๊มความร้อนมีขนาดเดียวกัน R-407c จะมีปริมาตรการอัดต่ำสุด (ขนาดเครื่องอัดไอจะมีขนาดเล็กที่สุด) รองลงมา คือ R-502 R-290 R-1234yf และ R-1234ze(E) ตามลำดับ



รูปที่ 5 ปริมาตรการอัดของเครื่องอัดไอ เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่าง ๆ

4.3 ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่น และอุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ

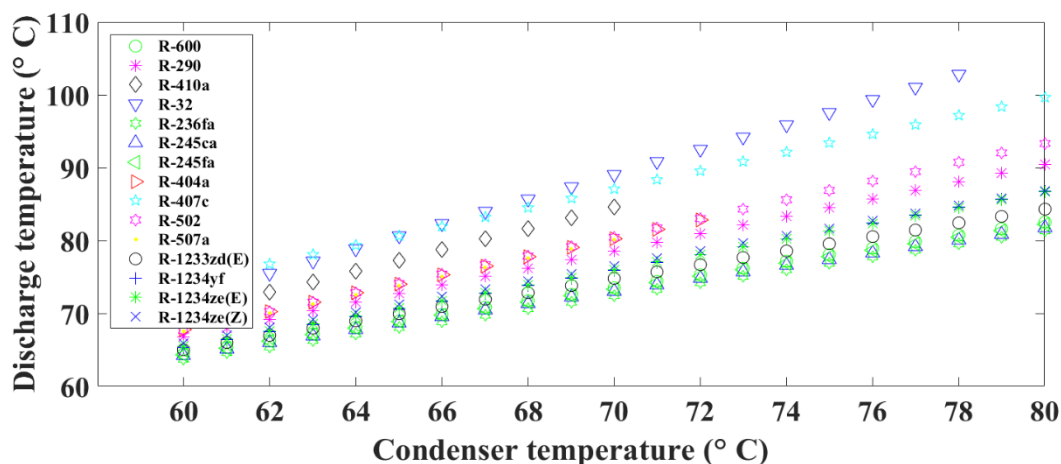
ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่น (Discharge pressure) คือ ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบปั๊มความร้อน ถ้าความดันด้านสูงด้านเครื่องควบแน่นมีค่าสูงจะส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นของระบบปั๊มความร้อน ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 6 พบว่า ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่นจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พิจารณาอุณหภูมิใช้งานที่ 80 °C ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่นในระบบสูงที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-407c รองลงมา คือ R-502 R-290 R-1234yf และ R-1234ze ตามลำดับ ความดันสูงด้านเครื่องควบแน่นในระบบต่ำที่สุด 5 อันดับแรก คือ R245ca ทั้งนี้ก็เป็นผลมาจากความดันวิกฤตของสารทำความเย็นมีค่าต่ำ (แสดงดัง**Error! Reference source not found.**) จึงส่งผลให้อุณหภูมิทำงานของสารดังกล่าวเมื่อนำมาใช้งานตามอุณหภูมิที่กำหนดมีความดันสูงด้านเครื่องควบแน่นต่ำไปด้วย รองลงมา คือ R-1233zd(E) R-245fa R-1234ze(Z) และ R-600 และ R-236fa (R-600 และ R-236fa มีค่าใกล้เคียงกัน) ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความดันด้านสูงของเครื่องควบแน่น เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ (Discharge temperature) คือ อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบปั๊มความร้อน ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 7 พบว่า อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องควบแน่นจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พิจารณาอุณหภูมิใช้งานที่ 80 °C อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอในระบบสูงที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-407c รองลงมา คือ R-502 R-290 R-1234ze(Z) และ R-1234yf และ

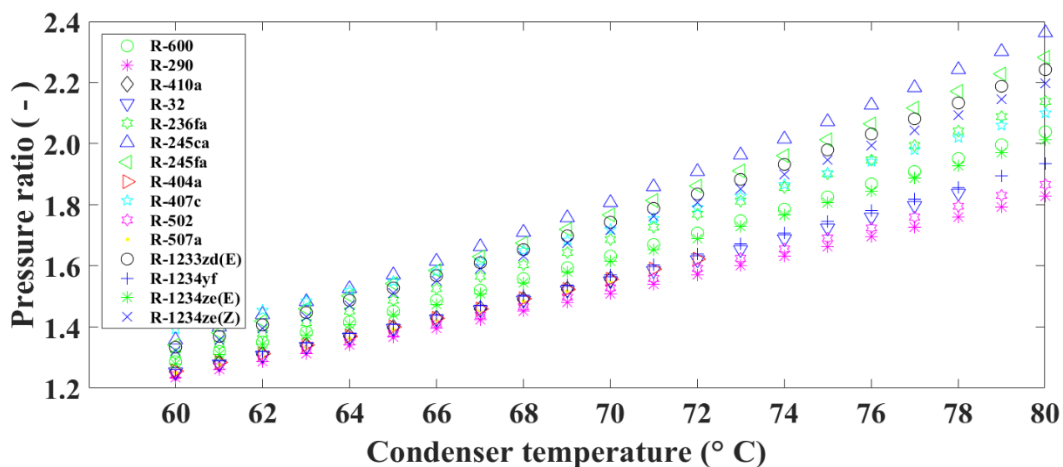
R-1234ze(E) (R-1234yf และ R-1234ze(E) มีค่าใกล้เคียงกัน) ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอน์ในระบบต่ำที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-236fa ทั้งนี้ก็เป็นผลมาจากอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานดังกล่าวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิใช้งาน (แสดงดังตารางที่ 1) จึงส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอน์ในระบบมีอุณหภูมิต่ำ รองลงมา คือ R-245ca R-245fa R-600 และ R-1233zd(E) ตามลำดับ



รูปที่ 7 อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอน์ เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่าง ๆ

4.4 อัตราส่วนความดัน

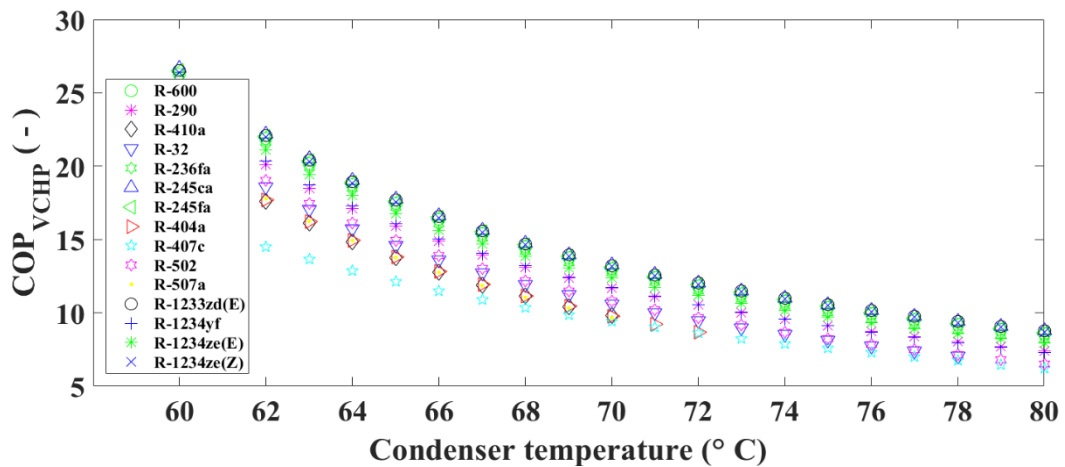
อัตราส่วนความดัน (Pressure ratio) เป็นอัตราส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างความดันด้านเครื่องควบแน่น และความดันด้านเครื่องทำระเหย กล่าวคือ อัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้นหากมีค่าสูง จะส่งผลต่อกำลังงานของเครื่องอัดไอน์ที่ต้องสูงขึ้นตามไปด้วย ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 8 พบว่า อัตราส่วนความดันของระบบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิใช้งานที่ 80 °C อัตราส่วนความดันสูงที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-245ca รองลงมา คือ R-245fa R-1233zd(E) R-1234ze(E) และ R-236fa ตามลำดับ โดยอัตราส่วนความดันในระบบต่ำที่สุด 5 อันดับแรก คือ R-290 รองลงมา คือ R-502 R-1234yf R-1234ze(E) และ R-600 ตามลำดับ ทั้งนี้ก็เป็นผลมาจากอุณหภูมิและความดันของสารทำงานเมื่อถูกนำมาเทียบกับอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤตจะมีความเหมาะสมเมื่อเทียบกับความต้องการของอุณหภูมิความร้อนใช้งาน



รูปที่ 8 อัตราส่วนความดัน เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่าง ๆ

4.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบปั๊มความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบปั๊มความร้อน (Coefficient of performance of heat pump, COP_{VCHP}) ถือได้ว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะช่วยในการตัดสินใจว่าสารทำงานในระบบชนิดใดดีที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบเมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบปั๊มความร้อนมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิใช้งานที่ 80 °C สารทำงานในระบบที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบปั๊มความร้อนมีค่าสูงสุด 5 อันดับแรก คือ R-245ca เนื่องจากระบบปั๊มความร้อนเมื่อใช้สารทำงานดังกล่าวระบบจะสามารถผลิตอัตราความร้อนใช้งานได้สูงที่สุด ประกอบกับความต้องการพลังงานที่จะต้องป้อนให้กับเครื่องอัดไอน์มีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ R-1233zd(E) R-1234ze(Z) R-245fa และ R-600 ตามลำดับ โดยสารทำงานในระบบที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบปั๊มความร้อนมีค่าต่ำสุด 5 อันดับแรก คือ R-407c ดังจะเห็นได้จากอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับความต้องการของอุณหภูมิใช้งานจึงส่งผลให้พลังงานที่ต้องป้อนให้กับเครื่องอัดไอน์มีค่าสูง จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบปั๊มความร้อนมีค่าต่ำ R-502 R-1234yf R-290 และ R-1234ze(E) ตามลำดับ



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบปั๊มความร้อน เมื่ออุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 80 °C สารทำงานในระบบ 4 ชนิด คือ R-32 R404a R410a และ R507a ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบปั๊มความร้อนได้ เนื่องจากอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำกว่า 80 °C จึงทำให้ระบบปั๊มความร้อนไม่สามารถเพิ่มคุณภาพความร้อนให้มีอุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 80 °C ได้นอกจากนี้ผลการศึกษาสารทำงานในระบบทั้ง 15 สาร พบว่า เมื่อพิจารณาอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 80 °C ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนของระบบเมื่อสารทำงานต่างชนิดกัน จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้สารทำงานในระบบที่ดีที่สุดจำเป็นต้องนำปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.4 มาร่วมพิจารณาด้วย (ทั้งนี้ในการพิจารณาจะให้ความสำคัญไปที่สารทำงาน 5 อันดับแรก ของแต่ละหัวข้อว่ามีสารทำงานอะไรบ้าง จากนั้นจะพิจารณาว่าในแต่ละหัวข้อมีสารทำงานดังกล่าวซ้ำกันจำนวนเท่าไร ซึ่งหากสารทำงานดังกล่าวซ้ำกันในหลายหัวข้อนั้นหมายความว่าสารทำงานนั้นมีคะแนนที่สูงกว่าสารทำงานอื่น ๆ) โดยผลการศึกษาพบว่า R-600 จะเป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด รองลงมา คือ R-290 R-245ca R-1233zd(E) R-245fa R-1234ze(E) R-1234yf R- 1234ze(Z) และ R-236fa ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามหากนำเอาผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งในส่วนของการทำลายโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (ODP) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) และความปลอดภัยต่อการใช้งาน (การติดไฟและความเป็นพิษ) ผลการศึกษาจะพบว่า R-1234ze(E) เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด รองลงมา คือ R-1234yf R-1234ze(Z) R-1233zd(E) R-290 R-600 R-245ca R-245fa และ R-236fa ตามลำดับ โดยการเรียงลำดับของสารทำงานข้างต้นได้ให้ความสำคัญไปที่ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมก่อนการติดไฟและความเป็นพิษ ทั้งนี้เนื่องจากในการใช้งานจริงสามารถออก

ข้อกำหนดในการป้องกัน การใช้งานให้ถูกวิธี เพื่อป้องกันการติดไฟและความเป็นพิษต่อการใช้งานได้

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสารทำงานที่เหมาะสมที่สุดของระบบปั๊มความร้อนสำหรับงานอบแห้งอุณหภูมิปานกลาง (อุณหภูมิ 60 – 80 °C) โดยในการศึกษาสารทำงานจำนวน 15 ชนิด ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์จำนวน 7 พารามิเตอร์ ดังนี้ (1) อัตราการไหลของสารทำงานในระบบต่อปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ (2) อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในระบบ (3) ปริมาตรการอัดในเครื่องอัดไอ (4) ความดันสูงสุดด้านเครื่องควบแน่น (5) อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ (6) อัตราส่วนความดัน และ (7) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อน ผลการศึกษาเมื่อพิจารณาในกรณีที่อุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พบว่า พารามิเตอร์ที่ (1) ถึง (6) จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิและความดันที่เพิ่มขึ้น ส่วนพารามิเตอร์ที่ (7) นั้น จะมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่น นอกจากนี้ผลการศึกษาเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงานจำนวน 15 ชนิด ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนเพื่อผลิตพลังงานความร้อนใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 60 – 80 °C โดยเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในส่วนของการทำลายโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน รวมถึงความปลอดภัยต่อการใช้งาน (การติดไฟและความเป็นพิษ) พบว่า R-1234ze(E) เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารทำงานอื่น ๆ และยังคงมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับสารอื่น ๆ ซึ่งส่งผลต่อการทำงานของระบบที่หมายรวมถึงความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าของระบบที่น้อย รองลงมา คือ R-1234yf R-1234ze(Z) R-1233zd(E) R-290 R-600 R-245ca R-245fa และ R-236fa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจากในงานวิจัยนี้ยังไม่มีมีการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายของสารทำงานในระบบ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.) : งบประมาณด้าน ววน. ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย และขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับสถานที่ทำวิจัย

References

- [1] Department of alternative energy development and efficiency, Ministry of energy. Project to improve solar energy potential map from satellite imagery for Thailand [Internet]. 2017 [cited 2021 March 19]. Available from: https://www.dede.go.th/download/OpenBigData/Solar_Map_1_2560.pdf
- [2] Department of alternative energy development and efficiency, Ministry of energy. Alternative energy development plan 2018 – 2037 (AEDP2018) [Internet]. 2018 [cited 2021 March 19]. Available from: https://www.dede.go.th/download/Plan_62/20201021_TIEB_AEDP2018.pdf
- [3] Sonsaree S, Jiajitsawat S, Thongsan S. Cooling water flow rate affecting the efficiency of a solar photovoltaic-thermal hybrid system. Kasem Bundit Engineering Journal 2021;11(1):74-90. (In Thai)
- [4] Pachanatong M, Suttha, W, Panyathitipong W. Household heat use to improve sweet tamarind quality. RMUTP Research Journal 2018;12(1):102-12. (In Thai)
- [5] Lim H, Kim C, Cho Y, Kim M. Energy saving potentials from the application of heat pipes on geothermal heat pump system. Applied Thermal Engineering 2017;126:1191-8.
- [6] Wu P, Wang Z, Li X, Xu Z, Yang Y, Yang Q. Energy-saving analysis of air source heat pump integrated with a water storage tank for heating applications. Building and Environment 2020;180:107029.
- [7] Wu X, Xing Z, He Z, Wang X, Chen W. Performance evaluation of a capacity-regulated high temperature heat pump for waste heat recovery in dyeing industry. Applied thermal engineering 2016;93:1193-201.
- [8] Zhao Z, Xing Z, Hou F, Tian Y, Jiang S. Theoretical and experimental investigation of a novel high temperature heat pump system for recovering heat from refrigeration system. Applied Thermal Engineering 2016;107:758-67.
- [9] Wu Z, Wang X, Sha L, Li X, Yang X, Ma X, et al. Performance analysis and multi-objective optimization of the high-temperature cascade heat pump system. Energy 2021;223:120097.
- [10] Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Makhnatch P, Molés F. Refrigerant R-32 as lower GWP working fluid in residential air conditioning systems in Europe and the USA. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;80:1031-42.

- [11] Juhasz JR. Novel working fluid, HFO-1336mzz (E), for use in waste heat recovery application. 12th IEA Heat Pump Conference; 2017. p. 1-10.
- [12] Zühlsdorf B, Jensen JK, Elmegaard B. Heat pump working fluid selection—economic and thermodynamic comparison of criteria and boundary conditions. *International Journal of Refrigeration* 2019;98:500-13.
- [13] Frutiger J, Zühlsdorf B, Elmegaard B, Abildskov J, Sin G. Reverse engineering of working fluid selection for industrial heat pump based on Monte Carlo sampling and uncertainty analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2018;57(40):13463-77.
- [14] Fan X-W, Zhang X-P, Ju F-J, Wang F. Theoretical study of heat pump system using CO₂/dimethylether as refrigerant. *Thermal Science* 2013;17(5):1261-8.
- [15] Chaichana C, Aye L, Charters WW. Natural working fluids for solar-boosted heat pumps. *International Journal of refrigeration* 2003;26(6):637-43.
- [16] Sonsaree S, Asaoka T, Jiajitsawat S, Aguirre H, Tanaka K. VCHP-ORC power generation from low-grade industrial waste heat combined with solar water heating system: Power generation and CO₂ emission in industrial estate of Thailand. *Cogent Engineering* 2017;4(1):1-24.
- [17] Chaiyat N, Chaichana C. Working fluid selection for geothermal heat pump. *Engineering Journal Chiang Mai University* 2006;13:27-32. (In Thai)
- [18] NIST. REFPROP Mini, Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures software; 2000.
- [19] Fannou JC, Rousseau C, Lamarche L, Kaji S. A comparative performance study of a direct expansion geothermal evaporator using R-410A and R-407C as refrigerant alternatives to R-22. *Applied Thermal Engineering* 2015;82:306-17.
- [20] Arora A, Kaushik S. Theoretical analysis of a vapour compression refrigeration system with R-502, R-404A and R-507A. *International journal of refrigeration* 2008;31(6):998-1005.
- [21] ANSI/ASHRAE Standard 34–2016, Designation and safety classification of refrigerants. ASHRAE Atlanta; 2016.
- [22] Saleh B. Parametric and working fluid analysis of a combined organic Rankine-vapor compression refrigeration system activated by low-grade thermal energy. *Journal of advanced research* 2016;7(5):651-60.
- [23] Latrash F, Agnew B, Al-Weshahi M, Eshoul N, editors. Optimal selection of using fluids (HFC, HCFC, HFO) for an organic Rankine cycle utilizing a low temperature geothermal

energy source. 5th International Conference on Environment Science and Engineering; 2015. p. 48-54.

- [24] Chaiyat N. Performance analysis of an absorption heat transformer with assisted vapor compression heat pump [Doctor of philosophy in energy engineering]. Chiang Mai: Chiang Mai University; 2011.

ประวัติผู้เขียนบทความ



สรวิศ สอนสารี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล จังหวัดพิษณุโลก 65000, sorawitsonsaree@psru.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์



สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์ หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000, somchai.j@nu.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน แบตเตอรี่ และการทดสอบแบตเตอรี่



วิสุทธ์ แซ่มสะอาด วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกิตตเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000, Wisutc@nu.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน Smart Grid และ Smart City

Article History:

Received: August 19, 2021

Revised: November 25, 2021

Accepted: December 13, 2021

การออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น

DESIGN AND DEVELOPMENT A SLICED BAMBOO-SHOOTS CUTTER

สุวิมล เจียรรรวานิช

รองคณบดี, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120,

Suwimol.J@mail.rmutk.ac.th

Suwimol Jairtalawanich

Associate Dean, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology

Krungthep, 2 Nanglinchee Rd., Tungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand,

Suwimol.J@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นสำหรับวิสาหกิจชุมชน เครื่องออกแบบให้ปรับความเร็วรอบได้สูงสุดระดับ 800 รอบต่อนาที สามารถหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นได้ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ทดสอบหาความแตกต่างของเวลาในการหั่นหน่อไม้ 3 ชนิดที่มีในชุมชน คือหน่อไม้ไผ่กิมจู หน่อไม้ไผ่ตง และหน่อไม้ไผ่ตงหวาน จากผลการทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น พบว่าหน่อไม้ไผ่กิมจู ได้เวลาเฉลี่ย 36.73 วินาทีต่อกิโลกรัม หน่อไม้ไผ่ตง ได้เวลาเฉลี่ย 32.74 วินาทีต่อกิโลกรัม หน่อไม้ไผ่ตงหวาน ได้เวลาเฉลี่ย 27.48 วินาทีต่อกิโลกรัม คิดเป็นเวลาเฉลี่ยของเครื่องหั่นหน่อไม้ 32.32 วินาทีต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-Way ANOVA) สรุปได้ว่า ชนิดของหน่อไม้ไม่มีผลต่อเวลาในการหั่น ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงนำเวลาเฉลี่ยของการหั่นหน่อไม้ทั้ง 3 ชนิด เป็นเวลาตัวแทนของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องหั่นหน่อไม้ดองแบบเส้นและแบบแผ่นที่มีการศึกษาอยู่เดิม ที่ความเร็วรอบใบมีด 800 รอบต่อนาที เวลาเฉลี่ย 25.31 นาทีต่อ 10 กิโลกรัม คิดเป็นเวลาเฉลี่ย 151.8 วินาทีต่อกิโลกรัม แต่จากเวลาตัวแทนของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นที่ออกแบบคือ 32.32 วินาทีต่อกิโลกรัม ซึ่งพบว่าใช้เวลาเฉลี่ยน้อยลง 119.48 วินาที คิดเป็นประสิทธิภาพที่ดีขึ้นร้อยละ 78.71

คำสำคัญ: เครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น, หน่อไม้, ความเร็วรอบใบมีด, ประสิทธิภาพ

ABSTRACT

The objective of this research is to design and develop a plate cutting machine for community enterprises. The machine was designed to adjust the speed at a maximum of 800 rpm and its was able to cut fresh bamboo shoots with a plate thickness of about 3 mm. Moreover, the test in differences of the cutting time of 3 types of bamboo shoots in the community involving in Kimju bamboo shoots, rough giant bamboo and sweet rough giant bamboo shoots. The results of the timing performance test of the plate-type fresh bamboo shoot slicer showed that Kimju bamboo shoots average time was 36.73 seconds per kilogram, rough giant bamboo had an average time of 32.74 seconds per kilogram, and sweet rough giant bamboo shoots had an average time of 27.48 seconds per kilogram. The average time of the bamboo shoot slicer is 32.32 seconds per kilogram. Data were analyzed by One-way ANOVA with significance level of 0.05. It was concluded that bamboo shoot type had no effect on cutting time and the mean time of slicing of all 3 types of bamboo shoots is representative of the plate slicer. The efficiency was compared with the traditional strand and plate pickled bamboo shoot slicer. It was shown that the average time was 25.31 minutes per 10 kilogram at the blade speed of 800 rpm, which was an average time of 151.8 seconds per kilogram. Nevertheless, the time the representative of the designed disc shredder was 32.32 seconds per kilogram. It was found that it took 119.48 seconds less time, representing a 78.71 percent improvement in performance.

KEYWORDS: Sliced Bamboo-Shoots Cutter, Bamboo Shoots, Cutting Speed, Efficiency

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิสาหกิจชุมชนเป็นกลไกหนึ่งที่ช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจชุมชน โดยนำความรู้ ภูมิปัญญาท้องถิ่น และทรัพยากร มาผลิตสินค้าหรือบริการก่อให้เกิดการสร้างงาน สร้างรายได้ให้กับชุมชนยังส่งผลให้ชุมชนสามารถพึ่งพาตนเองได้ วิสาหกิจชุมชนจึงมีบทบาทต่อการสนับสนุนเศรษฐกิจชุมชนและส่งผลกระทบเชื่อมโยงต่อการสนับสนุนเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งภาครัฐได้ตระหนักถึงความสำคัญและได้ให้การส่งเสริมและพัฒนาวิสาหกิจชุมชนอย่างต่อเนื่องภายใต้พระราชบัญญัติส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน พ.ศ. 2548 ด้วยเหตุผลเพื่อให้มีการส่งเสริมความรู้และภูมิปัญญาท้องถิ่น การสร้างรายได้ การช่วยเหลือซึ่งกันและกัน การพัฒนาความสามารถในการจัดการและการพัฒนารูปแบบของวิสาหกิจชุมชน อันยังผลให้ชุมชนพึ่งพาตนเองได้และพัฒนาระบบเศรษฐกิจชุมชนให้มี

ความเข้มแข็งพร้อมสำหรับการแข่งขันทางการค้าในอนาคต รวมถึงก้าวไปสู่การเป็นผู้ประกอบการขนาดย่อมและขนาดกลางต่อไป

โดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ ตำบลโคกไม้ลาย อำเภอมืองปราจีนบุรี จังหวัดปราจีนบุรี มีหน่อไม้เป็นพืชเศรษฐกิจจึงได้รวบรวมกลุ่มคนในพื้นที่ชุมชน แปรรูปอาหารจากที่มีในพื้นที่มาเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยมีการแปรรูป 2 ลักษณะคือขายเป็นหน่อไม้สด และ แปรรูปเป็นหน่อไม้ดองที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งต้องใช้เวลานานในหั่นด้วยมือในกลุ่มครัวเรือนและวิสาหกิจชุมชนฯ โดยการพัฒนาศักยภาพชุมชนเพื่อสร้างความเข้มแข็งและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันการแปรรูปอาหาร ทั้งนี้เห็นได้จากผลิตภัณฑ์ประเภทหน่อไม้ดองที่มีขายในท้องตลาดเพิ่มขึ้นหน่อไม้ดองจัดเป็นวัตถุดิบในการประกอบอาหารประเภทหนึ่งที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายปริมาณที่บริโภควันจะเพิ่มขึ้นทุกปี

เนื่องจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ตำบลโคกไม้ลาย อำเภอมืองปราจีนบุรี จังหวัดปราจีนบุรียังไม่มีเครื่องทุ่นแรงทุ่นเวลาหั่นหน่อไม้ คณะผู้จัดทำจึงคิดที่จะนำผลที่ได้จากศึกษาที่ผ่านมา [1] นำมาออกแบบพัฒนาและสร้างเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น เพื่อเป็นเครื่องต้นแบบนำไปใช้ในด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม และช่วยในการเพิ่มผลผลิตการแปรรูปหน่อไม้เพื่อเป็นการเพิ่มรายได้กับเกษตรกร สามารถกำหนดความสัมพันธ์ของกระบวนการหั่นจากการกำหนดเวลา ปริมาณ และทดสอบเพื่อดูประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น เพื่อนำไปประยุกต์และพัฒนาต่อไป

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นสำหรับวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็ก เพื่อทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นกับเครื่องหั่นหน่อไม้ดองแบบเส้นและแบบแผ่น ซึ่งมีสมมติฐานคือ เครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น สามารถหั่นแบบแผ่นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร โดยทดสอบกับหน่อไม้ 3 ชนิดได้แก่ หน่อไม้ไผ่ตง หน่อไม้ไผ่กิมจู หน่อไม้ไผ่ตงหวาน ใช้เวลาไม่ต่างกัน

ขอบเขตของการวิจัย คือ เครื่องสามารถหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นให้มีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ออกแบบเพื่อใช้ในพื้นที่ ตำบลโคกไม้ลาย อำเภอมืองปราจีนบุรี จังหวัดปราจีนบุรี ชนิดของหน่อไม้สดที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ หน่อไม้ไผ่ตง หน่อไม้ไผ่กิมจู หน่อไม้ไผ่ตงหวาน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า 220 โวลต์ แบบ 4 โพล ที่ความเร็วรอบของใบตัด 800 รอบต่อนาที และตัวเครื่องใช้วัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ดังนั้น ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ได้เครื่องหั่นหน่อไม้สำหรับครัวเรือนหรือวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็ก และเครื่องหั่นหน่อไม้มีประสิทธิภาพด้านเวลาในกระบวนการผลิตที่ดีขึ้น

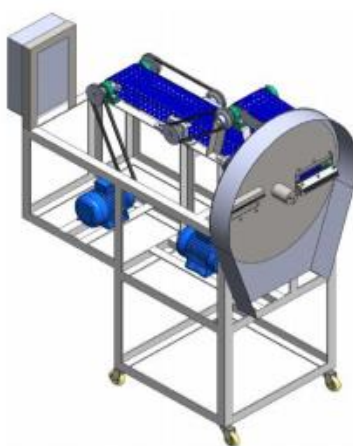
3. ขั้นตอนการศึกษา

3.1 การออกแบบและการสร้างเครื่อง

3.1.1 การออกแบบเครื่อง

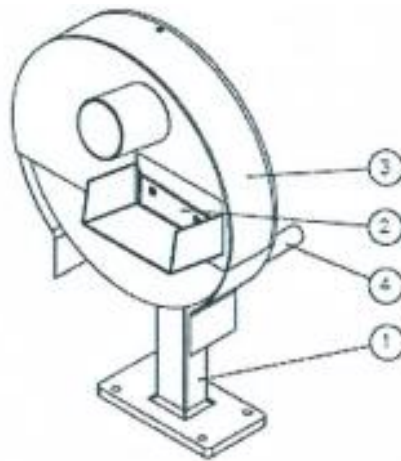
3.1.1.1 การทบทวนวรรณกรรมการออกแบบเครื่อง

จากการทบทวนวรรณกรรมการออกแบบและสร้างเครื่องหั่นหน่อไม้ต้องแบบเส้นและแบบแผ่น ด้วยการออกแบบจำลองเครื่องหั่นหน่อไม้ต้องด้วยโปรแกรม SolidWork โดยเครื่องหั่นหน่อไม้ต้นแบบขนาดกว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 1,060 มิลลิเมตรสูง 1,440 มิลลิเมตร [1] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องหั่นหน่อไม้ต้องแบบเส้นและแบบแผ่น

การพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีเครื่องฝานหน่อไม้สำหรับแปรรูปอาหาร ที่มีแนวคิดของการออกแบบเครื่องฝานหน่อไม้สำหรับแปรรูปอาหารที่เหมาะสมกับความต้องการของกลุ่มชุมชน ดังรูปที่ 2 โดยหมายเลข 1 คือชุดฐานเครื่องเพื่อรองรับส่วนอื่น ๆ วัสดุทำจากสแตนเลส ซึ่งไม่เกิดสนิมตามมาตรฐานการสร้างชิ้นส่วนเกี่ยวกับผลิตอาหารมาตรฐาน GMP หมายเลข 2 คือชุดใบมีด ออกแบบให้สามารถหั่นหรือฝานมีความหนา 1.0 มิลลิเมตรตามขอบเขตของการวิจัย หมายเลข 3 ฝาครอบออกแบบให้มีช่องป้อนตามแนวคิดของการออกแบบ สามารถป้อนหน่อไม้ตามแนวยาวและแนวขวาง ไม่ต้องเสียเวลาปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ หมายเลข 4 มือหมุน ติดตั้งเข้ากับชุดใบมีดและมีสกรูขันเพื่อล็อกตำแหน่งง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน [2]



รูปที่ 2 เครื่องฝานหน่อไม้สำหรับแปรรูปอาหาร

นำสู่การพัฒนาเครื่องหน่อไม้ให้มีขนาดที่เหมาะสมกับชุมชนขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายสะดวก ช่องใส่หน่อไม้อยู่ด้านบน เพื่อให้ง่ายและสะดวกในการทำงานของเครื่อง โดยหน่อไม้จะเคลื่อนลงด้วยแรงดูดของไวมิตและตามหลักแรงโน้มถ่วง

3.1.1.2 การออกแบบโครงสร้างระบบทางกล

1) การออกแบบขนาดมอเตอร์

ใช้ระบบส่งกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า 220 โวลต์ แบบ 4 โพล ที่ความเร็วรอบของไพบัต 800 รอบต่อนาที ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อน โดยน้ำหนักของจานไพบัตเท่ากับ 25 กิโลกรัม ขนาดรัศมีแกนเพลามอเตอร์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร จากสูตรคำนวณหาทอร์ก (Torque) [3] ดังสมการที่ (1)

$$T = F \times r \quad (1)$$

$$\text{แทนค่า } T = (25 \times 9.81) \times \left(\frac{15}{1000} \right) = 3.67 \text{ นิวตันต่อเมตร}$$

สูตรคำนวณหากำลัง ดังสมการที่ (2)

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \quad (2)$$

$$\text{แทนค่า } P = \frac{2 \times 3.1416 \times 800 \times 3.67}{60} = 307.45 \text{ วัตต์} = 0.412 \text{ แรงม้า}$$

จากการคำนวณหาขนาดแรงของมอเตอร์ที่ได้ 307.45 วัตต์ เพื่อความเหมาะสมของการใช้งาน จึงเลือกใช้ขนาดแรงของมอเตอร์ 1 แรงม้า 400 วัตต์

2) อัตราทดสายพานหลายชั้น

มีล้อสายพานทั้งหมด 4 ตัว คือ มู่เล่ขนาด 2 นิ้ว ขับมู่เล่ขนาด 8 นิ้ว มู่เล่ขนาด 3 นิ้ว ขับมู่เล่ขนาด 9 นิ้ว หาอัตราส่วนทดสายพาน [4] ดังสมการที่ (3)

$$i_i = \frac{n_i}{n_{i+1}} \text{ หรือ } \frac{d_{i+1}}{d_i} \quad (3)$$

$$\text{ดังนั้น อัตราทดคู่ที่ 1 } i_1 = \frac{n_1}{n_2} \text{ หรือ } \frac{d_2}{d_1}$$

$$\text{อัตราทดคู่ที่ 2 } i_2 = \frac{n_3}{n_4} \text{ หรือ } \frac{d_4}{d_3}$$

กำหนดให้ ล้อขับสายพาน (d_1) = 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ล้อตาม (d_2) = 203.2 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) ล้อขับสายพาน (d_3) = 76.2 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ล้อตาม (d_4) = 228.6 มิลลิเมตร (9 นิ้ว)

คำนวณหาความเร็วรอบของล้อตาม เมื่อความเร็วของล้อขับสายพานเท่ากับ 1450 รอบต่อนาที

$$\text{จากสูตร } i_1 = \frac{n_1}{n_2} \text{ หรือ } \frac{d_2}{d_1} \text{ ดังนั้น } n_2 = \frac{n_1 \times d_1}{d_2} = \frac{1450 \times 50.8}{203.2} = 362.5 \text{ รอบต่อนาที}$$

$$\text{อัตราส่วนทดสายพาน คู่ที่ 1 จากสูตร } i_1 = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1450}{362.5} = 4 : 1 \text{ รอบต่อนาที}$$

ดังนั้นล้อขับสายพานหมุน 4 รอบ ล้อตามหมุน 1 รอบ

$$\text{จากสูตร } i_1 = \frac{n_3}{n_4} \text{ หรือ } \frac{d_4}{d_3} \text{ ดังนั้น } n_4 = \frac{n_3 \times d_3}{d_4} = \frac{362.5 \times 76.2}{228.6} = 120.8 \text{ รอบต่อนาที}$$

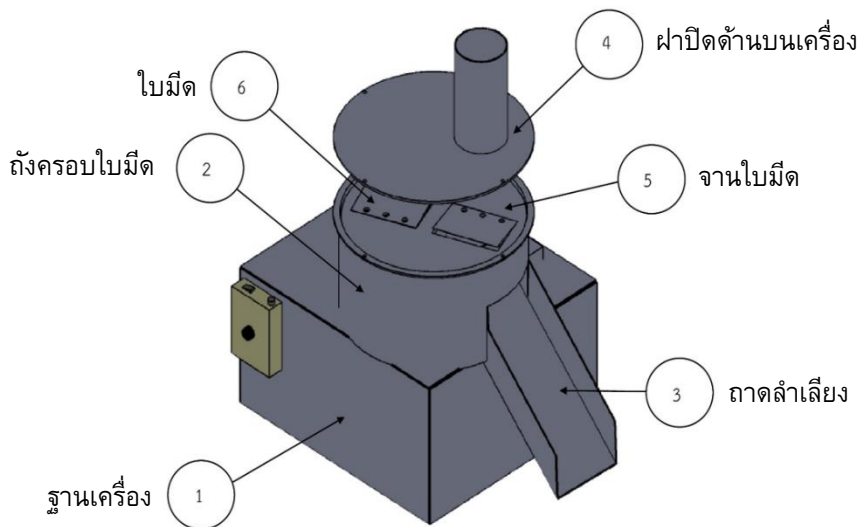
$$\text{อัตราส่วนทดสายพาน คู่ที่ 2 จากสูตร } i_2 = \frac{n_3}{n_4} = \frac{362.5}{120.8} = 3 : 1 \text{ รอบต่อนาที}$$

ดังนั้นล้อขับสายพานหมุน 3 รอบ ล้อตามหมุน 1 รอบ

อัตราทดรวม = $i_1 \times i_2 = 4 \times 3 = 12 : 1$ รอบต่อนาที ดังนั้นล้อขับสายพานหมุน 12 รอบ ล้อตามหมุน 1 รอบ

จากการคำนวณหาอัตราทดสายพานหลายชั้น พบว่าอัตราทดสายพานคู่ที่ 1 คือ 4 : 1 รอบต่อนาที ได้ความเร็วรอบ 362.5 รอบต่อนาที และอัตราทดสายพานคู่ที่ 2 คือ 3 : 1 รอบต่อนาที ได้ความเร็วรอบ 120.8 รอบต่อนาที โดยจะใช้ความเร็วที่ 800 รอบต่อนาที จึงติดตั้งตัวปรับความเร็วรอบ เนื่องจากตัวปรับความเร็วรอบสามารถปรับความเร็วตามที่ต้องการได้

จากการออกแบบโครงสร้างทางกล จึงนำมาออกแบบเป็นโครงสร้างส่วนประกอบของเครื่องหันหน้าไม้สดแบบแผ่นได้ดังรูปที่ 3



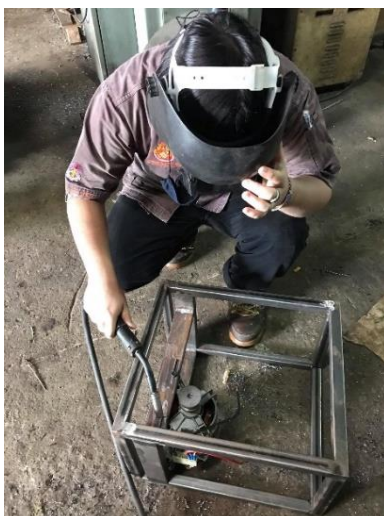
รูปที่ 3 เครื่องหันหน้าไม้สดแบบแผ่น

3.1.2 การสร้างเครื่องหันหน้าไม้สดแบบแผ่น

ในส่วนของการสร้างเครื่องหันหน้าไม้สดแบบแผ่นมีขั้นตอนการดำเนินการและรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.2.1 โครงสร้างเครื่องหันหน้าไม้สดแบบแผ่นมีขั้นตอนการดำเนินการและรายละเอียดดังนี้

1) ฐานเครื่องหันหน้าไม้สดแบบแผ่น ตัดเหล็กกล่องขนาด 25x25 มิลลิเมตรยาว 450 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ตัดเหล็กกล่องขนาด 25x25 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ตัดเหล็กกล่องขนาด 25x25 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ตัดเหล็กกล่องแบนขนาด 50x25 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น จากนั้นทำการเชื่อมไฟฟ้าให้ฉากและให้ได้ตามแบบ [5]



รูปที่ 4 การเชื่อมฐานเครื่อง

2) ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า 220 โวลต์ แบบ 4 โพล เข้ากับโครงสร้าง



รูปที่ 5 การติดตั้งมอเตอร์

3.1.2.2 การสร้างจานใบมีด มีรายละเอียดดังนี้

- 1) ชุดจานมีดทำจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตรหนา 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 6 การสร้างชุดใบมีด

- 2) ติดตั้งใบมีดเข้ากับจานใบมีด



รูปที่ 7 ติดตั้งใบมีดเข้ากับจานใบมีด

3.1.2.3 การประกอบเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ติดตั้งมู่เล่ สายพานและชุดใบมีดเข้ากับฐานเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น



รูปที่ 8 ติดตั้งมู่เล่ สายพานและจานใบมีดเข้ากับฐานเครื่อง

- 2) ประกอบชุดสายไฟเข้ากับกล่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 9 ประกอบชุดสายไฟเข้ากับกล่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

3.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น การทดลองเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ให้ตรงกับวัตถุประสงค์และสมมติฐานเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับโครงงานออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบเส้นและแบบแผ่น [1] วิธีการทดสอบเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น โดยนำหน่อไม้ไผ่ตง หน่อไม้ไผ่กิมจู และหน่อไม้ไผ่ตงหวาน มาทดลองโดยหาได้จากการกำหนดความเร็วรอบ ระยะเวลาในการหั่น สำหรับการหั่นหน่อไม้ 3 ชนิดนั้นให้ค่าที่เท่ากันหรือแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใด

3.2.1 จุดประสงค์การทดลอง

3.2.1.1 เพื่อหาเวลาเฉลี่ยในการหั่นหน่อไม้ 3 ชนิด

3.2.1.2 เพื่อทดสอบสมมติฐานว่าชนิดของหน่อไม้ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อเวลาในการหั่นหน่อไม้

3.2.1.3 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับโครงงานออกแบบและสร้างเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบเส้นและแบบแผ่น [3]

3.2.2 วิธีการทดสอบเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นประกอบไปด้วย 2 วิธีคือ ทดสอบการใช้งานของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นเบื้องต้น และทดสอบหั่นหน่อไม้ 3 ชนิดเพื่อหาเวลาในการหั่นโดยนำหน่อไม้ 3 ชนิด ๆ ละ 10 กิโลกรัม มาทดสอบการหั่นครั้งละ 1 กิโลกรัม ในหน่วยเป็นนาทีต่อกิโลกรัม

3.2.2.1 วิธีการทดสอบการใช้งานของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นเบื้องต้น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการทดสอบการใช้งานของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นเบื้องต้น

รายการ	วิธีการทดสอบเบื้องต้น
1. การทดสอบการใช้งานของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น	
1.1 เครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น	เปิดเครื่อง ให้แสดงสัญญาณไฟ
1.2 การทำงานของจานใบมีด	จานใบมีดหมุน และปรับความเร็วได้
2. การทดสอบการทำงานของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น	
2.1 สามารถหั่นชิ้นงานได้	สังเกตผลจากการหั่นจนจบ
2.2 ชิ้นงานได้ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร	วัดความหนาชิ้นงานที่หั่นแล้ว

3.2.2.2 วิธีการทดสอบหั่นหน่อไม้ 3 ชนิดเพื่อหาเวลาในการหั่นโดยนำหน่อไม้ 3 ชนิด ๆ ละ 10 กิโลกรัม มาทดสอบการหั่นครั้งละ 1 กิโลกรัม บันทึกผลการทดสอบและจดบันทึกข้อมูล

3.2.3 ออกแบบตารางการเก็บข้อมูลการทดสอบหั่นหน่อไม้ไผ่ตง หน่อไม้ไผ่กิมจู และหน่อไม้ไผ่ตงหวานเพื่อหาเวลาในการหั่นทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง ครั้งละ 1 กิโลกรัม และหาเวลาเฉลี่ย

3.2.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เปิดเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น
- 2) นำหน่อไม้ทั้ง 3 ชนิดที่เตรียมไว้มาทำการหั่น
- 3) จับเวลาในการทดลองหั่นหน่อไม้แต่ละครั้ง
- 4) บันทึกการทดลองโดยนำผลการทดลองมาแสดงบันทึกดังตารางที่ 2
- 5) วิเคราะห์ข้อมูล

3.2.3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) หน่อไม้ไผ่กิมจู หน่อไม้ไผ่ตง และหน่อไม้ไผ่ตงหวาน
- 2) นาฬิกาจับเวลา
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น การวิเคราะห์ข้อมูลตามวัตถุประสงค์และสมมุติฐานเพื่อนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างด้านเวลาในการหั่นหน่อไม้ 3 ชนิดโดยใช้การหั่นทั้งหมดชนิดละ 10 ครั้ง ๆ ละ 1 กิโลกรัม และนำมาเปรียบเทียบผลการทดลอง

3.3.1 ทดสอบหั่นหน่อไม้ 3 ชนิด ๆ ละ 10 ครั้ง ๆ ละ 1 กิโลกรัม

3.3.2 การนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล เสนอเป็นการสรุปผลการทดสอบการหั่นหน่อไม้สด 3 ชนิด

3.3.3 นำมาเปรียบเทียบกับโครงงานออกแบบและสร้างเครื่องหั่นหน่อไม้ตองแบบเส้นและแบบแผ่น [1]

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การทดสอบเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น

สำหรับการทดสอบเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นที่ออกแบบนั้น จะใช้ความเร็วรอบที่ 800 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบเดียวกันกับเครื่องหั่นหน่อไม้ตองแบบเส้นและแบบแผ่นที่ต้องการเปรียบเทียบ เพื่อควบคุมปัจจัยตัวแปรของความเร็วรอบให้ไม่แตกต่างกัน โดยความหนาของหน่อไม้สดแบบแผ่นที่ต้องการคือ 3 มิลลิเมตร จากผลการทดลองหั่นหน่อไม้ 10 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นเบื้องต้น

ครั้งที่ทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
ความหนาของ ชิ้นหน่อไม้ (มม.)	2.85	2.90	3.10	3.05	2.95	3.15	2.85	3.05	2.95	2.85	2.97

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบการใช้งานของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นเบื้องต้น พบว่าสามารถหั่นชิ้นหน่อไม้ได้ความหนาโดยเฉลี่ย 2.97 มิลลิเมตร โดยผลแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ขนาดชิ้นหน่อไม้สด

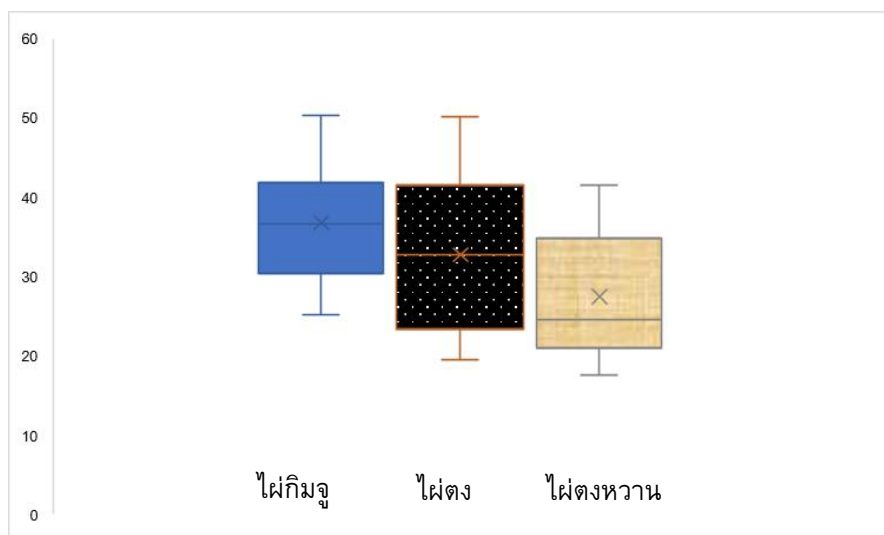
4.2 การทดสอบหาเวลาในการหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น

ทำการทดสอบหั่นหน่อไม้ไผ่ตง หน่อไม้ไผ่กิมจู และหน่อไม้ไผ่ตงหวานเพื่อหาเวลาในการหั่น ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง ครั้งละ 1 กิโลกรัม (หน่วยเป็นวินาทีต่อกิโลกรัม) โดยทำการจับเวลาเพื่อหาเวลาเฉลี่ย โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเวลาในการหั่นหน่อไม้ไผ่ตง หน่อไม้ไผ่กิมจู และหน่อไม้ไผ่ตงหวาน (หน่วยเป็นวินาทีต่อกิโลกรัม)

ครั้งที่ ชนิด หน่อไม้	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เวลาเฉลี่ย (วินาที/ กิโลกรัม)
หน่อไม้ ไผ่กิมจู	43.33	26.83	41.37	50.27	35.44	36.13	40.12	25.16	31.53	37.14	36.73
หน่อไม้ ไผ่ตง	50.16	31.65	25.22	45.40	19.53	22.53	35.31	33.76	40.17	23.68	32.74
หน่อไม้ ไผ่ตงหวาน	21.30	21.19	41.52	37.02	17.53	25.71	32.56	23.51	34.04	20.38	27.48
เวลาเฉลี่ยรวม 3 ชนิด											32.32

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบหั่นหน่อไม้ไผ่ตง หน่อไม้ไผ่กิมจู และหน่อไม้ไผ่ตงหวานจำนวน 10 ครั้งเรียงลำดับเวลาเฉลี่ยจากน้อยไปมาก หน่อไม้ไผ่ตงหวาน 27.48 วินาทีต่อกิโลกรัม หน่อไม้ไผ่ตง 32.74 วินาทีต่อกิโลกรัม หน่อไม้ไผ่กิมจู 36.73 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลาเฉลี่ยของเครื่องหั่นหน่อไม้ 32.32 วินาทีต่อกิโลกรัม



รูปที่ 11 กราฟ Box Plot เวลาในการหั่นหน่อไม้ 3 ชนิด

จากรูปที่ 11 จะพบว่าเวลาเฉลี่ยในการหันหน่อไม้ไผ่กิมจูมากที่สุด และหน่อไม้ไผ่ตงหวาน น้อยที่สุด ความแตกต่างของเวลาในการหันหน่อไม้ไผ่กิมจูแต่ละครั้งไม่ต่างกันมากนัก แต่การหันหน่อไม้ไผ่ตงมีเวลาแต่ละครั้งต่างกันมากที่สุด ไม่มีข้อมูลใดที่เป็น outlier

4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว [6]

สมมติฐาน ชนิดของหน่อไม้มีผลต่อเวลาในการหันหรือไม่

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_0$$

$H_1 : \mu_0 \neq 0$ อย่างน้อยที่สุด 1 กลุ่มที่ต่างจากกลุ่มอื่น ๆ

ทดสอบที่ 5% ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA)

SUMMARY						
Groups	Count	Sum	Average	Variance		
หน่อไม้ไผ่กิมจู	10	367.32	36.732	57.89115		
หน่อไม้ไผ่ตง	10	327.41	32.741	105.0169		
หน่อไม้ไผ่ตงหวาน	10	274.76	27.476	67.00398		
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	431.0728	2	215.5364	2.81242	0.077716	3.354131
Within Groups	2069.209	27	76.63736			
Total	2500.281	29				

จากตารางที่ 4 $F = 2.812 < F_{\text{critical}} = F_{0.05, 2, 12} = 3.354$ ดังนั้นผลสรุปการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ได้ จึงสรุปได้ว่า ชนิดของหน่อไม้ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการหันหน่อไม้จากเครื่องหันหน่อไม้สดแบบแผ่น

ดังนั้นจึงใช้เวลาเฉลี่ยของการทดลองของหน่อไม้ทั้ง 3 ชนิดเป็นตัวแทนของเครื่องหันหน่อไม้สดแบบแผ่นได้ คือ 32.32 วินาทีต่อกิโลกรัม

4.4 ประสิทธิภาพเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบเส้นและแบบแผ่น จากผลการทดลองหั่นหน่อไม้แบบแผ่นที่ความเร็วรอบใบมีด 800 รอบต่อนาที ได้เวลาเฉลี่ย 25.31 นาทีต่อหน่อไม้ 10 กิโลกรัม [1] ซึ่งหน่อไม้ 1 กิโลกรัม ใช้เวลาเฉลี่ย 151.8 วินาทีต่อกิโลกรัม แต่เวลาตัวแทนของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นที่ได้พัฒนาสร้างขึ้นคือ 32.32 วินาทีต่อกิโลกรัม

ซึ่งสรุปได้ว่าเครื่องหั่นหน่อไม้ที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการหั่นหน่อไม้ไม่น้อยกว่า 119.48 วินาทีต่อกิโลกรัม คิดเป็นประสิทธิภาพที่ดีขึ้นร้อยละ 78.71

5. สรุปผลการวิจัย

จากการที่ได้ออกแบบและสร้างเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น สามารถนำข้อมูลการสร้างเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น และผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบและสร้างเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น การควบคุมความเร็วรอบในการหั่นหน่อไม้ที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที สามารถหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นได้ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร

2) การทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาของเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่น

2.1) ทดลองการหั่นหน่อไม้ไผ่กิมจู ได้เวลาเฉลี่ย 36.73 วินาทีต่อกิโลกรัม หน่อไม้ไผ่ตง ได้เวลาเฉลี่ย 32.74 วินาทีต่อกิโลกรัม หน่อไม้ไผ่ตงหวาน ได้เวลาเฉลี่ย 27.48 วินาทีต่อกิโลกรัม และเวลาเฉลี่ยของเครื่องหั่นหน่อไม้ ได้เวลา 32.32 วินาทีต่อกิโลกรัม

2.2) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-Way ANOVA) ผลว่า ชนิดของหน่อไม้ไม่มีผลต่อเวลาในการหั่น

2.3) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผลการทดลองเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบเส้นและแบบแผ่นที่ความเร็วรอบใบมีด 800 รอบต่อนาที ได้เวลาเฉลี่ย 25.31 นาทีต่อ 10 กิโลกรัม ซึ่งใช้เวลาเฉลี่ย 151.8 วินาทีต่อกิโลกรัม กับเครื่องหั่นหน่อไม้สดแบบแผ่นได้เวลาเฉลี่ย 32.32 วินาทีต่อกิโลกรัม ซึ่งพบว่าใช้เวลาน้อยลง 119.48 วินาที คิดเป็นประสิทธิภาพที่ดีขึ้นร้อยละ 78.71

6. อภิปรายผล

จากงานวิจัยดังกล่าวสามารถอภิปรายผลเพื่อนำไปสู่การพัฒนางานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1) ค่าความแตกต่างของเวลาในการหั่นหน่อไม้แต่ละครั้งแต่ละชนิดสูงมาก จนอาจทำให้ไม่สามารถบอกความแตกต่างจากผลที่วัดได้จากการทดสอบกับชนิดของหน่อไม้ที่แตกต่างกันเลย อาจเป็นเพราะอัตราการป้อนเข้าของหน่อไม้ในการหั่นที่ต่างกัน ซึ่งเกิดจากการป้อนเข้าด้วยแรงคนในแรงกดเข้าที่อาจแตกต่างกัน

2) จากการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยพบว่าชนิดของหน่อไม้ไม่ใช่สิ่งที่ส่งผลต่อความเร็วในการตัด ซึ่งประเด็นที่น่าสนใจที่อาจจะมีแนวโน้มว่ามีผลต่อเวลาในการตัดคือ ขนาดของหน่อไม้ที่ป้อนเข้า และอัตราการป้อนเข้า เพราะเป็นปัจจัยที่แตกต่างกันในการทดลองแต่ละครั้ง ไม่ใช่ปัจจัยคงที่

3) ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการหั่นกรณีที่ต้องการความหนาของหน่อไม้ขนาดแตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมหน่วยงานต้นสังกัดของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

References

- [1] Inseemeeesak B. and Lertkowit P. Design and fabrication of a strip and slice pickled bamboo shoot slicing machine. 5(2): 24-35. SAU Journal of Science & Technology; 2019. (In Thai)
- [2] Bunthot C. et al. Development and technology transfer of bamboo shoots slicing machine for food processing, pp. 664-670. Engineering, Science, Technology and Architecture Conference, ESTA CON; 2016. (In Thai)
- [3] Pratumsuwan P. Electronic control mechatronics and electric. Bangkok: Reankaew Printing; 1997. (In Thai)
- [4] Ungbhakorn V. and Thanadngarn C. Mechanical design. Bangkok: Se-education; 2013. (In Thai)
- [5] Spring Green Evolution. Stainless steel. [Internet]. 2019 [cited 2020 September 25]. Available from: <http://www.sgethai.com/article> (In Thai)
- [6] Choomrit N. Engineering statistics. Bangkok: Se-education; 2013. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



อาจารย์ สุวิมล เจียรธรวานิช ปัจจุบันเป็น รองคณบดีฝ่ายวิชาการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาการวัดและประเมินผลการศึกษา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ที่อยู่ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120 หมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร 02 287 9600 ต่อ 7567 E-Mail: Suwimol.J@mail.rmutk.ac.th งานวิจัยที่สนใจ คือ การควบคุมคุณภาพ การผลิต การปรับปรุงกระบวนการผลิต เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม และงานวิจัยเชิงสำรวจ

Article History:

Received: May 20, 2021

Revised: December 14, 2021

Accepted: December 17, 2021

ผลกระทบมาตรการความปลอดภัยต่อผลิตภาพแรงงาน
ในกิจกรรมฝ้าเพดาน
**IMPACT OF SAFETY MEASURE ON LABOR PRODUCTIVITY
IN CEILING ACTIVITIES**

สุนันท์ มนต์แก้ว

อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร, sunun.m@rmutp.ac.th

Sunun Monkaew

Lecturer, Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamanagala University of Technology Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Rd, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok 10800, Thailand, sunun.m@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการผลิตภาพแรงงานเนื่องจากการนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน โดยเลือกกรณีศึกษานิตตังฝ้าเพดานของอาคารที่พักอาศัย 4 ชั้น 42 ห้อง แห่งหนึ่งในเขตกรุงเทพมหานคร มาตรการความปลอดภัยสำหรับงานติดตั้งฝ้าเพดานที่นำมาใช้ประกอบด้วย (1) นั่งร้านมีความแข็งแรง (2) ทางเดินบนนั่งร้าน สะอาด และไม่ลื่น (3) คนงานสวมใส่หมวกนิรภัย รองเท้านิรภัย (4) มีผู้รับผิดชอบนั่งร้าน และ (5) เอกสารการอนุญาตให้ใช้นั่งร้าน ผลการศึกษาพบว่า ผลิตภาพแรงงานก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้มีค่าเฉลี่ย 1.85 ตร.ม./คน/ชม. หลังจากนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้มีค่าเฉลี่ย 1.66 ตร.ม./คน/ชม. ค่าผลิตภาพแรงงานลดลงประมาณ 10.27 % ใช้เวลาในการทำงานเพิ่มขึ้นประมาณ 5.35 % และค่าแรงงานเพิ่มขึ้นประมาณ 10.26 %

คำสำคัญ: ปัจจัย, ผลิตภาพ, ฝ้าเพดาน, มาตรการความปลอดภัย, ค่าใช้จ่าย

ABSTRACT

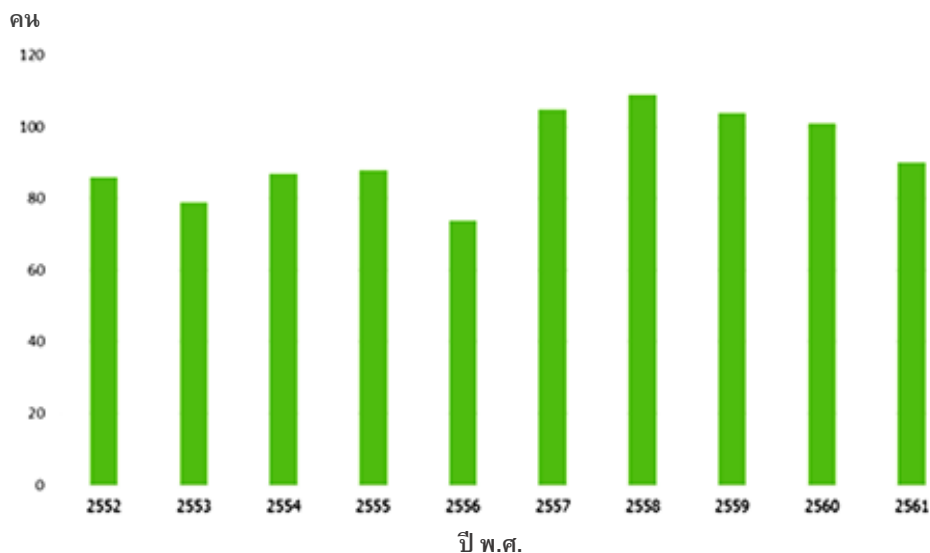
The purpose of this research is to study the impact of safety measure on labor productivity in ceiling activity by studying 4 – story 42 units residential buildings in Bangkok. The safety system composed of (1) stable scaffolding system, (2) providing clean and not slip walkways

on the scaffold, (3) providing personal protective equipment for workers, (4) responsible for scaffolding and (5) scaffolding permit document. Productivity rates for prior and after the used of safety measure are 1.85 and 1.66 m² /person/hr., respectively. The productivity declines for approximately 10.27 %, the working time for ceiling could take longer for 5.35 % and labor cost could increase for 10.26 %.

KEYWORDS: Factor, Productivity, Ceiling, Safety Measure, Cost

1. บทนำ

สำนักงานกองทุนเงินทดแทน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน ได้รายงานสถิติการประสบอันตรายหรือเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงานในงานก่อสร้าง 10 ปีย้อนหลัง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 – 2561 พบว่า กิจกรรมงานก่อสร้าง มีผู้ประสบอันตรายที่ระดับความรุนแรงถึงขั้นเสียชีวิตอยู่ในเกณฑ์ที่สูงมาก ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการตกจากที่สูง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สถิติการเสียชีวิตเนื่องจากอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง [1]

โครงการก่อสร้างที่ให้ความสำคัญกับความปลอดภัย ควรมีการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การฝึกอบรม การกำหนดมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน การจัดทำโปรแกรมและประเมินความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งการปฏิบัติตามความปลอดภัยจะช่วยลดการเกิดอุบัติเหตุ ลดระดับความรุนแรง และทำให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุบัติเหตุลดลง [2] อย่างไรก็ตามการนำมาตรการความ

ปลอดภัยมาใช้ในโครงการก่อสร้าง อาจจะส่งผลกระทบทำให้ผลผลิตภาพแรงงานลดลงในเบื้องต้น เนื่องจากคนงานไม่มีความคุ้นเคย

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบทำให้ผลผลิตภาพแรงงานในงานก่อสร้างลดลง เกิดจากหลายปัจจัย เช่น แรงงานขาดทักษะ ขาดการประสานงานจากฝ่ายออกแบบ ขาดการควบคุมแรงงาน การทำงานล่วงเวลา [3] เทคนิคและเทคโนโลยีในการก่อสร้างที่ไม่เหมาะสม การแก้ไขเปลี่ยนแปลงงาน [4] แบบก่อสร้างมีข้อกำหนดที่ไม่ชัดเจน การเปลี่ยนแปลงงานส่งผลให้มีความเพิ่มลดมาก ความล่าช้าในการตอบเอกสาร [5] การจ่ายเงินให้ร้านขายวัสดุชำ การขาดแคลนวัสดุก่อสร้าง การรอคอยวัสดุ [6] การจัดการสถานที่ก่อสร้างไม่ดี ความไม่สงบทางการเมือง วัสดุไม่มีจำหน่ายในพื้นที่โครงการก่อสร้าง [7] ผู้บริหารขาดความไว้วางใจและเชื่อมั่นจากคนงาน [8] ขาดการสื่อสาร การสั่งหยุดงานจากที่ปรึกษาโครงการ ประสิทธิภาพของผู้ควบคุมงาน [9] แรงจูงใจในการทำงาน ขาดแคลนช่างฝีมือ ขาดการประชุมเพื่อวางแผนการทำงาน [10] การออกแบบที่ผิดพลาด การกำหนดรายละเอียดไม่ชัดเจน คำสั่งแก้ไขเปลี่ยนแปลงงานจากเจ้าของโครงการ [11] ขาดแคลนเครื่องจักร – เครื่องมือ [12] สภาพภูมิอากาศ เครื่องจักรเสีย [13] ความล่าช้าในการจ่ายเงินงวดจากเจ้าของโครงการ ไม่นำแผนงานมาใช้ประโยชน์ [14] ความง่ายในการลำเลียงวัสดุ [15] ความยากง่ายและระยะทางในการขนส่งวัสดุ [16] การออกแบบที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน [17] กิจกรรมงานก่อนหน้าขาดคุณภาพ [18-19] จำนวนของผู้รับเหมาช่วง [20] เป็นต้น ผลกระทบเนื่องจากการนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงานก่อสร้างมีการศึกษาไว้ค่อนข้างน้อยยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก

งานผ้าเปดานภายในอาคารเป็นอีกกิจกรรมงานหนึ่งในหลายๆ กิจกรรมงานก่อสร้างที่ต้องทำบนที่สูงเกิน 2.00 เมตร ซึ่งตามกฎหมายกระทรวงแรงงาน เรื่อง กำหนดมาตรฐานในการบริหารและจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน เกี่ยวกับงานก่อสร้าง พ.ศ.2551 กำหนดให้มีมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน ในความเป็นจริงกลับพบว่า โครงการก่อสร้างส่วนใหญ่ไม่ได้ดำเนินการจัดทำมาตรการความปลอดภัยในการทำงานดีเท่าที่ควร ส่งผลให้สถิติการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างยังคงสูงอยู่ โดยเฉพาะอุบัติเหตุเนื่องจากการตกจากที่สูง สาเหตุที่โครงการก่อสร้างส่วนใหญ่ไม่ได้ดำเนินการจัดทำมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน อาจจะเกิดจากปัจจัยหลายๆ ด้าน เช่น ขาดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน ขาดแคลนบุคลากรทางด้านความปลอดภัย ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น [21] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาว่าหากนำมาตรการความปลอดภัยในการทำงานมาใช้ในโครงการก่อสร้างจะส่งผลกระทบต่อผลผลิตภาพแรงงาน และส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอย่างไรบ้าง โดยเลือกกิจกรรมงานติดตั้งผ้าเปดานภายในอาคารเป็นกรณีศึกษา เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวางแผนงาน การประมาณราคาค่าแรงงาน และการบริหารจัดการเรื่องความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้างสำหรับโครงการก่อสร้างในอนาคต

2. ขั้นตอนในการทำงานติดตั้งผ้าเพดาน

ขั้นตอนในการทำงานติดตั้งผ้าเพดาน มีดังนี้ (1) ตรวจสอบระดับผ้าเพดานและกำหนดระดับผ้าเพดานที่ผนังห้อง (2) ยึดโครงเคร่าผ้าที่ริมผนังห้องให้ครบทุกด้าน (3) ยึดฉากชุดปรับระดับตามตำแหน่งที่กำหนด (4) แขนวลวดปรับระดับ (5) แขนวโครงเคร่าผ้าเข้ากับลวดปรับระดับ (6) ต่อโครงเคร่าผ้าเข้าด้วยกัน (7) ยึดโครงเคร่าตัวล่างเข้ากับโครงเคร่าตัวบนด้วยขอยึดโครง (8) ตรวจสอบระดับของโครงเคร่าผ้า (9) ยึดแผ่นยิปซัมบอร์ดเข้ากับโครงเคร่าผ้า และ (10) ฉาบปิดรอยต่อแผ่นยิปซัมบอร์ดและหัวสกรูและทำความสะอาด ตามลำดับ ในการทำงานติดตั้งผ้าเพดานทั้ง 10 ขั้นตอน มีความเสี่ยงและมีโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายหากไม่มีมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน

3. ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

3.1 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างของช่างผ้าเพดานที่ศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มีอายุระหว่าง 35 - 45 ปี เพศชาย มีประสบการณ์ในการทำงานระหว่าง 10 - 14 ปี ระดับทักษะฝีมือแรงงานตามประกาศคณะกรรมการส่งเสริมการพัฒนาฝีมือแรงงาน พ.ศ. 2552 เรื่อง มาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติ อาชีพช่างก่อสร้าง สาขาช่างติดตั้งยิปซัมระดับ 3 หมายถึง ช่างที่มีความรู้ ความสามารถสูง และมีความเชี่ยวชาญขั้นวินิจฉัยได้ ตัดสินใจแก้ปัญหา ให้คำปรึกษาช่วยเหลือแก่ผู้ร่วมงาน ประยุกต์ใช้ความรู้ความสามารถกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้

โครงการที่ศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีช่างผ้าเพดานที่ทำงานในโครงการทั้งหมด 6 คน ทุกคนมีระดับทักษะ ระดับ 3 และคนงานทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยอีก 3 คน รวมเป็น 9 คน ในการทำงานแต่ละวันหัวหน้าผู้ควบคุมงานจะจัดช่างผ้าเพดานออกเป็น 3 กลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบด้วย ช่างผ้าเพดาน 2 คน และคนงาน 1 คน โดยแบ่งการทำงานแต่ละห้องเมื่อทำงานแล้วเสร็จก็จะย้ายไปทำยังห้องอื่นต่อไป ในการเก็บข้อมูลก่อนและหลังการนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน จะใช้ช่างกลุ่มเดียวกันตลอดเวลาที่เก็บข้อมูล

3.2 การเก็บข้อมูล

ผู้วิจัยลงพื้นที่เก็บข้อมูลปฐมภูมิ โดยวัดปริมาณงานติดตั้งผ้าเพดานภายในอาคารที่ทำได้ในแต่ละวันต่อจำนวนช่าง บันทึกลงในตารางการทำงาน ซึ่งข้อมูลที่ได้ประกอบด้วยจำนวนคนงาน สภาพภูมิอากาศ สาเหตุการหยุดงาน คุณภาพของงานที่ได้และปริมาณงานที่ทำได้ในแต่ละวัน ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อผลิตภาพแรงงานทั้งนั้น เช่น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภาพแรงงานต่ำลง หรือทักษะฝีมือแรงงาน [14, 22] เป็นต้น เพื่อความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

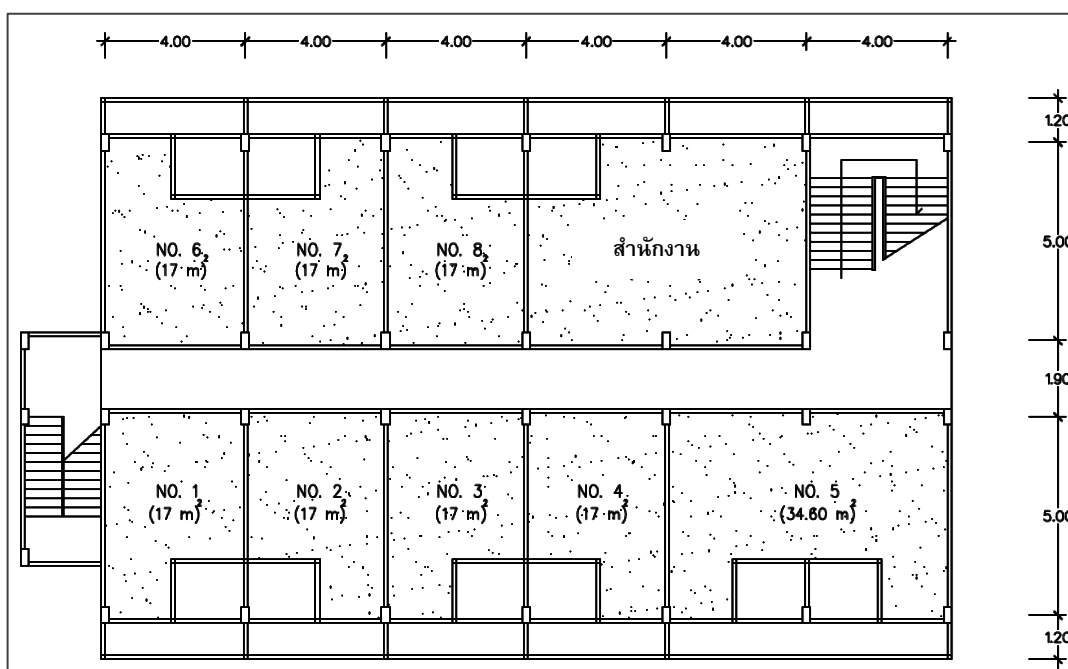
ของข้อมูล จำนวนช่างที่ถูกประเมินเพื่อเก็บข้อมูลในแต่ละครั้งจะต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 [23] ตามหัวข้อ 3.1 มีจำนวนช่างฝ้าเพดานและผู้ช่วยช่างที่ทำงานในโครงการนี้ทั้งหมด 9 คน จะใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูลทั้งหมด คิดเป็นร้อยละ 100 ช่วงระยะเวลาในการเก็บข้อมูลอยู่ในช่วงเดือน พฤศจิกายน – มกราคม 2562 ซึ่งอุณหภูมิในการทำงานแต่ละวันจะอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน และบันทึกข้อมูลโดยกล้องวีดีโอเพื่อช่วยในการตรวจสอบข้อมูลต่าง ๆ ในภายหลัง งานวิจัยในครั้งนี้เก็บข้อมูลค่าผลิตภาพแรงงาน 2 กรณี คือ (1) ผลิตภาพแรงงานก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน และ (2) ผลิตภาพแรงงานหลังจากนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน

4. รายละเอียดของสถานที่เก็บข้อมูล

4.1 ฝ้าเพดานที่ศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นงานฝ้าเพดานภายในอาคาร วัสดุเป็นฝ้ายิปซัมบอร์ดหนา 9 มิลลิเมตร ฉาบเรียบ ลดระดับฝ้าเป็นหลุม โครงเคร่าเหล็กชุบสังกะสีระยะห่าง 0.40×0.60 เมตร ความสูงจากระดับพื้นห้องถึงระดับฝ้าเพดานประมาณ 2.80 เมตร ยกเว้นห้องสำนักงาน สูงประมาณ 3.20 เมตร (ห้องสำนักงาน จะไม่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้) ดังรูปที่ 2

4.2 สถานที่เก็บข้อมูลก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในโครงการ เริ่มจากคณงานขนย้ายวัสดุสำหรับงานติดตั้งฝ้าเพดานไปยังตำแหน่งที่จะติดตั้ง โดยเริ่มติดตั้งชั้นที่ 1 ของอาคาร จำนวน 5 ห้อง คือ No.1, No.2, No.3, No.4 และ No.5 หลังจากติดตั้งชั้นที่ 1 เสร็จก็จะย้ายขึ้นไปติดตั้งที่ชั้นที่ 2 จำนวน 5 ห้อง คือ No.10, No.11, No.12, No.13 และ No.14 หลังจากติดตั้งชั้นที่ 2 เสร็จก็จะย้ายขึ้นไปติดตั้งที่ชั้นที่ 3 จำนวน 5 ห้อง คือ No.21, No.22, No.23, No.24 และ No.25 หลังจากติดตั้งชั้นที่ 3 เสร็จก็จะย้ายขึ้นไปติดตั้งที่ชั้นที่ 4 จำนวน 5 ห้อง คือ No.32, No.33, No.34, No.35 และ No.36 รายละเอียดดังรูปที่ 2

4.3 สถานที่เก็บข้อมูลหลังจากนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในโครงการ เริ่มจากคณงานขนย้ายวัสดุสำหรับงานติดตั้งฝ้าเพดานไปยังตำแหน่งที่จะติดตั้ง โดยเริ่มติดตั้งชั้นที่ 1 ของอาคาร จำนวน 3 ห้อง คือ No.6, No.7 และ No.8 หลังจากติดตั้งชั้นที่ 1 เสร็จก็จะย้ายขึ้นไปติดตั้งที่ชั้นที่ 2 จำนวน 6 ห้อง คือ No.15, No.16, No.17, No.18, No.19 และ No.20 หลังจากติดตั้งชั้นที่ 2 เสร็จก็จะย้ายขึ้นไปติดตั้งที่ชั้นที่ 3 จำนวน 5 ห้อง คือ No.27, No.28, No.29, No.30 และ No.31 หลังจากติดตั้งชั้นที่ 3 เสร็จก็จะย้ายขึ้นไปติดตั้งที่ชั้นที่ 4 จำนวน 6 ห้อง คือ No.37, No.38, No.39, No.40, No.41 และ No.42 รายละเอียดดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนการติดตั้งฝ้าเพดานบางส่วนที่ศึกษา

5. มาตรการความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งฝ้าเพดาน

จากการศึกษากฎหมายและมาตรฐานความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้าง พบว่า กระทรวงแรงงาน ออกกฎกระทรวงแรงงาน เรื่องการกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับงานก่อสร้าง พ.ศ. 2551 ซึ่งเป็นกฎหมายที่บังคับใช้กับงานก่อสร้างโดยตรง มีสาระสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานติดตั้งฝ้าเพดาน 1 เรื่อง คือ (1) การทำงานในสถานที่ที่มีอันตรายจากการตกจากที่สูง การพังทลาย และกระเด็นหรือตกหล่นของวัสดุ และกฎกระทรวง เรื่องกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับนั่งร้านและค้ำยัน พ.ศ. 2564

การทำงานติดตั้งฝ้าเพดานก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน ผู้รับเหมาใช้นั่งร้านชนิดม้ายืนในการทำงาน ดังรูปที่ 3 มาใช้ในการทำงาน ถึงแม้ความสูงจากระดับพื้นอาคารถึงระดับพื้นของนั่งร้านชนิดม้ายืนจะน้อยกว่า 2.00 เมตร แต่ยังมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดอุบัติเหตุเกิดขึ้นได้ ผู้วิจัยจึงออกแบบมาตรการความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งฝ้าเพดานมาใช้กับงานวิจัยในครั้งนี้ ได้ดังนี้ (1) เปลี่ยนนั่งร้านชนิดม้ายืนเป็นนั่งร้านเหล็ก (2) ทางเดินบนนั่งร้าน สะอาด และไม่ลื่น (3) คนงานสวมใส่สวมหมวกนิรภัย รองเท้านิรภัย (4) แต่งตั้งผู้รับผิดชอบนั่งร้าน [16] และ (5) มีเอกสารการอนุญาตให้ใช้นั่งร้าน รายละเอียดดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 สภาพแวดล้อมในการทำงานก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้



รูปที่ 4 มาตรการความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งฝ้าเพดาน

6. ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับมาตรการความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งฝ้าเพดาน

ราคาวัสดุที่นำมาประมาณการค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับมาตรการความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งฝ้าเพดาน จะคิดค่าเสื่อมราคาของวัสดุ โดยใช้วิธีการคิดค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง [24] โดยยึดหลักของการปันส่วนมูลค่าของสินทรัพย์ออกเป็นค่าเสื่อมราคาที่เหมาะสมในแต่ละปีตลอดอายุการใช้งาน ดังสมการที่ 1

$$\text{ค่าเสื่อมราคา (Dn)} = (I-S)/N \quad (1)$$

โดยที่ Dn = ค่าเสื่อมราคาจ่ายต่อปีทีก

I = ต้นทุนของสินทรัพย์

S = มูลค่าซากเมื่อปีสุดท้ายของอายุการใช้งาน

N = อายุการใช้งาน

จากการประเมินการทำงานติดตั้งผ้าเพดาน ก่อนที่จะนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในโครงการ ดังรูปที่ 3 พบว่า (1) ผู้รับเหมาใช้นั่งร้านชนิดม้ายืนมาใช้ในการทำงาน 1 ชุดต่อห้อง เมื่อทำงานติดตั้งผ้าเพดานแล้วเสร็จก็จะทำการย้ายนั่งร้านไปทำงานห้องอื่นต่อไป ค่าแรงเคลื่อนย้ายนั่งร้านคิดแบบเหมาจ่ายต่อจำนวนห้อง (1 ห้องต่อครั้ง) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์ในการทำงานก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์ในการทำงานก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้

	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ราคาต่อหน่วย			ราคา รวม
				ค่าวัสดุ	ค่าแรง	รวม	
1	ค่านั่งร้าน	3	ชุด	420	125	545	1,635
2	ค่าเคลื่อนย้ายนั่งร้าน	20	ครั้ง	-	30	600	600
รวม 1 - 2							2,235

ผู้วิจัยได้ปรับปรุงสถานที่ทำงานติดตั้งผ้าเพดานให้มีความปลอดภัย เป็นไปตามที่กฎหมายและมาตรฐานความปลอดภัยในการทำงานกำหนด รายละเอียดดังข้อ 5 และรูปที่ 4 โดยดำเนินการดังนี้ (1) เปลี่ยนนั่งร้านชนิดม้ายืนเป็นนั่งร้านเหล็ก 1 ชุดต่อห้อง (2) ติดตั้งทางเดินเหล็ก 2 ชุดต่อห้อง (3) ค่าติดตั้ง รื้อถอน เคลื่อนย้ายนั่งร้าน จำนวน 20 ครั้ง (4) จัดซื้อหมวกนิรภัยให้คนงาน 9 คน คิดค่าเสื่อมราคาของวัสดุ ดังนี้ (1) นั่งร้านเหล็ก ราคา 1,800 บาทต่อชุด อายุการใช้งาน 5 ปี มูลค่าซาก 100 บาท ใช้งานมาแล้ว 3 ปี มูลค่าปัจจุบัน 780 บาท (2) ทางเดินเหล็ก ราคา 800 บาทต่อชุด อายุการใช้งาน 5 ปี มูลค่าซาก 70 บาท ใช้งานมาแล้ว 3 ปี มูลค่าปัจจุบัน 362 บาท ผลการศึกษา พบว่า ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับมาตรการความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งผ้าเพดานภายในอาคาร มีค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนเงิน 6,592 บาท ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากเดิม 4,357 บาท รายละเอียด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับมาตรการความปลอดภัยในการทำงานติดตั้งผ้าเพดาน

No	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ราคาต่อหน่วย			ราคารวม
				ค่าวัสดุ	ค่าแรง	รวม	
1	ค่านั่งร้าน	3	ชุด	780	-	780	2,340
2	ทางเดินเหล็ก	6	ชุด	362	-	362	2,172
3	ค่าติดตั้ง/รื้อถอน นั่งร้าน	20	ครั้ง	-	50	50	1,000
4	หมวกนิรภัย	9	ชุด	120	-	120	1,080
รวม 1 - 4							6,592

จากการสอบถาม คนงาน ผู้ควบคุมงาน เกี่ยวกับการเกิดอุบัติเหตุในการทำงาน พบว่า ในการทำงานติดตั้งผ้าเพดาน เกิดอุบัติเหตุขึ้นบ่อย แต่ระดับความรุนแรงไม่มากนัก ไม่ถึงขั้นต้องหยุดพักงาน จากการเก็บข้อมูลก่อนนำมามาตรการความปลอดภัยมาใช้เกิดอุบัติเหตุขึ้น 3 ครั้ง ดังตารางที่ 3 สาเหตุเกิดจากการตกจากนั่งร้านและวัสดุหล่นใส่ หลังจากนำมามาตรการความปลอดภัยมาใช้ในโครงการ พบว่า ไม่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้น

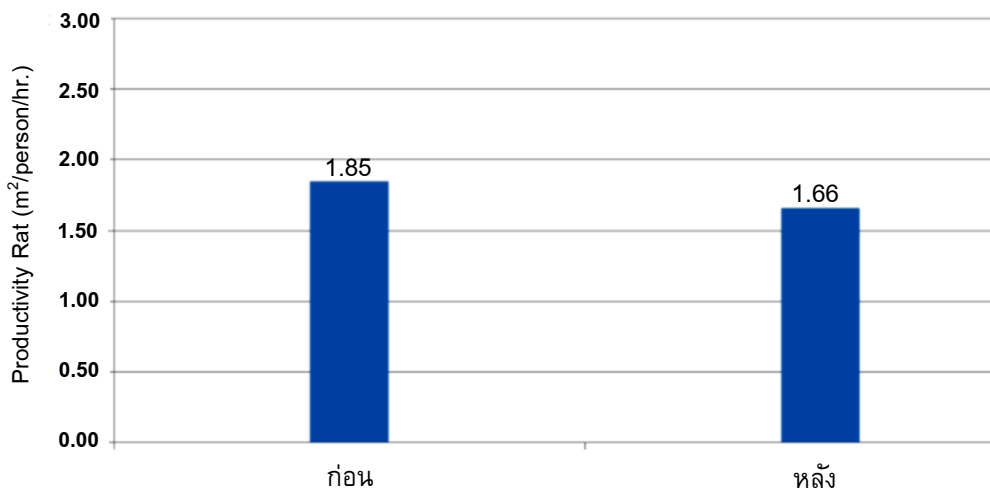
7. ผลการศึกษา

ในการทำงานติดตั้งผ้าเพดานภายในอาคาร ผู้รับเหมาแบ่งชุดช่างผ้าเพดานทำงานประจำแต่ละห้อง ประกอบด้วยช่างผ้าเพดาน จำนวน 2 คน คนงาน จำนวน 1 คน ในการทำงาน 1 วันใช้เวลาทำงาน 8 ชั่วโมงหรือ 480 นาที เริ่มจากติดตั้งผ้าเพดานก่อนนำมามาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน ตามหัวข้อที่ 4.1 ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณงานที่ทำได้ 17.90 ตารางเมตร ใช้เวลาในการทำงานเฉลี่ยประมาณ 193.80 นาที (รวมเวลาในการติดตั้งและเคลื่อนย้ายนั่งร้าน) ผลิตภาพแรงงานเฉลี่ยประมาณ 1.85 ตารางเมตร/คน/ชั่วโมง ความล่าช้าในการทำงานเกิดจากการรอคอยวัสดุทำให้สูญเสียเวลาในการทำงานเฉลี่ยประมาณ 31.50 นาที และเกิดอุบัติเหตุขึ้น 3 ครั้ง สูญเสียเวลาในการทำงานประมาณ 23.67 นาที รายละเอียด ดังตารางที่ 3

หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพื้นที่ในการทำงาน โดยจัดทำมาตรการความปลอดภัยในการทำงานตามหัวข้อที่ 5 และใช้ช่างผ้าเพดานชุดเดียวกันในการทำงาน ผลการศึกษา พบว่า ผลิตภาพแรงงานหลังจากนำมามาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน ปริมาณงานที่ทำได้ 17.00 ตารางเมตร ใช้เวลาในการทำงานเฉลี่ยประมาณ 204.75 นาที (รวมเวลาในการติดตั้งและเคลื่อนย้ายนั่งร้าน) ผลิตภาพแรงงานเฉลี่ยประมาณ 1.66 ตารางเมตร/คน/ชั่วโมง ความล่าช้าใน

การทำงานเกิดจากการรอคอยวัสดุทำให้สูญเสียเวลาในการทำงานเฉลี่ยประมาณ 35.75 นาที รายละเอียด ดังตารางที่ 4

เปรียบเทียบผลิภาพแรงงานก่อนและหลังจากนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ พบว่าหลังจากนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงาน ผลิภาพแรงงานลดลงประมาณร้อยละ 10.27 และใช้เวลาในการทำงานเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5.35 ซึ่งเวลาในการทำงานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากใช้เวลาในจัดทำมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน เช่น การติดตั้ง รื้อถอน นั่งร้าน ดังตารางที่ 5 และรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลิภาพแรงงานก่อนและหลังจากนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้

ตารางที่ 3 ผลิตภาพแรงงานของงานติดตั้งฝ้าเพดานก่อนนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในโครงการ

บริเวณที่ทำงาน	คนงาน (คน)	ปริมาณงานที่ทำได้ (ตร.ม.)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ผลิตภาพแรงงาน (ตร.ม./คน/ชม.)	สาเหตุของการหยุดงาน (นาที)			หมายเหตุ
					รอคอยวัสดุ	แก้ไขงาน	เกิดอุบัติเหตุ	
No.1	3	17	220	1.82	33	-	-	
No.2	3	17	200	1.91	22	-	-	
No.3	3	17	205	1.97	32	-	-	
No.4	3	17	216	1.85	32	-	-	
No.5	3	35	435	1.87	61	-	-	
No.10	3	17	230	1.90	31	20	-	
No.11	3	17	236	1.69	35	-	22	วัสดุหล่น
No.12	3	17	214	1.95	40	-	-	
No.13	3	17	218	1.81	30	-	-	
No.14	3	17	206	1.90	27	-	-	
No.21	3	17	212	1.97	39	-	-	
No.22	3	17	224	1.69	23	-	30	ตกนั่งร้าน
No.23	3	17	209	1.87	27	-	-	
No.24	3	17	216	1.73	20	-	-	
No.25	3	17	225	2.01	34	22	-	
No.32	3	17	221	1.78	30	-	-	
No.33	3	17	215	1.82	28	-	-	
No.34	3	17	209	1.88	28	-	-	
No.35	3	17	216	1.82	29	-	-	
No.36	3	17	221	1.77	29	-	19	วัสดุหล่น
รวม		358.00	3876.00	37.00	630.00	42	71	
ค่าเฉลี่ย		17.90	193.80	1.85	31.50	21	23.67	

ตารางที่ 4 ผลภาพแรงงานของงานติดตั้งฝ้าเพดานหลังจากนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในโครงการ

บริเวณที่ทำงาน	คนงาน (คน)	ปริมาณงานที่ทำได้ (ตร.ม.)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ผลภาพแรงงาน (ตร.ม./คน/ชม.)	สาเหตุของการหยุดงาน (นาที)			หมายเหตุ
					รอคอยวัสดุ	แก้ไขงาน	เกิดอุบัติเหตุ	
No.6	3	17	242	1.60	30	-	-	
No.7	3	17	236	1.67	33	-	-	
No.8	3	17	242	1.64	35	-	-	
No.15	3	17	241	1.67	38	-	-	
No.16	3	17	248	1.71	30	19	-	
No.17	3	17	251	1.62	41	-	-	
No.18	3	17	235	1.63	27	-	-	
No.19	3	17	239	1.65	33	-	-	
No.20	3	17	240	1.67	37	-	-	
No.27	3	17	232	1.70	32	-	-	
No.28	3	17	250	1.85	39	27	-	
No.29	3	17	235	1.72	37	-	-	
No.30	3	17	242	1.67	39	-	-	
No.31	3	17	247	1.65	41	-	-	
No.37	3	17	243	1.61	32	-	-	
No.38	3	17	250	1.55	30	-	-	
No.39	3	17	236	1.69	35	-	-	
No.40	3	17	240	1.68	38	-	-	
No.41	3	17	252	1.64	45	-	-	
No.42	3	17	255	1.60	43	-	-	
รวม		340	4856.00	33.25	715	46	-	
ค่าเฉลี่ย		17.00	204.75	1.66	35.75	23.00	-	

ตารางที่ 5 ผลิตภาพแรงงานก่อนและหลังจากนำมามาตรการความปลอดภัยมาใช้

รายละเอียด	ผลิตภาพแรงงาน (ตร.ม./คน/ชม.)	ค่าเฉลี่ยเวลาในการทำงาน (นาทึ)
ก่อนนำมามาตรการมาใช้	1.85	193.80
หลังกนำมามาตรการมาใช้	1.66	204.75
ผลต่าง	- 10.27 %	+ 5.35 %

จากผลกระทบดังกล่าวหากพิจารณาถึงค่าแรงงานที่เพิ่มขึ้น โดยประมาณการจากค่าแรงในการทำงานติดตั้งผ้าเพดาน ในการทำงานแต่ละวันใช้เวลาทำงานเท่ากับ 8 ชั่วโมง ชุดทำงานติดตั้งผ้าเพดาน ประกอบด้วย คนงาน 1 คน ค่าแรงงาน คนละ 300 บาท และช่างผ้าเพดาน 2 คน ค่าแรงงาน 420 บาท รวมค่าแรงงานเท่ากับ 1,140 บาท/8 ชั่วโมง หรือ 142.50 บาท/ ชั่วโมง ผลิตภาพแรงงานของงานติดตั้งผ้าเพดานก่อนนำมามาตรการความปลอดภัยในการทำงานมาใช้ในโครงการ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.85 ตารางเมตร/คน/ชั่วโมง ทำให้ค่าแรงงานมีค่าเท่ากับ 77.03 บาท/ตารางเมตร และผลิตภาพแรงงานของงานติดตั้งผ้าเพดานหลังกนำมามาตรการความปลอดภัยในการทำงานมาใช้ในโครงการ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.66 ตารางเมตร/คน/ชั่วโมง ทำให้ค่าแรงงานมีค่าเท่ากับ 85.84 บาท/ตารางเมตร ค่าแรงงานเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10.26 งานวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยด้านการเรียนรู้ (Learning curve) ที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจมีผลทำให้ผลิตภาพแรงงานที่ลดลงปรับเพิ่มขึ้นได้ รายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าแรงงานก่อนและหลังจากนำมามาตรการความปลอดภัยมาใช้

รายละเอียด	ผลิตภาพแรงงานเฉลี่ย (ตร.ม./คน/ชม.)	ค่าแรงงาน (บาท/ตร.ม.)
ก่อนนำมามาตรการมาใช้	1.85	77.03
หลังกนำมามาตรการมาใช้	1.66	85.84

ค่าแรงงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.26

8. สรุปผล

ก่อนนำมามาตรการความปลอดภัยในการทำงานมาใช้ในโครงการ การติดตั้งผ้าเพดาน 17.90 ตารางเมตร ใช้เวลาในการทำงานเฉลี่ยประมาณ 193.80 นาทึ ผลิตภาพแรงงานมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.85 ตารางเมตร /คน/ชั่วโมง หลังกนำมามาตรการความปลอดภัยในการทำงานมาใช้ในโครงการ

การติดตั้งผ้าเพดาน 17.00 ตารางเมตร ใช้เวลาในการทำงานเฉลี่ยประมาณ 204.75 นาที ผลผลิตภาพแรงงานมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.66 ตารางเมตร /คน/ชั่วโมง ผลผลิตภาพแรงงานลดลงประมาณร้อยละ 10.27 ใช้เวลาในการทำงานเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5.35 และค่าแรงงานเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10.26 การนำมามาตรการความปลอดภัยในการทำงานมาใช้ในโครงการส่งผลให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เลือกศึกษากิจกรรมงานติดตั้งผ้าเพดานภายในอาคารเพียงกิจกรรมเดียว เมื่อนำมาตรการความปลอดภัยมาใช้ในการทำงานสามารถลดอุบัติเหตุในการทำงานลงได้ ดังนั้นผู้รับเหมาควรให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในการทำงานเพื่อลดความสูญเสียต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้นรวมทั้งเป็นขวัญและแรงจูงใจในการทำงานให้กับคนงาน

9. ข้อเสนอแนะ

ลักษณะของผ้าเพดานที่ศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นผ้าลวดระดับทำให้ทำงานยากกว่าผ้าแบบเรียบที่ไม่มีการลวดระดับ ผู้สนใจที่จะนำข้อมูลผลผลิตภาพแรงงานจากงานวิจัยในครั้งนี้ไปใช้ควรพิจารณาเรื่องความยากง่ายในการทำงานและทักษะฝีมือแรงงานของช่างประกอบด้วย นอกจากนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายเนื่องจากการเกิดอุบัติเหตุในการทำงานเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการลงทุนด้านมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

References

- [1] Social Security Office. Occupational injury or illness statistics. [Internet]. 2021.[cited 2021 Nov 11] Available form [https:// www.sso.go.th/wpr/main/knowledge/statistics](https://www.sso.go.th/wpr/main/knowledge/statistics) of social security office category_list-label_1_169_0
- [2] Monkaew S, Nawalerspunya T. A development of safety assessment in construction of high rise building projects. Journal of Science & Technology Ubon Ratchathani University 2019;21(3):31-43. (In Thai)
- [3] Jarkas AM. Factors influencing labour productivity in Bahrain's construction industry. International Journal of Construction Management 2015; 15(1):94-108.
- [4] Ghoddousi P, Hosseini MR. A survey of the factors affecting the productivity construction projects in Iran. Journal Technological and Economic Development of Economy 2012;18(1):99-116.

- [5] Jarkas AM, Bitar CG. Factors affecting construction labor productivity in Kuwait. *Journal of Construction Engineering and Management* 2012;138(7):811-20.
- [6] Abdul Kadir MR, Lee WP, Jaafer MS, Supuan SM, Ali AAA. Factors affecting construction labour productivity for Malaysian residential projects. *Structural Survey* 2005; 23(1):42-54.
- [7] Alaghbari W, Al-Sakkaf A, Sulten B. Factors affecting construction labour productivity in Yemen. *International Journal of Construction Management* 2017;1(1):1-13.
- [8] Hiyassat MA, Hiyari MA, Sweis GJ. Factors affecting construction labour productivity: a case study of Jordan. *International Journal of Construction Management* 2016;16(2): 138-49.
- [9] Alinaitwe HM, Mwakali JA, Hansson B. Factors affecting construction the productivity of building craftsmen-studies of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management* 2007;13(3):169-76.
- [10] Thomas AV, Sudhakumar J. Critical analysis of the key factors affecting construction labour productivity – an indian perspective. *International Journal of Construction Management* 2013;13(4):103-25.
- [11] Jarkas AM, Al Balushi RA, Raveendranath PK. Determinants of construction labour production in Oman. *International Journal of Construction Management* 2015;15(4):332-44.
- [12] Kaming PF, Olomolaiye PO, Holt GD, Harris FC. Factors influencing craftsmen's productivity in Indonesia. *International Journal of Project Management* 1997;15(1):21-30.
- [13] Zakeri M, Olomolaiye PO, Holt GD, Harris FC. A survey of constraints on Iranian construction operatives' productivity. *Construction Management and Economics* 1996; 14(5):417-26.
- [14] Mahamid I. Principal factors impacting labor productivity of public construction projects in Palestine: contractors' perspective. *Journal of Architecture Engineering and Construction* 2013;2(3):194-202.
- [15] El-Gohary KM, Aziz RF. Factors influencing construction labor productivity in Egypt. *Journal of Management in Engineering* 2014;30(1):1-9.
- [16] Ungnaparat T. Impact on productivity in construction from increasing or decreasing in difficulty [thesis]. Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok; 2005. (In Thai)

- [17] Jantaragrad K. Impact of imperfect construction drawings & specifications on construction productivity for residential buildings [thesis]. Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok; 2007. (In Thai)
- [18] Monkaew S, Nawalerspunya T, Taemthong W. Effect of safety measures to construction productivity for wall plastering activity. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal 2015;8(1):79-91. (In Thai)
- [19] Monkaew S, Nawalerspunya T, Taemthong W. A productivity rate in concrete plastering of exterior brick wall. Journal of KMUTNB 2015;25(2):203-10. (In Thai)
- [20] Jarkas AM, Kadri CY, Younes JH. A survey of factors influencing the productivity of construction operatives in the state of Qatar. International Journal of Construction Management, 2012;12(3):1-23.
- [21] Monkaew S, Suksoom P. A study of cost of construction safety Measure for working at height. Proceedings of the 30th Thailand-driven research & innovation; 2020 May 30; Songkhla. p.1743 -73. (In Thai)
- [22] Oglesby CH, Parker HW, Howell GA. Productivity improvement in construction. USA: Mc Graw-Hill; 1989.
- [23] Jiradamkerng W. Productivity improvement in construction. Pathumthani: Wankawee publisher; 2003. (In Thai)
- [24] Apisithpinyo V. Engineering economy. Bangkok: Idea Software Technology; 2006. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนันท์ มนต์แก้ว สาขาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำเร็จ
การศึกษาระดับปริญญาโท สาขาการดำเนินงานก่อสร้าง สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ E- mail: sunun.m@rmutp.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ : การปรับปรุงผลิตภาพในงานก่อสร้าง BIM สำหรับงาน
ก่อสร้าง

Article History:

Received: May 14, 2020

Revised: December 14, 2021

Accepted: December 17, 2021

**การอบแห้งกล้วยหอมดิบด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
พร้อมระบบความร้อนเสริมควบคุมทางไกลผ่านสมาร์ทโฟน
BANANA CHIPS DRYING IN SOLAR GREENHOUSE
IN ASSOCIATION WITH SMARTPHONE-CONTROLLED HEAT SYSTEM**

ฤทธิ์รงค์ เสนาโนฤทธิ์¹ และ กมลวรรณ จิตจักร²

¹นักศึกษา, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,
senanoritoath@gmail.com

²อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,
Kamonwan_ji@rmutto.ac.th

Ritthirong Senanorit¹ and Kamonwan Jitjack²

¹Student, Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,
Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, senanoritoath@gmail.com

²Lecturer, Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,
Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, kamonwan_ji@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลพลศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยหอมดิบด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ คือ ระบบที่ 1 โรงเรือนอบแห้งแบบปกติ ระบบที่ 2 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบเสริมความร้อนและควบคุมระบบอบแห้งทางไกลผ่านสมาร์ทโฟนที่สามารถสังเกตการณ์โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง แหล่งพลังงานความร้อนเสริมภายในโรงเรือนใช้จากเครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun) โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 50 °C และ 70 °C การทดสอบระบบ พบว่าระบบสามารถทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ โดยการสั่งการผ่านสมาร์ทโฟน ทำให้สามารถติดตามผลการดำเนินงานทั้งหมดของระบบอบแห้งได้ สำหรับคุณภาพกล้วยหอมดิบหลังการอบแห้ง พบว่าทั้งสองอุณหภูมิ

ใช้เวลาในการอบแห้งใกล้เคียงกันโดยใช้เวลา 4 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ และได้ความชื้นสุดท้าย 8.01%db. ค่าสีของการอบแห้งไม่แตกต่างจากตัวอย่างกล้วยอบแห้งด้วยลมร้อนมากนัก และคุณภาพสีของกล้วยหลังอบแห้งที่ 50 °C มีค่าความสว่าง (L) ใกล้เคียงกับกล้วยสดมากที่สุด ความแตกต่างของสีโดยรวม ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) หลังการอบแห้งมีค่า 0.577 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด (< 0.6)

คำสำคัญ: โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, กล้วยหอมทอง, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

ABSTRACT

This research was aimed to study the kinetics of drying raw banana chips in two solar greenhouse systems: System 1, normal greenhouse drying; and System 2, greenhouse and supplementary heat system controlling by smart phone. The two systems were observed and controlled via smart phone app. and an auxiliary heat source from a heat gun. the system was setup to dry raw bananas to find out the efficiency. The system was able to control the specified temperatures very well via a smartphone and the drying performance could be monitored on the smartphone screen. The result of the quality of bananas after drying revealed that at the determined temperature, they took only 4 and 5 hours respectively where the final moisture content was at 8.01 %db. In term of color quality, bananas from the test had almost the same brightness (L) as raw bananas. The overall color difference were 17.01 and 17.45. There were no statistically significant differences ($p < 0.05$). The water activities (a_w) were 0.577, which were below the standard (< 0.6).

KEYWORDS: Smart Solar Greenhouse, Raw Banana Chips, Internet of Things

1. บทนำ

กล้วยเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมในการบริโภค ทั่วไป ทั้งในและต่างประเทศ กล้วยที่นิยมปลูกและรับประทานส่วนใหญ่ มีสามสายพันธุ์ [1] คือ กล้วยน้ำหว้า กล้วยไข่ และกล้วยหอม กล้วยหอมเป็นกล้วยที่สามารถปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย มีสรรพคุณที่ดีมากทั้งผลสุก และผลดิบ ซึ่งการทานผลดิบ มีประโยชน์หลายอย่าง เช่น เป็นแหล่งไฟเบอร์สูงที่เส้นใยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการขับถ่ายได้ดี ดึงดูดหัวใจเพื่อเป็นแหล่งที่อุดมด้วยโพแทสเซียมที่สามารถควบคุมความดันโลหิตให้คงที่ ช่วยในการทำงานของไตมีประสิทธิภาพ ช่วยลดน้ำหนัก เป็นแหล่งแป้งที่ดีต่อสุขภาพ โดยเป็นแป้งที่ไม่ย่อยสลายในช่วงที่ร่างกายดูดซึมอาหาร ทำให้แป้งนี้จะกลายเป็นแบคทีเรียในลำไส้ ลดคลอเรสเตอรอลในร่างกาย และรักษากรดไหลย้อน เป็นต้น ดังนั้นจึงมีแนวคิด

การแปรรูปกล้วยให้เป็นผงแป้งที่ได้จากการอบแห้ง เพื่อไปประยุกต์ในการบริโภค เช่น ชงกับน้ำร้อนรับประทาน ส่วนผสมของอาหารหรือขนมเพื่อสุขภาพ สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับกล้วย รวมถึงเป็นการสร้างรายได้เสริมให้เกษตรกร วิธีการตากแดดเป็นวิธีการที่ต้องใช้ระยะเวลาผลิตนาน ผลผลิตปนเปื้อนสิ่งสกปรกต่างๆ ดังนั้นการใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกทางเลือกที่สามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่นำมาแปรรูปได้ เนื่องจากสามารถป้องกันฝุ่นละอองรวมทั้งป้องกันฝน และแมลงต่างๆ อีกทั้งอุณหภูมิภายในยังมีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ แต่ก็ไม่สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการอบแห้งหรือในช่วงฤดูฝน ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำหรือไม่เหมาะสมต่อการอบแห้ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระบบอบแห้งกล้วยหอมดิบเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นก่อนการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบเสริมความร้อน ขนาดครัวเรือนที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เพื่อเกษตรกรรายย่อย และเพื่อสร้างให้เกษตรกรไทยในยุค THAILAND 4.0 ให้เป็น Smart Farmer นั่นคือ การไม่ทำร้ายธรรมชาติ ใช้ทรัพยากรเท่าที่จำเป็น เกิดความสะดวกในการทำงานมากขึ้น และสามารถเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้น เช่น การมีพื้นที่เล็ก ๆ ให้สามารถปลูกแบบผสมผสานและให้ได้ผลผลิตที่มากขึ้น และใช้เทคโนโลยีในกระบวนการผลิต ก่อให้เกิดการพัฒนา ซึ่งต้องมีความเข้าใจตั้งแต่กระบวนการผลิต การบริหารจัดการ เข้าใจธรรมชาติ และเข้าใจเทคโนโลยี [2] ดังนั้นจึงได้นำเอาเทคโนโลยีไอโอที (IoT) มาใช้ในการควบคุมระบบการอบแห้งในโรงเรือนอบแห้งคือ อุณหภูมิและความชื้น แล้วระบบไอโอทีดังกล่าวนำส่งข้อมูลที่ได้ผ่านคลาวด์ (Cloud) และแสดงผลข้อมูลบนสมาร์ทโฟนและทำให้สามารถควบคุมระบบการอบแห้งได้ [3] ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาจลพลศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยหอมดิบด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบเสริมความร้อนและควบคุมระบบอบแห้งทางไกลผ่านสมาร์ทโฟน โดยทำการศึกษาการทำงานของระบบควบคุมการอบแห้งด้วยระบบ IoT ศึกษาคุณภาพด้านสี ค่าปริมาณน้ำอิสระและความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ เพื่อที่สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เพื่อไปพัฒนาต่อยอดในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรและสร้างให้เกษตรกรให้เป็น Smart Farmer ในอนาคตต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบโรงเรือนอบแห้งพร้อมระบบเสริม

โรงเรือนอบแห้งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมหลังคาโค้ง ขนาด (กว้างxยาวxสูง) 1.04x1.25x0.83 เมตร ปกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดใส ประตูทางทางเข้าทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 0.5 มิลลิเมตร พื้นโรงเรือนทำจากแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มิลลิเมตร ภายใต้พื้นปูด้วยฉนวนกัน

ความร้อนเพื่อป้องกันการนำความร้อนจากภายในโรงเรือนสู่บรรยากาศภายนอก มีช่องอากาศเข้าด้านหน้า จำนวน 2 ช่อง โดยมีแผ่นฟิลเตอร์กรองฝุ่นละอองจากด้านนอก ส่วนด้านหลังมีพัดลมระบายอากาศเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ 3 วัตต์ จำนวน 2 ตัว โดยเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 20 วัตต์ จำนวน 1 แผง แล้วเพิ่มแหล่งความร้อนเข้าไปในระบบซึ่งเลือกใช้แหล่งความร้อนเสริมเป็นฮีตเตอร์ชนิดปืนลมร้อน (Heat Gun) ขนาด 2 kW ที่นิยมใช้ในระบบให้ความร้อนทั่วไป ติดตั้งง่ายและความปลอดภัยสูงเนื่องจากไม่มีเปลวไฟ มีการสูญเสียความร้อนต่ำ ประสิทธิภาพสูงประหยัดไฟฟ้าได้ 30-50% ทำการติดตั้งบริเวณโครงตรงกลางโรงเรือนสูงจากภาคใต้ผลิตภัณฑ์ 60 เซนติเมตร เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องจึงออกแบบระบบควบคุมการอบแห้งอัตโนมัติ ซึ่งหลักการทำงานของระบบอบแห้งภายในโรงเรือนคือ เมื่อ อุณหภูมิภายในของระบบอบแห้งต่ำกว่าที่กำหนดใน 2 ค่าอุณหภูมิ คือ 50 °C และ 70 °C ระบบความร้อนเสริมจากปืนลมร้อน จะทำงานอัตโนมัติ โดยให้ความร้อนกับระบบอบแห้ง ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมและไม่สูงเกินไปในการอบแห้งกล้วยหอม ทำให้คุณภาพสีหลังการอบแห้งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่นำไปแปรรูปในท้องตลาด [4] โดยรูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์เสริมความร้อน



รูปที่ 1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบเสริมความร้อน

วิธีการคำนวณค่าความร้อนเพื่อให้สามารถเลือกขนาดของฮีตเตอร์ที่ใช้ในการอบแห้ง ได้อย่างเหมาะสมโดยใช้สมการในการคำนวณดังสมการที่ (1) [5]

$$Q = mc_p \Delta T \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อน (kJ)

m คือ มวลของอากาศภายในโรงเรือน (kg)

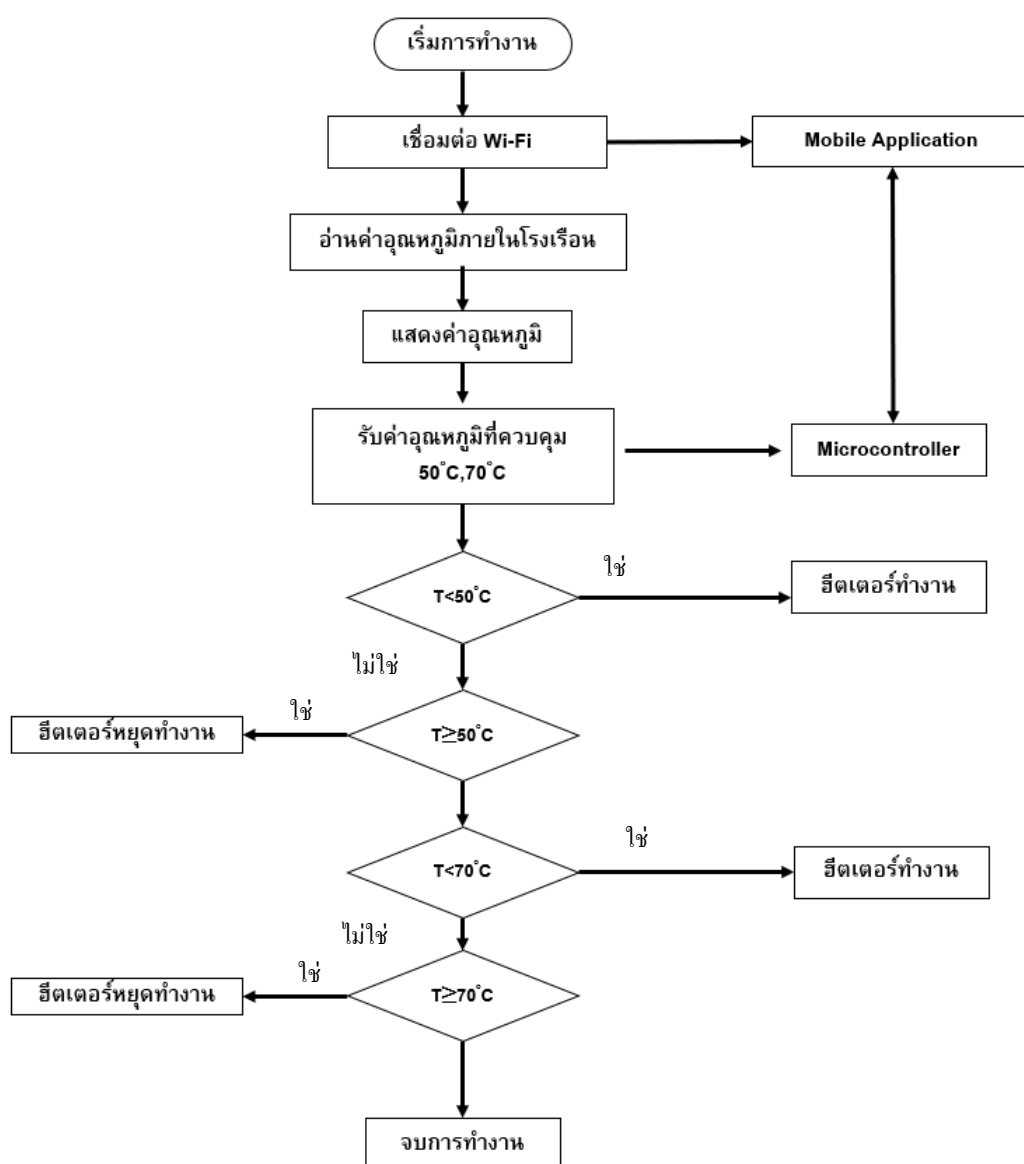
C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศ (kJ/kg K)

ΔT คือความแตกต่างของอุณหภูมิสุดท้ายและเริ่มต้น (K)

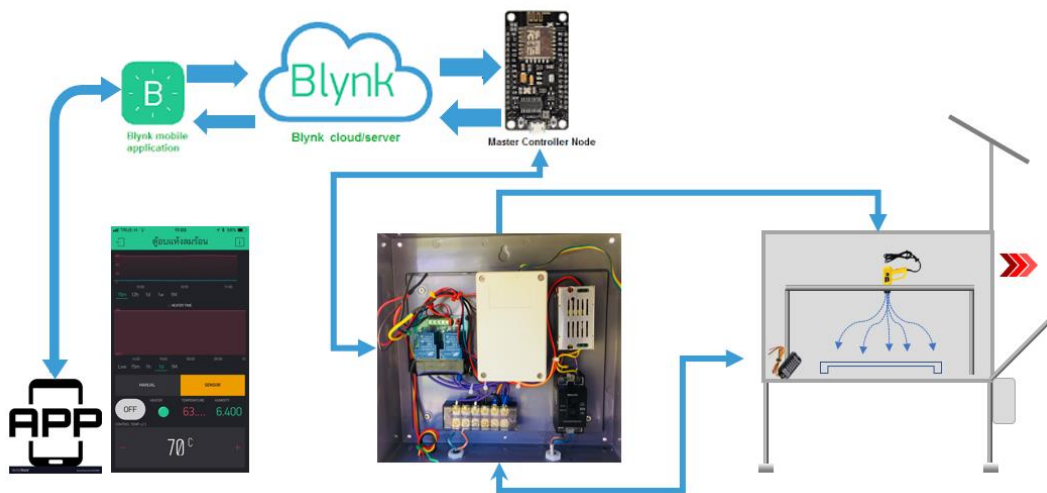
2.2 การออกแบบระบบสั่งการระยะไกล (IoT)

ขั้นตอนการทำงานของแอปพลิเคชันสำเร็จรูป blink แอปพลิเคชัน เป็นการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบ IoT สามารถกำหนดค่าตัวแปรอุณหภูมิได้ตามต้องการ ควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือน โดยกำหนดเงื่อนไขการตั้งค่าอุณหภูมิผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน โดยการตั้งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร โดยเลือกค่า 50 °C และ 70 °C และให้ระบบสั่งการทำงานของระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์ทำงาน เมื่ออุณหภูมิในโรงเรือนต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่กำหนดและส่งค่าแสดงผลการทำงานไปยังสมาร์ทโฟน พร้อมทั้งอ่านค่าความชื้นภายในโรงเรือน ณ ช่วงเวลาใด ๆ ดังแสดงในผังการตั้งค่าบริการควบคุมการอบแห้งอัตโนมัติในรูปที่ 2

จากรูปที่ 3 แสดงการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติโดยหลังจากติดตั้งโปรแกรมโครงสร้างการเชื่อมต่อระบบ Wi-Fi แล้วระบบจะประมวลผล และส่งข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการอ่านค่าเซ็นเซอร์เข้าสู่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ รับหรือส่งข้อมูลค่าควบคุมและอุณหภูมิจากสมาร์ทโฟน ระบบควบคุมจะส่งค่าไปที่ส่วนการทำความร้อนเพื่อเปิดปิดการทำความร้อนตามที่กำหนด ข้อดีของการเลือกใช้ Blink แอปพลิเคชัน คือมีฟังก์ชันการใช้งานที่ง่ายเลือกรูปแบบ ออกแบบการควบคุมและหน้าจอแสดงผลได้ตามต้องการและราคาไม่สูงหากเปรียบเทียบกับแอปพลิเคชันอื่น



รูปที่ 2 ผังระบบควบคุมการอบแห้งโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3 ระบบควบคุมอุณหภูมิและหน้าจอแสดงผลระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

2.3 วิธีการทดลอง

เตรียมกล้วยหอมทองดิบ โดยทำการปอกเปลือกแล้วหั่นเป็นแว่นขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร ทำการทดลองอบแห้งกล้วยหอมดิบในโรงเรือนอบแห้ง 2 ระบบ คือ โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบเสริมความร้อนและควบคุมระบบอบแห้งด้วยระบบควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ปกติ นำกล้วยดิบที่ทำเป็นแผ่นบางแล้วมาอบแห้งภายในโรงเรือนครั้งละ 1 กิโลกรัม เริ่มต้นทำการทดลองตั้งแต่ช่วงเวลา 08:30-18:00 น. ในระหว่างการทดลองได้ทำการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 15 นาที ลักษณะแผ่นกล้วยหอมดิบกับตำแหน่งการวางภายในโรงเรือนแสดงดังรูปที่ 4



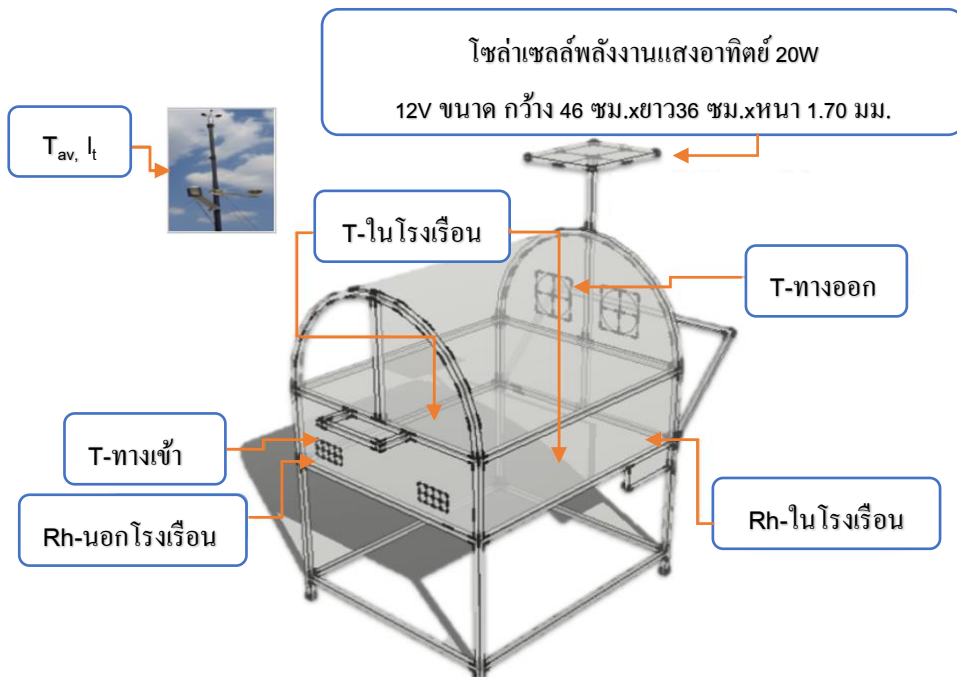
(ก) ชั้นกล้วยหอมดิบก่อนการทดลอง



(ข) ตำแหน่งการวางภายในโรงเรือน

รูปที่ 4 การอบแห้งกล้วยหอมดิบแผ่นภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบควบคุม IoT

ทั้งนี้ได้เก็บค่าอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน อุณหภูมิตำแหน่งทางเข้าและทางออกของโรงเรือน ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม ข้อมูลความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งตำแหน่งการวัดค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5 และทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อระบบเสริมความร้อนทำงาน ทำการอบแห้งกล้วยหอมดิบจากความชื้น 312.80%db. จนแห้งหรือ มีค่าความชื้นสุดท้าย 8.01%db. [4]



รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และมวลตัวอย่างภายในโรงเรือนอบแห้ง

นำตัวอย่างกล้วยหอมดิบไปชั่งน้ำหนัก (w) ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ AND รุ่น GF-3000 ความแม่นยำ ± 0.02 กรัม แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) และตั้งอุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้ง (d) แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้นได้จากสมการที่ (2) [6, 7]

$$MC = \frac{(w - d)}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db.)

w คือ น้ำหนักของกล้วยที่เวลาใดๆ (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของกล้วย (g)

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบการอบแห้ง เป็นอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำต่อพลังงานที่ให้กับระบบอบแห้ง คำนวณได้ดังสมการที่ (3) [6]

$$\eta_{th} = \frac{(m_i - m_f) \cdot h_{fg}}{(A_c \cdot I_t + E_h) \cdot t} \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบโรงเรือนอบแห้ง (%)

m_i คือ มวลของกล้วยหอมดิบก่อนการอบแห้ง (kg)

m_f คือ มวลของกล้วยหอมดิบหลังการอบแห้ง (kg)

h_{fg} คือ พลังความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ (kWh/kg)

A_c คือ พื้นที่โรงเรือนที่รับรังสีอาทิตย์ (m^2)

I_t คือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบโรงเรือน (W/m^2)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

E_h คือ พลังงานที่ใช้กับฮีตเตอร์ (kWh)

ทดสอบคุณภาพสีของกล้วยหอมดิบหลังการอบแห้งด้วยเครื่อง Portable Colorimeter 3NH รุ่น NH310 มาตรฐานชนิดแหล่งกำเนิดแสง D65 เป็นการทดสอบสีแบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยแสงสว่างที่ 6500 K มีค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสีน้อยกว่า 0.04 (ΔE^*ab) โดยค่า L คือ ค่าความสว่างมีค่า 0-100 หรือสีดำถึงสีขาว ค่า a แสดงค่า (+) สีแดง หรือ(-) สีเขียว และค่า b แสดงค่า (+) สีเหลือง หรือ(-) สีม่วง แล้วนำค่าสีที่วัดได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ และคำนวณหาความแตกต่างกันของสีโดยรวมดังสมการที่ (4)

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (4)$$

โดยที่ ΔE คือ ความแตกต่างกันของสีโดยรวม

ΔL คือ ความแตกต่างของความสว่างก่อนและหลังอบแห้ง

Δa คือ ความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียวก่อนและหลังอบแห้ง

Δb คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงินก่อนและหลังอบแห้ง

วัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ด้วยเครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระรุ่น AQUALAB PRE มีช่วงการวัดปริมาณน้ำอิสระ 0.05-1.00 ความละเอียดการแสดงผล 0.001 ความแม่นยำ ± 0.01 โดยการนำตัวอย่างของกล้วยหอมดิบหลังจากการอบแห้งทุกเงื่อนไข ใส่ลงในถ้วยพลาสติก แล้วใส่ตัวอย่างลงในเครื่อง รอการแสดงผลแล้วบันทึกค่าที่วัดได้ แล้วนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติและรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

การหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นอัตราส่วนการใช้พลังงานของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อความชื้นที่ระเหยออกจากกล้วยหอมดิบในช่วงเวลาการทดลองอบแห้ง โดยคำนวณได้จากสมการที่ (5) และกรณีระบบความร้อนเสริมโดยใช้ฮีตเตอร์ป้อนลมร้อน ซึ่งต้องรวมพลังงานของฮีตเตอร์ที่ให้กับโรงเรือนอบแห้งด้วยในการคำนวณ

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_i - m_f} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/gwater-evap.)

E_p คือ ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)

m_i คือ น้ำหนักของกล้วยก่อนอบแห้ง (g)

m_f คือ น้ำหนักของกล้วยหลังอบแห้ง

3. ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบระบบสั่งการทางไกล

เมื่อทำการออกแบบโรงเรือนพร้อมระบบเสริมความร้อนจากฮีตเตอร์ป้อนลมร้อนขนาด 2 kW ติดตั้งตรงกลางโรงเรือน แล้วทำการทดสอบระบบสั่งการระยะไกลที่ได้จัดทำขึ้น จากผลการทดสอบระบบพบว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ภายในโรงเรือนได้ โดยอาศัยการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งไว้ภายในโรงเรือน ข้อมูลความชื้นและอุณหภูมิอ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์ DHT21 สามารถแสดงผลผ่านทางสมาร์ทโฟน แสดงผลข้อมูลอุณหภูมิและค่าความชื้นที่อ่านได้แบบเรียลไทม์ (Real time) ทุก ๆ 5 นาที การทำงานแบบอัตโนมัติจะทำงานเมื่อฟังก์ชันโหมดในหน้าจออยู่ที่โหมดเซ็นเซอร์ การทำงานของกล่องควบคุมสามารถสังเกตการณ์การทำงานของกล่องควบคุมทำงานได้โดยกล่องจะแสดงไฟ LED หนึ่งจุดแสดงสถานะพร้อมทำงานและไฟ LED แสดงสองตำแหน่งแสดงว่าฮีตเตอร์กำลังทำงาน ดังรูปที่ 6



(ก) ชุดควบคุม IoT



(ข) หน้าจอแสดงผลบนสมาร์ตโฟน



(ค) สถานะพร้อมทำงาน

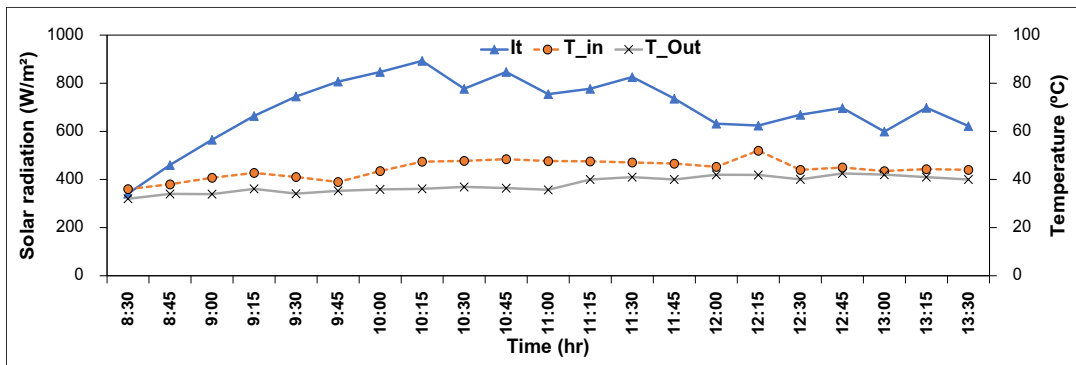


(ง) สถานะการทำงานของฮีตเตอร์

รูปที่ 6 ชุดควบคุม IoT และการแสดงผลอุณหภูมิและความชื้นบนหน้าจอสมาร์ตโฟนและชุดกล่องควบคุม IoT การแสดงสถานะการทำงานของฮีตเตอร์

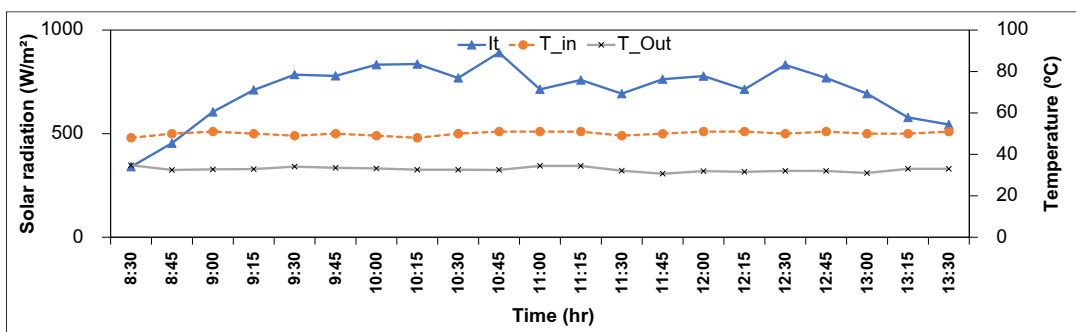
3.2 การทดสอบระบบกล้วยหอดิบ 2 ระบบ

ระบบที่ 1 การใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ปกติผลการทดลองพบว่าใช้เวลาในการอบแห้ง 8 ชั่วโมง จากค่าความชื้นเริ่มต้น. 308.59 %db. จนมีความชื้นสุดท้าย 8.25%db. ในระหว่างการทดลอง มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลา 08:30-13:30 น. มีค่า 694 W/m² และค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 37.95 °C และอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ย 44.36 °C ดังรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของช่วงเวลา ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิภายในโรงเรือน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของช่วงเวลากับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิภายในโรงเรือน

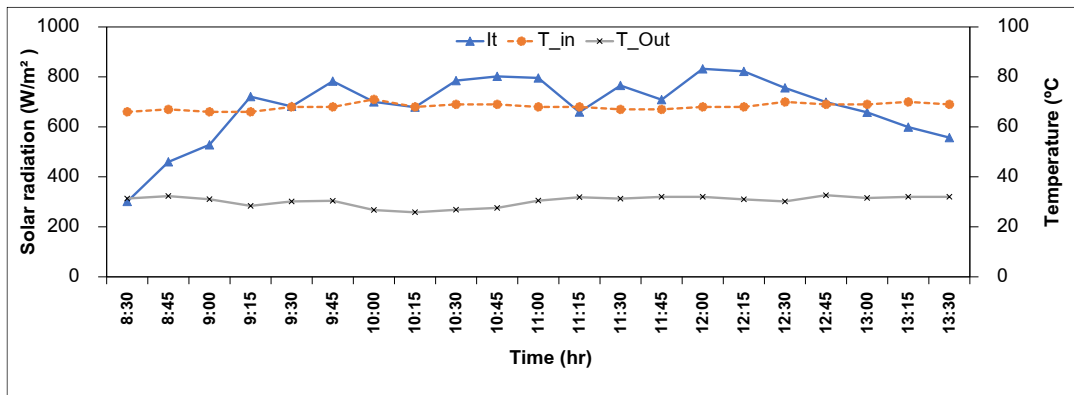
ระบบที่ 2 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบเสริมความร้อนและควบคุมระบบอบแห้งทางไกลผ่านสมาร์ตโฟน การตั้งค่าอุณหภูมิการอบแห้ง 50 °C ผลการทดลองพบว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 5 ชั่วโมง ในช่วงเวลาการทดลอง 8:30-13:30 จากค่าความชื้นเริ่มต้น 321.5 %db. จนมีความชื้นสุดท้าย 8.32%db. ในระหว่างการทดลองมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 707 W/m² และค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 32.72 °C ระบบควบคุมมีการตัดต่อระบบเพื่อควบคุมค่าอุณหภูมิอบแห้งให้ไม่ต่ำกว่า 50 °C จึงทำให้การอบแห้งมีอุณหภูมิคงที่ต่อเนื่องตลอดการทดลอง รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิภายในโรงเรือนในช่วงการทดลอง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของช่วงเวลากับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่อุณหภูมิควบคุม 50 °C

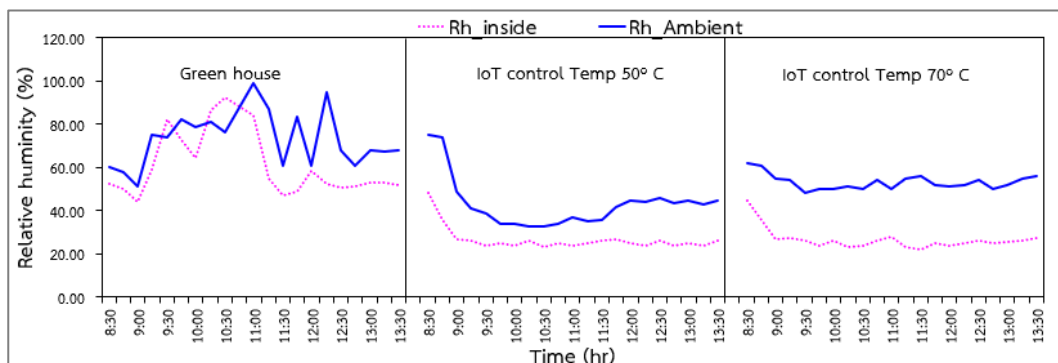
การตั้งค่าอุณหภูมิการอบแห้ง 70 °C ผลการทดลองพบว่าใช้เวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 8:30-13:30 น. ในระหว่างการทดลองมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 681 W/m² และ

ค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 30.37 °C ดังรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของช่วงเวลากับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิภายในโรงเรือนในช่วงการทดลอง



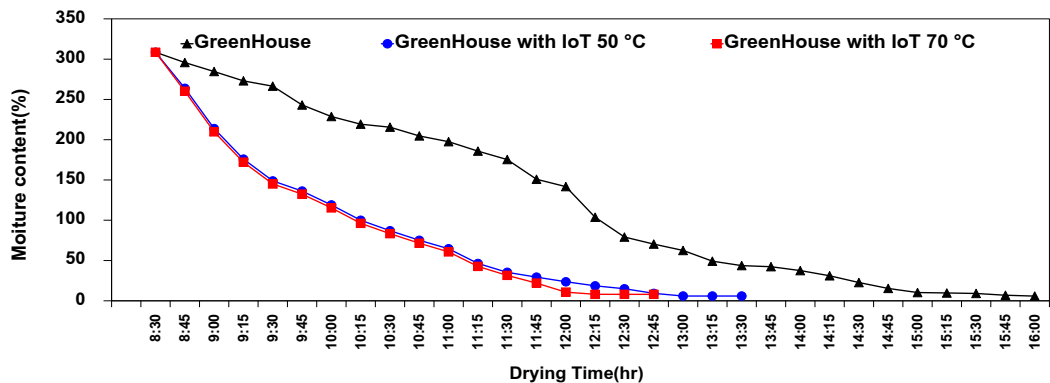
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของช่วงเวลากับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่อุณหภูมิควบคุมที่ 70 °C

จากรูปที่ 10 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในกับสิ่งแวดล้อมภายนอกโรงเรือนใน 2 ระบบการอบแห้ง คือระบบที่ 1 การอบแห้งโดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ระบบที่ 2 อบแห้งโดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ป็นลมร้อนควบคุมด้วยระบบ IoT ที่อุณหภูมิ 50 และควบคุมอุณหภูมิ 70 °C พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนทั้งสามรูปแบบมีค่าต่ำกว่าภายนอกทุกรูปแบบ เนื่องจากอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะกรณีควบคุมระบบอบแห้งที่ อุณหภูมิ 50 และ 70 °C จะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่คงที่ด้วย

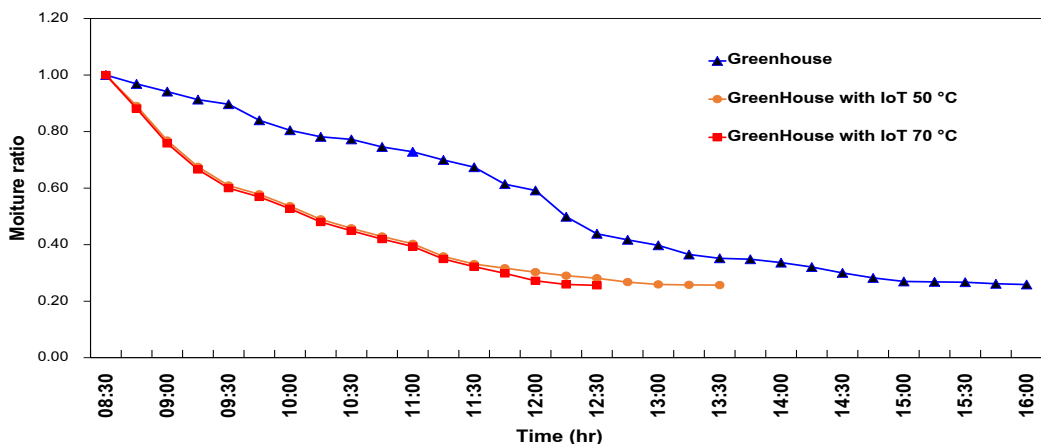


รูปที่ 10 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้ง เปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง

ปริมาณความชื้นของการอบแห้งกล้วยหอมดิบจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาการอบแห้ง จากความชื้นเริ่มต้น 312.80%db. และอบแห้งจนลดลงเหลือค่าความชื้นสุดท้าย 8.01 %db. พบว่าอุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาอบแห้ง อยู่ที่ 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C ใช้เวลาอบแห้งอยู่ที่ 5 ดังแสดงในรูปที่ 11 ภายในโรงเรือนอบแห้ง มีค่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ โดยมีค่าเฉลี่ย 26.9% ซึ่งเมื่อค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งเฉลี่ยมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมีค่าต่ำ วัสดุจะสามารถคายความร้อนได้ดี จึงทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่า ดังรูปที่ 12 อุณหภูมิภายในโรงเรือนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและคงที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิควบคุมซึ่งอุณหภูมิ 70 °C สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนในโรงเรือนและขึ้นกล้วยที่มากกว่าและเร็วกว่าอุณหภูมิ 50 °C เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นนั้นเป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับน้ำที่อยู่ในวัสดุทำให้สามารถระเหยน้ำได้เร็วและมากขึ้นทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงได้เร็วกว่า [8]



รูปที่ 11 ปริมาณความชื้นที่ลดลงตามเวลาภายในโรงเรือนอบแห้งทั้ง 2 ระบบ



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นภายในโรงเรือนอบแห้งทั้ง 2 ระบบ

คุณภาพสีของกล้วยจากตารางที่ 1 พบว่ากล้วยสดมีค่าความสว่าง (L) เฉลี่ย 83.39 ± 2.06 และผลของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 °C ค่าที่วัดได้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาการอบแห้งด้วยลมร้อนมากขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 67.83 ± 6.44 ถึง 67.09 ± 6.80 ลดลงคิดเป็นร้อยละ 18.66 และ 19.74 ตามลำดับ ส่วนค่าสีแดง (a) พบว่ากล้วยสด มีค่าความเป็นสีแดงเฉลี่ย 2.44 ± 0.46 เมื่อเทียบกับหลังอบแห้งจะมีค่าอยู่ในช่วง 7.54 ± 2.63 ถึง 8.49 ± 1.35 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 2.96 และ 8.48 และความเป็นสีเหลือง (b) พบว่ากล้วยสด มีค่าความเป็นสีเหลืองเฉลี่ย 17.75 ± 1.31 เมื่อเทียบกับหลังอบแห้งจะมีค่าอยู่ในช่วง 10.68 ± 2.8 ถึง 12.05 ± 2.22 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 39.90 และ 32.19 ความแตกต่างของสีโดยรวมหลังการอบแห้งพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ลดลงจะส่งผลต่อความแตกต่างของสีโดยรวมที่ต่ำลง พบว่าอุณหภูมิอบแห้งที่ 50 °C มีค่าความแตกต่างของสีโดยรวมต่ำที่สุด 17.10 เนื่องจากใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้การรับความร้อนน้อยลง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยลง [9]

ส่วนค่าปริมาณน้ำอิสระของกล้วยสดมีค่าเฉลี่ย 0.68 ± 0.05 และหลังอบแห้งกล้วย พบว่ากล้วยมีค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.53 ± 0.02 ถึง 0.58 ± 0.02 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารที่กำหนด (≤ 0.6) [10]

ตารางที่ 1 คุณภาพด้านสีของกล้วยหอมดิบก่อนและหลังการอบแห้ง

เงื่อนไขวิธีการทดลอง	ความชื้นสุดท้าย (%db.)	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	คุณภาพสีของกล้วยหลังอบแห้ง				ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ^{ns}
			L ^{ns}	a ^{ns}	b ^{ns}	ΔE ^{ns}	
กล้วยสด	-	-	83.39 ± 2.06	2.44 ± 0.46	17.75 ± 1.31	-	0.68 ± 0.05
อบแห้งที่ 50 °C	8.32	5	67.83 ± 6.44	7.54 ± 2.63	10.68 ± 2.81	17.10	0.53 ± 0.02
อบแห้งที่ 70 °C	8.01	4	67.09 ± 6.80	8.49 ± 1.35	12.05 ± 2.22	17.45	0.58 ± 0.02

^{ns} คือ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกล้วยที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C มีค่า 0.155 MJ/gwater-evap. โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 5 ชั่วโมง และ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C มีค่า 0.135 MJ/gwater-evap. โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 ซึ่งการอบแห้งกล้วยที่ 4 ชั่วโมง จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่า [10] หากพิจารณาเงื่อนไข

การอบแห้งจากความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานและประสิทธิภาพทางความร้อนการอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C เป็นเงื่อนไขที่ดีกว่าเนื่องจากเวลาที่สั้นและความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C [11]

ตารางที่ 2 ความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพทางความร้อน

Control condition	Drying time (Hr)	Electrical Energy (Kwh)	SEC (MJ/g _{water-evap.})	η_{th} (%)
โรงเรือนอบแห้ง	8	-	-	2.19
อบแห้งที่ 50°C	5	1.97	0.155	2.11
อบแห้งที่ 70°C	4	2.15	0.135	3.05

4. สรุป

การพัฒนาโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบเสริมความร้อนและควบคุมระบบอบแห้งทางไกลผ่านสมาร์ตโฟน สำหรับอบแห้งกล้วยหอมดิบ ระบบสามารถทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดทั้งอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ ทำให้สามารถทำงานได้สะดวกขึ้นโดยการควบคุมทางไกล และสามารถทำให้การอบแห้งดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง และจากการทดลองอบแห้งกล้วยหอมดิบทั้ง 2 ระบบ พบว่าระบบที่ 2 มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่ 1 โดยการ ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งที่ 50 °C สามารถอบแห้งกล้วยหอมดิบภายใน 5 ชั่วโมง ได้ความชื้นสุดท้าย 8.32 %db. และได้คุณภาพของกล้วยหลังอบแห้งโดยมีปริมาณน้ำอิสระอยู่ที่ 0.53±0.02 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ คือไม่เกิน 0.6 ในการควบคุมอุณหภูมิที่ 70 °C สามารถอบแห้งกล้วยหอมดิบจนถึงความชื้นที่ต้องการได้ภายใน 4 ชั่วโมง ได้ความชื้นสุดท้าย 8.01 %db. และได้คุณภาพของกล้วยหลังอบแห้งโดยมีปริมาณน้ำอิสระอยู่ที่ 0.58±0.02 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ คือไม่เกิน 0.6 จากการเปรียบเทียบการอบแห้งพร้อมกับการควบคุมทั้งสองอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิ 70 °C สามารถอบแห้งกล้วยหอมดิบในระยะเวลาที่สั้นกว่า คือใช้เวลาเพียง 4 ชั่วโมงและมีประสิทธิภาพมากกว่าอุณหภูมิ 50 °C แม้ว่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะจะสูงกว่าเล็กน้อย แต่ก็ได้ผลความชื้นและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

References

- [1] Department of Agriculture. The banana varieties. Research and Development Institute of Kasetsart University [Internet]. 1998 [cited 2021 April 15]. Available from: <https://www.qmlcorp.com/content/Thai farmers-thailand-4.0>. (In Thai)
- [2] Wongsila S. Internet of things for smart of farmer. Science and Technology Research Research Institute [Internet]. 2021 [cited 2021 Jul 15]. Available from: http://www.stri.cmu.ac.th/article_detail.php?id=78. (In Thai)
- [3] Fongnong V, Petchhan S, Yamho R. Application with the internet of things technology control in smart farms Mushroom. Technology Management Rajabhat Maha Sarakham University Journal 2018;5(1):172-82. (In Thai)
- [4] Doungporn S, Loikew A, Punphom P, Thaipituk P. Drying of Gros Michel banana by using solar combined with infrared dryer. The Science Journal of Phetchaburi Rajabhat University 2019;16(1):12-24. (In Thai)
- [5] Patcharaprakiti N. A Paraboiled gaba rice (Khaohang) and drying process with solar energy and infrared electromagnetic wave. RMUTL Engineering Journal 2016;1(1):43-50. (In Thai)
- [6] Ongprasert T, Jitjack K. A study of solar greenhouse drying in association with infrared heater for dehydration cherry tomatoes. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(3): 62-83. (In Thai)
- [7] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official methods of analysis. 17th ed. Gaithersburg, Maryland: Association of Official Analytical Chemists; 2000.
- [8] Jaekhom S, Witinantakit K. Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):29-43. (In Thai)
- [9] Choosri W, Wiriyawattana P, Promsakha na Sakon Nakhon P, Choosri T. Effect of hot-air drying process on properties of dried ripe bananas and pumpkins. Food Technology Siam University Journal 2020;15(1):37-52. (In Thai)
- [10] Jaekhom S, Witinantakit K. Drying kinetics of chicken using superheated steam technique. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):201-7. (In Thai)
- [11] Manangan W, Kittinantakit K. Water lily using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(3):84-98. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ฤทธิ์รงค์ เสนาโนฤทธิ์ ตำแหน่ง ผู้จัดการฝ่ายวางแผนและควบคุมการผลิต (แผนก Production control) บริษัท เอ็กเซตัส ประเทศไทย จำกัด 700/316 หมู่ที่ 6 อมตะซิตี้ชลบุรี เฟส 3 ต.ดอนหัวฬ่อ อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20000
โทรศัพท์ 091-770-5603 Email: senanoritoath@gmail.com



กมลวรรณ จิตจักร ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 092-332-556 6 Email: kamonwan_ji@rmutto.ac.th

Article History:

Received: August 5, 2021

Revised: December 16, 2021

Accepted: December 20, 2021

PAVING BLOCKS FOR THE ELDERLY: A STUDY OF THE PREPARATION OF CONCRETE MIXED WITH CRUMB RUBBER AND BONDED RUBBER

Chaiwute Vudjung¹ and Suwimon Thiakthum²

¹Lecturer, Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University,
85 Sathonlamark Road, Muang Srikai Subdistrict, Warin Chamrap District,
Ubon Ratchathani Province 34190, Thailand, chaiwute2110@gmail.com

²Lecturer, Department of Production Engineering and Management,
Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University,
83 Moo 11, Saraburi-Lom Sak Road, Sadiang Subdistrict, Mueang District,
Phetchabun Province 67000, Thailand, suwimon.thi@pcru.ac.th

ABSTRACT

This research aimed to study the preparation of shock-reducing paving blocks. Typically, the paving blocks are made of concrete mixed with three different materials, namely crumb rubber, bonded rubber, and shock-absorbing rubber. This research focused on studying the effects of crumb rubber on the characteristics of concrete and the impact of fly ash content on the properties of bonded rubber. The tests showed that concrete had less density and compressive strength when the crumb rubber content increased. The concrete with 10% crumb rubber content by sand weight had the highest compressive strength (156.32 kg/cm²). The vulcanization test of bonded rubber using fly ash as a filler revealed that M_H - M_L increased when the fly ash content increased. However, the scorch time (T_{S2}) and cure time (T_{C90}) of the rubber were somewhat stable. The mechanical properties test of bonded rubber found that tensile strength, elongation at break, and rebound resilience tended to decrease; on the other hand, the hardness appeared to increase when the fly ash content became greater. However, the bonded rubber with fly ash as a filler could not be chemically bonded with the concrete mixed with crumb rubber. Consequently, it is advisable to design the characteristics of bonded rubber to be physically adhesive to concrete mixed with crumb rubber.

KEY WORDS: Crumb rubber, Shock-reducing paving blocks, Portland cement, Fly ash

1. Introduction

The elderly are people who are different from other ages. Most of the common accidents they encounter are associated with falling because they have deteriorating physical conditions and unhealthy muscle strengths, especially hip, knee, and ankle joint muscles. Typically, falling affects body movements and causes poor health conditions and other complications, such as hip fracture, sprained ankles, and worse quality of life. Therefore, home construction or landscape design is essential to prevent or reduce the possibility of accident occurrence with the elderly, and appropriate shock-absorbing materials are recommended for use. Previous studies have investigated the preparation of paving blocks that could help to reduce the shock during the walk or movements. They also decrease the possibility of accidents the elderly might encounter [1]. According to the studies, rubber is mixed with concrete to reduce the rubber content, which is more expensive than concrete. With this method, the paving blocks are cheaper, and they can also help to decrease the severity of injuries from falling. The developed paving blocks consist of three components, namely shock-absorbing rubber, bonded rubber, and concrete, as presented in Figure 1.

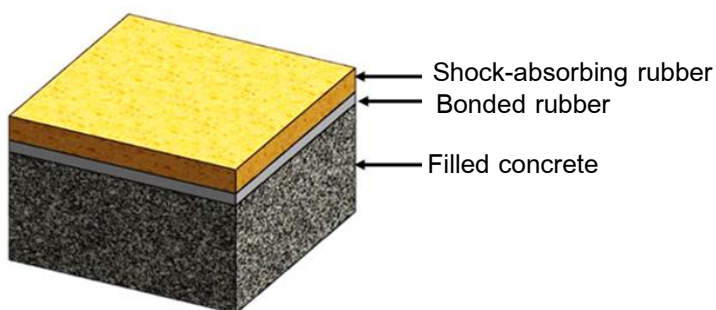


Figure 1 Dimension and components of paving blocks

Concrete is the most commonly used material in construction. It is composed of admixtures, such as stones, sand, pebbles, and water. In addition, other admixtures may be added to yield specifically required properties. After the mixing process, concrete slowly and gradually becomes hardened, and it is easy to mold and form. The concrete hardening occurs from the chemical reaction of water and cement, known as hydration reaction. The cement begins to bond to other materials and eventually forms a hard mass. In light of the possibility that other materials can be added during the concrete mixing process, waste

materials and polymer waste have been mixed with the concrete. For example, Nitisuwanluksa [2] investigated the possibility of substituting polypropylene for sand in the production of lightweight bricks. The study revealed that the substitution of polypropylene for sand could reduce production costs. Besides, Amnuaypornlert et al. [3] examined the mechanical behaviors of concrete mixed with ceramic utensil crumbs gathered from a factory in Phayao Province. The fine aggregates were replaced with ceramic shavings, and the substitution of ceramic shavings for fine aggregates increased the compressive and flexural strength of the concrete. However, if the ratio of ceramic shavings was not appropriate, concrete strength would decrease. Also, Tirasakkosol et al. [4] studied the repairing and maintenance of concrete surfaces of roads using synthetic material and asphaltic concrete. Their study showed that the application of synthetic material and asphaltic concrete could effectively reduce damage to road surfaces. Road surfaces would not crack or break owing to their strength and endurance; moreover, the wheel-groove subsidence rate also decreased. Besides the engineering advantages, repairing roads using synthetic fiber sheets also costs less than other road repairing methods at about 42 percent. Boonsung [5] also investigated the compressive strength of paving blocks made from used tap-water filter sand and found a rapid increase of compressive strength at an early stage of cure time. After that, the compressive strength decreased. Therefore, the length of the cure time, rather than the content of used tap-water filter sand, affected the decrease of compressive strength.

In light of the possibility that polymers or other waste materials can be added to concrete, the research team was intrigued in preparing concrete mixed with crumb rubber or rubber powder. Crumb rubber and rubber powder are recycled products of rubber wastes, including old tires and rubber crumbs, which are results from the production process. The gathered rubber wastes are ground using mechanical tools. Crumb rubber applies to various uses, such as fillers in the rubber-sheet production industry, paving blocks, floor mats, and rubber fenders. Crumb rubber is also used to increase the strength of plastic; moreover, it is applied in civil engineering work. Even though crumb rubber initially has a higher cost than other materials like stones, soil, or asphalt, it enhances the quality of civil engineering work. Besides, it also reduces maintenance costs due to its specific properties. Therefore, it is beneficial in the long run [6]. The application of crumb rubber mainly aims to reduce costs, modify or improve some particular properties of the product, and reduce pollution by reusing rubber wastes. Furthermore, the use of crumb rubber in concrete shows that concrete mixed

with crumb rubber has a higher capacity to absorb energy, higher elasticity [7], and lighter weight [8] as the crumb rubber has lesser specific gravity than sand or stones.

Fly ash has the main chemical constituents of Silicon Dioxide (SiO_2), Aluminum Oxide (Al_2O_3), Iron Oxide (Fe_2O_3), and Calcium Oxide (CaO). Its secondary chemical constituents are Magnesium Oxide (MgO), Sodium Oxide (Na_2O), Potassium Oxide (K_2O), and Sulfur Trioxide (SO_3). In addition, it also contains moisture (H_2O) [9]. These constituents are similar to components of Portland cement. Previous studies have investigated the application of fly ash as construction materials like cement wall blocks and paving blocks. The studies revealed that fly ash could substitute cement [10]. It could also be a mixing ingredient in ready-mixed concrete for construction work and additional raw material in the production of construction materials, such as roof tiles, stakes, pipes, and prefabricated floors. Furthermore, in their research, Budnumpecth and Tanpaiboonkul [11] examined the appropriate ratio of fly ash substitution for cement. They found that the proper proportion for lightweight concrete was the substitution of cement with 10-percent fly ash. Besides its applications in cement and concrete work, fly ash is also applicable in geopolymer work. Hanjitsuwan et al. [12] studied the substitution of Portland cement in geopolymer fly ash. They revealed a positive effect on the mechanical properties and microstructure. The compressive strength of geopolymer at one week of cure time grew when Portland cement content increased. The increase of the compressive strength displays the decrease in the sizes of gaps and cavities.

Consequently, the research team attempted to prepare bonded rubber to adhere to concrete and shock-absorbing rubber. The preparation of bonded rubber would enhance the application of rubber, which is elastic and excellent for shock-absorbing, with concrete, which is durable but inexpensive, to make paving blocks. Therefore, the present research aimed to study the substitution of crumb rubber obtained from waste recycled for sand in the concrete-layer preparation for shock-absorbing paving blocks. The elasticity of crumb rubber would result in concrete with durability, shock-absorbing ability, and lightweight. Moreover, the preparation of bonded rubber mixed with fly ash was also initiated to enhance the bond of shock-absorbing rubber and concrete. Fly ash functioned as a filler to create a chemical bond between concrete and natural rubber to prepare shock-reducing paving blocks for the elderly.

2. Research Methodology

This research included three parts. The first part studied the effects of crumb rubber on the concrete properties, and the second part investigated the impact of fly ash content on the natural rubber used as bonded rubber. The third part examined the adhesion of bonded rubber and concrete, which was filled with crumb rubber. The research conduct of the three parts aimed to prepare shock-absorbing paving blocks for the elderly, as presented in Figure 2. Figure 2 illustrates the preparation of paving blocks, materials, and research methodology.

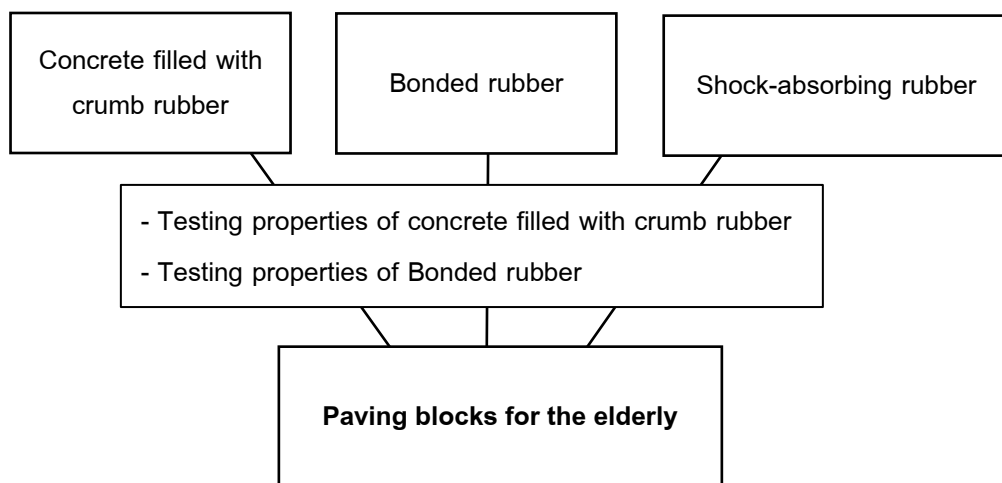


Figure 2 Flow chart of research methodology

2.1 Preparation of Concrete Mixed with Crumb Rubber

Concrete mixed with crumb rubber was prepared using Portland cement with a cement-to-sand ratio of 25:75. The sand was substituted by crumb rubber content of 10, 20, 30, 40, and 40 by sand weight, and water was used 40 percent by Portland cement weight, as presented in Table 1. Then all admixtures were mixed thoroughly. The molding of paving blocks started when the cement paste coated the aggregate evenly. The sample paving blocks were left to harden for 24 hours. Then they were wrapped in plastic film for a cure time of seven days.

Table 1 Mixture ratio of concrete mixed with crumb rubber

Mixture ratio of cement and admixtures/water (percent)			
60			40
Cement (percent)	Sand (percent)	Rubber Crumb (percent)	Water (percent)
25	75	0	40
25	65	10	40
25	55	20	40
25	45	30	40
25	35	40	40
25	25	50	40

2.2 The rubber compound used for the preparation of bonded rubber between concrete mixed with crumb rubber and shock-absorbing rubber on the top layer

The formula of the preparation of bonded rubber from dry rubber sheet and modified fly ash content is presented in Table 2. The admixtures were ground in a closed internal mixer, model MX500-TQ, and the rubber sheet was rolled in an open two-roll mill, model ML-D200L450. The rubber vulcanization was tested using a Moving Die Rheometer (MDR) before molding. The molding was done by extruding the rubber into the mold.

Table 2 Rubber compound formula used in the preparation of bonded rubber

Material	Volume (phr)
Dry rubber sheet	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	1
Fly ash	0, 50, 100, 150
MBTS	1
TMTD	0.1
Sulfur	2.5

2.3 Tests

2.3.1 Test of the properties of concrete mixed with crumb rubber

- The density of concrete was tested using an electronic densimeter. The concrete was weighed both in the air and in liquid. In this study, distilled water was employed in the weighing process because its density was clearly known. Then the density values were recorded.

- Compressive strength was also tested. The sample was prepared in a mold sized 10x10x10 centimeters, as presented in Figure 3. After the seventh day of cure time, the sample was tested for compressive strength using the compression machine.

- Morphology test of the surface of the concrete mixed with crumb rubber was conducted using a scanning electron microscope (SEM), model JSM 5410-LV.



Figure 3 Concrete cubic mold sized 10x10x10 centimeters

2.3.2 Tests of properties of bonded rubber between concrete mixed with crumb rubber and shock-absorbing rubber on the top layer

- The vulcanization time of rubber was tested using a Moving Die Rheometer (MDR). The test showed the minimum torque value (M_L), high torque value (M_H), scorch time (T_{s2}), and cure time at 90 percent (T_{C90}).

- Test of tensile strength of the rubber was conducted using a tensile testing machine at a stretch rate of 500 millimeters per minute and with a 1000 N load cell. A dumbbell-shaped Die-C specimen was prepared, as shown in Figure 4. The test result showed the tensile strength in MPa. The calculation formula is as follows.

$$\text{Tensile strength} = F / A \quad (1)$$

Where F is the force required to break, and A is width x thickness (the cross-sectional area of the specimen while not stretched). Elongation at break (%) was calculated using the following formula.

$$\text{Elongation at break} = [L - L_0 / L_0] \times 100 \quad (2)$$

Where L is the length of the extensometer, L_0 is the initial length of the extensometer (25 millimeters).

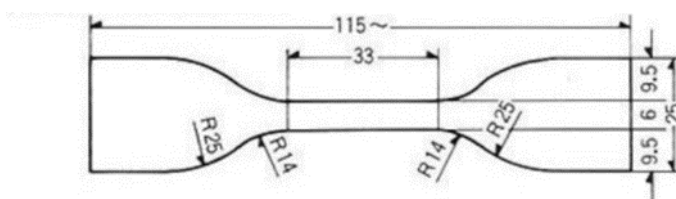


Figure 4 Dumbbell-shaped Die-C specimen

- The rebound resilience of the rubber was tested. First, a round rubber sheet with 12.5 ± 5 mm thickness was put in the rebound resilience tester, model GT-7042-RDA. After that, the iron ball was freely released to hit the round rubber sheet. Then the obtained value was recorded.

- The hardness of the rubber was tested using a Shore Durometer hardness tester. A steel press pin was pressed on the surface of the specimen under the force that made the stand of the press pin completely touch the specimen surface. The value was read 30 seconds after the press.

3. Results

The research results are divided into three parts. The first part shows the effects of crumb rubber content on the concrete properties, and the second part presents the impact of fly ash content on the properties of natural rubber. The third part displays the adhesion between the bonded rubber layer and the concrete added with crumb rubber.

3.1 Effects of crumb rubber content on the concrete properties

The concrete mixed with crumb rubber was prepared from Portland cement with a cure time of seven days. The effects of the substitution of crumb rubber for sand at 10, 20, 30, 40, and 50 percent by sand weight on density and compressive strength of the concrete were studied as shown in Figure 5 and Figure 6.

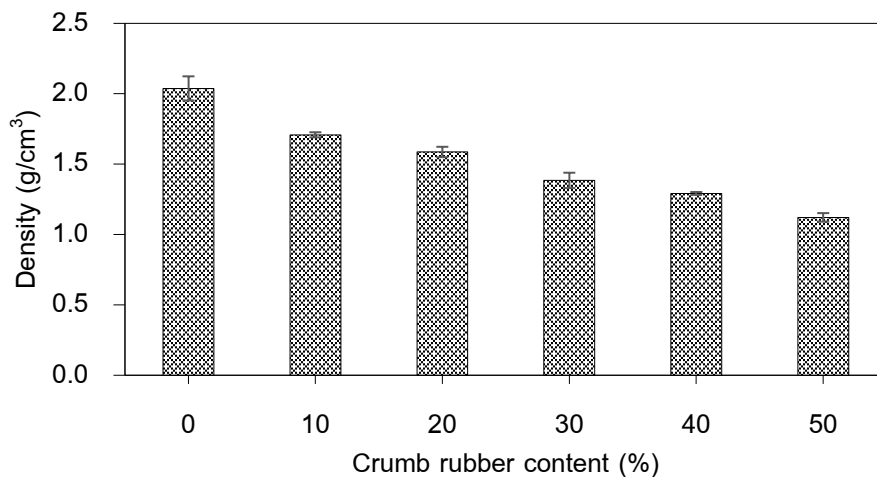


Figure 5 Density of concrete mixed with crumb rubber

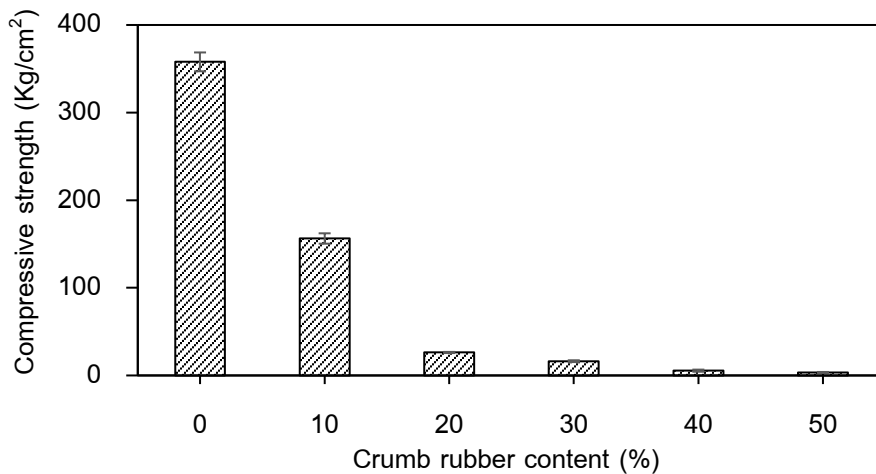


Figure 6 Compressive strength of concrete mixed with crumb rubber

Figure 5 shows the density of concrete mixed with crumb rubber. The increase of crumb rubber content results in the decrease of the concrete density as crumb rubber has 4.11 times less density than sand [11]. Moreover, more crumb rubber content causes more gaps in the concrete, resulting in less density.

Figure 6 illustrates the compressive strength of concrete mixed with crumb rubber. More crumb rubber content causes lesser compressive strength of the concrete. Since crumb rubber has more elasticity than sand, the compressive strength also decreases. Crumb rubber also has specific particle characteristics of ductility and elasticity. Hence, when it replaces sand, the compressive strength of the concrete decreases in relevance to the higher crumb rubber content. It is in line with a study by Amnuaypornlert et al. [3]. In their study, ceramic shavings were added to concrete to substitute fine aggregates and resulted in lower compressive strength of concrete.

The study of the morphology of concrete mixed with crumb rubber, as presented in Figure 7, found that the higher crumb rubber content resulted in uneven distribution of crumb rubber particles and discontinuity of cement phase, causing hole effect [7] between cement phase and crumb rubber. Therefore, the compressive strength of the cement decreases when crumb rubber content increases. However, with 10 percent of crumb rubber by sand weight, the morphology of cement still shows the continuity of cement phase without hole effect between the two phases. Consequently, cement mixed with 10 percent of crumb rubber by sand weight has the highest compressive strength.

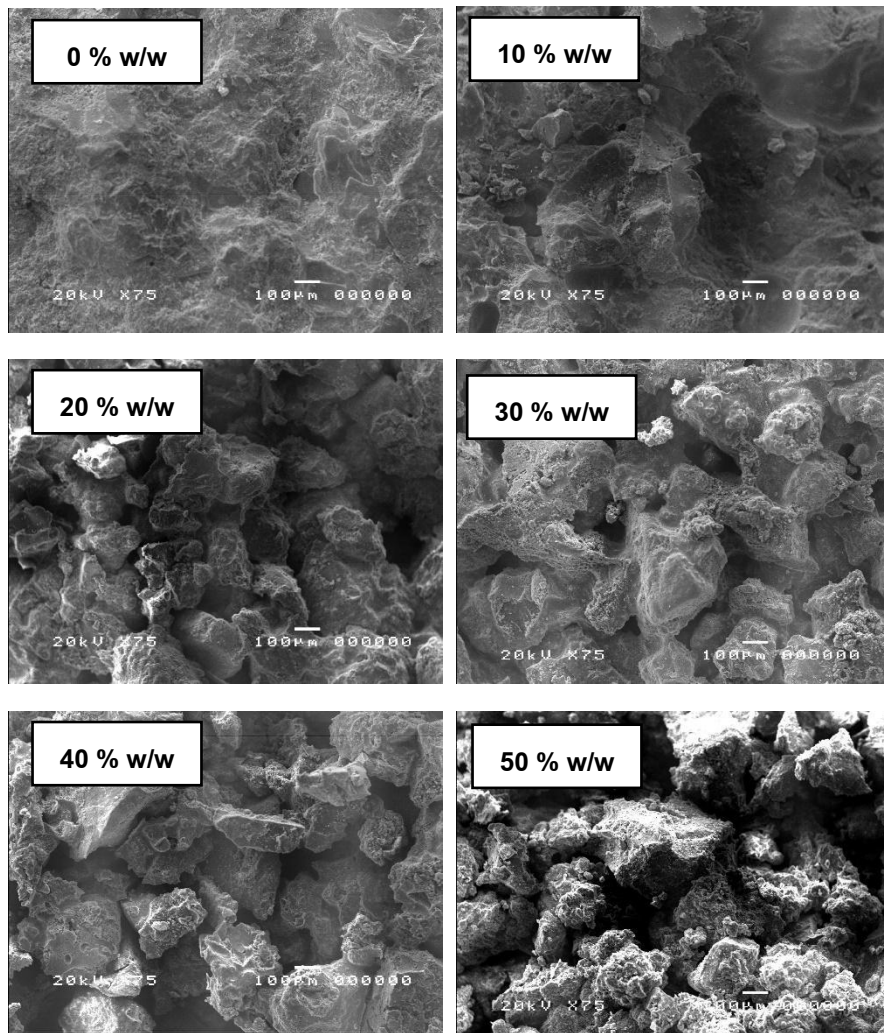


Figure 7 Morphology of concrete mixed with crumb rubber

3.2 Effects of Fly ash content on the properties of bonded rubber

3.2.1 The vulcanization properties of bonded rubber prepared from natural rubber with modified fly ash content are presented in Table 3. Scorch time (T_{S2}) and cure time (T_{C90}) of rubber compounds are not distinct when fly ash content increases. Similarly, Sombatsompop et al. [13] studied the effects of silica and fly ash content on the vulcanization of natural rubber and found that the higher silica content increased the cure time (T_{C90}). However, the higher fly ash content resulted in the stability of the cure time (T_{C90}). The cause of the stability of T_{S2} and T_{C90} is that the catalyst is absorbed to the surface of silica, resulting in an increase of T_{C90} . However, iron oxides, such as Al_2O_3 , Fe_2O_3 , and CaO in fly ash act as catalysts and

activators in the vulcanization process, making the T_{S2} and T_{C90} somewhat stable. Furthermore, the mentioned iron oxides cause an increase in M_H-M_L , which indicates the crosslink density of rubber when fly ash content becomes greater. Since iron oxides stimulate the effectiveness of the vulcanization reaction, the crosslink density also increases.

Table 3 Vulcanization properties of bonded rubber prepared from natural rubber with modified fly ash content

Fly ash content (phr)	Vulcanization properties				
	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	T_{S2} (min)	T_{C90} (min)
0	3.23±0.06	6.67±0.06	3.43±0.06	1.42±0.04	1.92±0.05
50	2.83±0.06	6.70±0.10	3.87±0.12	1.40±0.06	2.04±0.01
100	2.80±0.17	7.07±1.18	4.27±1.01	1.37±0.14	1.93±0.09
150	2.73±0.15	7.23±0.90	4.50±0.75	1.26±0.08	1.87±0.01

3.2.2 Mechanical properties of bonded rubber prepared from natural rubber with modified fly ash content

The effects of fly ash content on the tensile strength of bonded rubber are presented in Figure 8. Tensile strength decreases in accordance with the higher fly ash content when compared to the non-filler case. Interactions or acting forces between particles of fly ash and natural rubber have low strength because fly ash contains high polarity components, such as silicon dioxide (SiO_2) of as much as 24 percent [14] and other iron oxides. These high polarity components are different from those in natural rubber, which has lower polarity. Moreover, the addition of a higher amount of fly ash causes lesser continuity of the rubber phase, resulting in a decrease in rubber strength. Thus, the higher the fly ash content is, the lower the tensile strength of bonded rubber becomes.

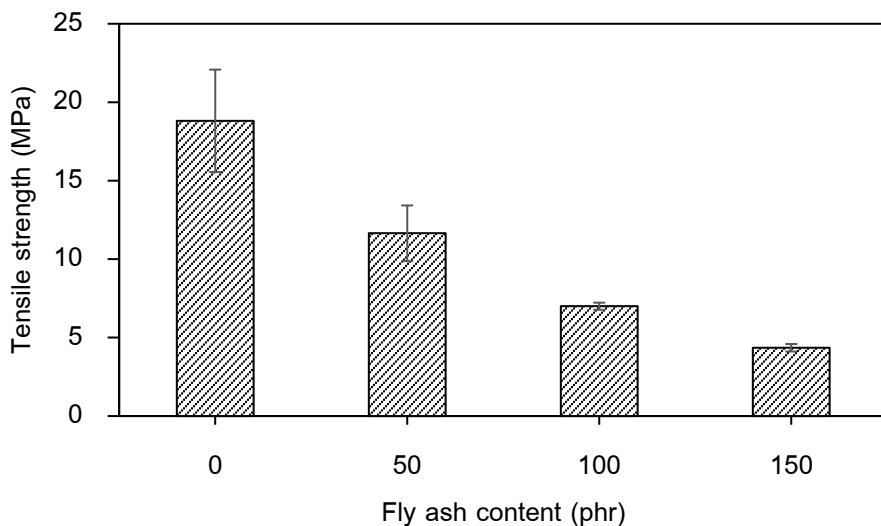


Figure 8 Tensile strength of bonded rubber

The effects of fly ash content on elongation at break of bonded rubber are displayed in Figure 9. Elongation at break decreases when fly ash content is higher. The elongation at break of bonded rubber with 150 phr of fly ash content decreases 49.77 percent, compared with the non-filler case. The elongation at break tends to decrease when fly ash content becomes greater since fly ash particles hinder the movement of rubber molecules, increasing brittleness. Besides, when adding more fly ash content, the continuation of the rubber cycle also decreases. Therefore, the elongation at break of the bonded rubber decreases. The morphology of fracture surface of bonded rubber prepared from natural rubber with modified fly ash content confirms the decrease of elongation at break as shown in Figure 10. The tensile strength test shows that an increase in fly ash content causes an apparent release of fly ash particles. It means that the interaction between the filler and rubber is considerably low [14] due to the incompatibility between natural rubber, which has a continuous phase, and fly ash used as filler.

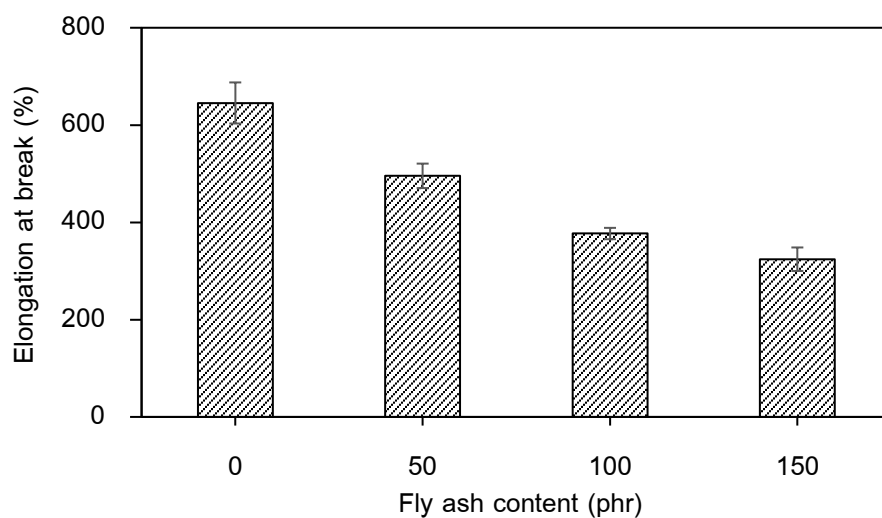


Figure 9 Elongation at break of bonded rubber

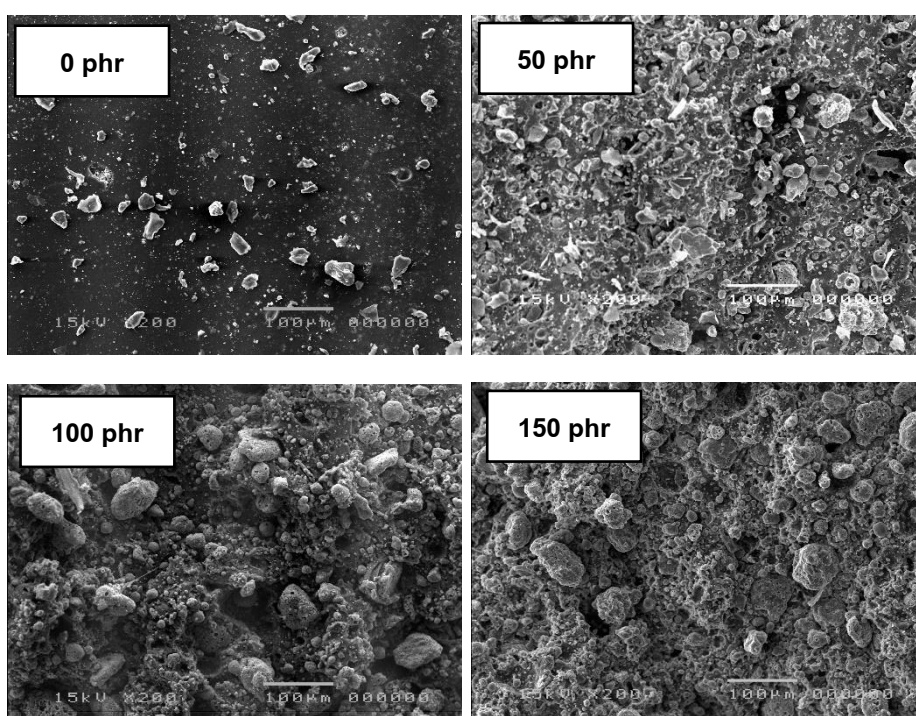


Figure 10 The morphology of fracture surface of bonded rubber prepared from natural rubber with modified fly ash content

The effects of fly ash content on the hardness and rebound resilience of bonded rubber as shown in Figure 11. Hardness tends to increase when fly ash content becomes higher as the fly ash particles hinder the movement of molecular chains of rubber. When the fly ash content increases, the elasticity of rubber decreases, resulting in higher hardness. Furthermore, hardness varies inversely to rebound resilience when compared with rubber without a filler.

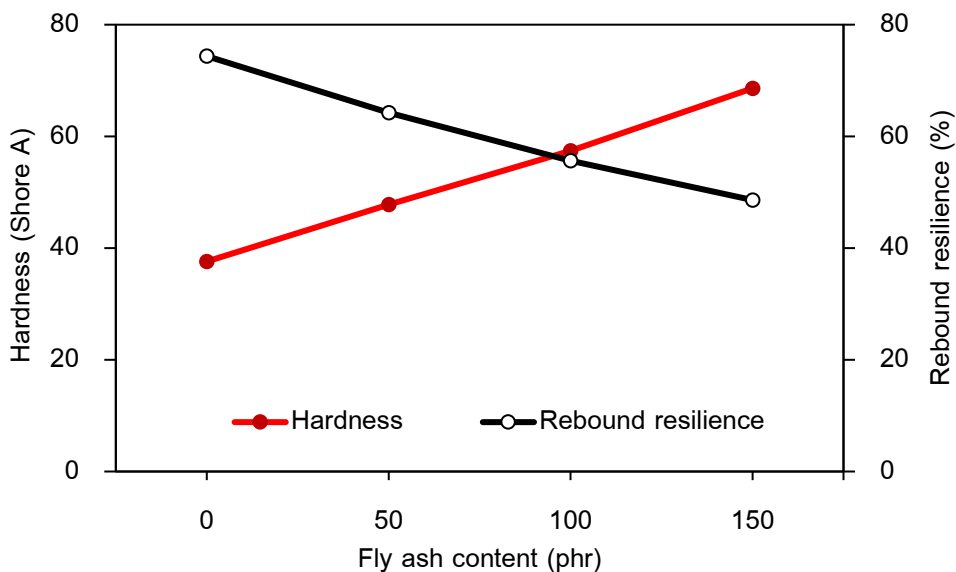


Figure 11 Hardness and rebound resilience of bonded rubber

3.3 The bond between bonded rubber and concrete mixed with crumb rubber

According to the study of the effects of crumb rubber on the concrete properties and fly ash content on natural rubber properties, the substitution of 10 percent crumb rubber for sand by sand weight is the appropriate crumb rubber content, resulting in the highest compressive strength. The proper fly ash content as bonded rubber is 50 and 100 phr, which results in hardness around 50 and 60 Shore A, respectively. It is consistent with the satisfaction survey of the elderly toward the hardness in the previous studies [1]. The test of the bond between bonded rubber and concrete mixed with crumb rubber applied the results obtained from the satisfaction survey. Bonded rubber could not adhere to the concrete mixed with crumb rubber, as shown in Figure 12, owing to the shrinkage of concrete from the

surface of bonded rubber with fly ash as a filler. The concrete shrinkage occurs because of the hydration reaction and moisture loss in the capillary pores, which change the concrete volume or the shrinkage of paste. The concrete shrinkage appears to decrease if admixtures can absorb water well [15]. However, the addition of crumb rubber, which is a low hydrophilic material, causes a higher level of concrete shrinkage. Moreover, bonded rubber mixed with fly ash content at 50 and 100 phr, which is commonly used as a hygroscopic material for mixing concrete, cannot absorb moisture from concrete because natural rubber has a continuous phase with a hydrophobic property and can have only 7.9 percent water swelling [16]. Therefore, no chemical reactions that cause the bond occur, resulting in considerably lower bonding strength between the two layers. Consequently, the design of bonded rubber characteristics to physically bond to concrete mixed with crumb rubber, as presented in Figure 13, has been initiated to benefit the making of shock-reducing paving blocks for the elderly. In the process of designing the green print referenced by the previous idea and was a concept to research of Vudjung et al. [1], resulted in shock-absorbing rubber as shown in Figure 14 (A) and formed into paving blocks as shown in Figure 14 (B). For the adhesion test, performed by lifting paving blocks off the ground by holding the shock-absorbing rubber part, the shock-absorbing rubber and concrete were found to be well attached together as shown in Figure 14 (C). Therefore, the knowledge gained from paving blocks research was put into practice at Ban Mad Town Hall, Muang Srikai Subdistrict, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani as shown in Figure 14 (D). It was found that the elderly commented that paving blocks were softer and more comfortable to walk onto than normal concrete blocks.



Figure 12 Concrete shrinkage from the surface of bonded rubber with fly ash as a filler

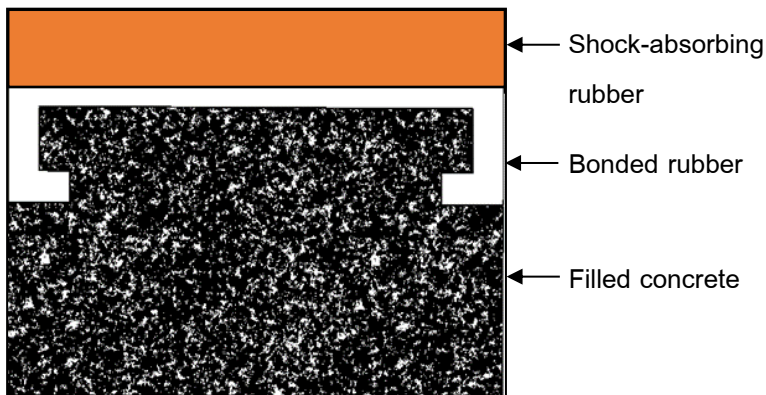


Figure 13 Cross-sectional image of a paving block



Figure 14 (A) Shock-absorbing rubber [1] (B) Paving blocks (C) Pulling adhesion test (D) Paving blocks test

4. Conclusion

Concrete density and compressive strength appear to decrease when crumb rubber content increases. The test shows that 10 percent crumb rubber content by sand weight results in the highest compressive strength. The vulcanization properties of bonded rubber with fly ash as a filler reveal that M_H - M_L increases when fly ash content becomes greater.

However, T_{S2} and T_{C90} appear somewhat stable. The test of mechanical properties of bonded rubber shows that although tensile strength, elongation at break, and rebound resilience tend to decrease when fly ash content becomes greater, hardness appears to increase. However, bonded rubber with fly ash as a filler cannot be chemically bonded with concrete mixed with crumb rubber. Therefore, it is recommended to design characteristics of bonded rubber to enhance its bonding with concrete mixed with crumb rubber.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Department of Chemistry Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Faculty of Agricultural and Industrial Technology and Research and Development Institute, Phetchabun Rajabhat University which supports the area of experimentation and testing tools. Finally, thank you Mr. Chaiwat Bamphen for being a research assistant

References

- [1] Vudjung C, Prasertsri S, Bamphen C, Krongyut C, Dokchan S, Chuppawa J. Rubber blocks flooring for elder: Effect of pre-vulcanization inhibitor on rubber block flooring properties. Science and Technology RMUTT Journal 2020;10(1):47-60 (In Thai)
- [2] Nitisuwanluksa N. Effects of polypropylene plastic ratio in autoclaved aerated concrete on compressive strenght and thermal conductivity. Kasem Bundit Engineering Journal 2016;6(1):174-87 (In Thai)
- [3] Amnuaypornlert S, Kanjanakaroon P, Samercher A. A study mechanical behavior of concrete mixed with ceramic fragments two size replaced in aggregate. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(2):157-82 (In Thai)
- [4] Tirasakkosol C, Rakkarn S, Klunkuarmdee A, Suparp S, Surakomol K. A study of pavements repaired by geotextile with asphaltic concrete in the area of administrative organization in chonburi province. Kasem Bundit Engineering Journal 2018;8(1):1-17 (In Thai)
- [5] Boonsung A. Compressive strength of paving block from the filtration sand used of water supply. Ladkrabang Engineering Journal 2011;28(4):25-31 (In Thai)

- [6] Sae-oui P. Applications of crumb rubber. Research and Development Centre for Thai Rubber Industry 2009;3(3):13 (In Thai)
- [7] Chaikaew C, Sukontasukkul P, Utainarumol S. Studies on the use of old tire resale powder in concrete, soft paving blocks. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2003. (In Thai)
- [8] Shu X, Huang B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. Construction and Building Materials 2014;67:217-24.
- [9] Krammart P. Basic properties of concrete with fly ash and limestone powder. Nakhon Nayok: Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2010. (In Thai)
- [10] Kijcharoenthanarak A. The use of lignite fly ash to make building materials products. Mae Moh Power Plant [Internet]. [cited 2021 Oct 1]. Available from: http://maemoh.egat.com/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=494 (In Thai)
- [11] Budnumpecth T, Tanpaiboonkul N. Properties of lightweight concrete containing crumb rubber and cement replacing with fly ash from coal power plant. Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University 2016;3(4):62-75 (In Thai)
- [12] Hanjitsuwan S, Phoo-ngernkham T, Chindaprasirt P. Study physical property of fly ash geopolymer paste containing Portland cement. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal 2013;6(1):60-9 (In Thai)
- [13] Sombatsompop N, Thongsang S, Markpin T, Wimolmala E. Fly ash particles and precipitated silica as fillers in rubbers. I. Untreated fillers in natural rubber and styrene-butadiene rubber compounds. Journal of Applied Polymer Science 2004;93(5):2119-30.
- [14] Yangthong H, Pichaiyut S, Jumrat S, Wisunthorn S, Nakason C. Novel natural rubber composites with geopolymer filler. Advances in Polymer Technology 2018;37(7):2651-62.
- [15] Markpiban P, Sahamitmongkol R. Effect of synthetic lightweight aggregate on early age shrinkage of mortar. Journal of Thailand Concrete Association 2019;7(2):25-35 (In Thai)
- [16] Vudjung C, Saengsuwan S. Biodegradable IPN hydrogels based on pre-vulcanized natural rubber and cassava starch as coating membrane for environment-friendly slow-release urea fertilizer. Journal of Polymers and the Environment 2018;26(9):3967-80.

Author's Profile



Chaiwute Vudjung He received the B. Eng. Degree in Polymer engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand, the M. Sci degree in Petrochemistry and polymer science from Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, respectively. Currently, he is an Assistant Professor at the Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand. His research interests are in rubber and polymer technology.



Suwimon Thiakthum She received the B.E. (2005) in degree Production Engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi, Master's degree (2007) of Food Engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi. She is a lecturer, Department of Production Engineering and management, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University. Research field: Polymer Technology, Manufacturing Processes.

Article History:

Received: October 28, 2021

Revised: December 22, 2021

Accepted: December 22, 2021

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดาร์	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.วัฒน์วงศ์ รัตนวราห์	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒน์ จิตตลดากร	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghamati	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 พลุประทุม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.จิรานุช เสี่ยมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ฐิติพร ประดับเพชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุ่ง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเกียรติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ธนพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ธนู ญะฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	รองอธิการบดี สายงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยธุรกิจ บัณฑิตย
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษษ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทวี หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โกคาร์ตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงห์หนักกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุศกิติ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วรพจน์ กริสุระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วัชระ เพียรสุภาพ	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.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน
รศ.วิญญู แสงวงสินกสิกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.คันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครตรกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วรินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก วิทยาเขตบางพระ

ผศ.ดร.กฤษณพล ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เชมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระชัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาศาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ติกะ บุญนา	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
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.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริดล ศิริขร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิธ วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนกร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลัยหล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
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	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรกร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สรัตน์ วงษ์ศรีชะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษชัย 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 ฤทธิ์หิรัญ	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.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะกรรมการจัดการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการจัดการ จัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.พิชิตต์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ภักดิ์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก
อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อ.ดร.ศรินทร์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเริง เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณ สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิม พระเกียรติ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ดร.พุทธิพงศ์ เหล่ารัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวรรณ ปล้องไหม	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต

อ.ณัฐนันท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทร์เรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.นิตมา 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