

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ISSN 2286-668X

KASEM BUNDIT

Engineering Journal

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2566
Vol.13 No.2 May - August 2023



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2566

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

Volume 13 No.2 May-August 2023

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

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

วัตถุประสงค์

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

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

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

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

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

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

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

ต้นฉบับบทความส่งมาที่ E-Mail: engkasemjournal@kbu.ac.th หรือ ผู้เขียนสามารถส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

หากมีปัญหาในการส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System โปรดติดต่อกองบรรณาธิการ ที่ 02-320-2777 ต่อ 1211

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่จะเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ 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
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บรรณาธิการ:

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

รองบรรณาธิการ:

ผศ.อนุชิต เจริญ	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.ภาวัต ไชยชาวนาทิก	ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยนวัตกรรมทางเทคโนโลยีและการขนส่ง อย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและ นวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghami	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สี่เฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันท์ รศ.ศันสนีย์ สุภาภา ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ	อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
อ.ธีรยุทธ จันท์แจ่ม	ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร	คุณรุ่งนภาพร ภูธรธราช
------------------	-----------------------

บทบรรณาธิการ

“วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต” เป็นวารสารที่ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลากว่า 13 ปี ปัจจุบันได้รับการยอมรับในฐานะ “วารสารกลุ่มที่ 1” ได้รับรองคุณภาพของวารสาร “ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2565 ไปจนถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2567” โดยมีกำหนดการเผยแพร่ทุก 4 เดือน (3 ฉบับต่อปี) นอกจากนี้ กองบรรณาธิการยังคงมุ่งมั่นในการปรับปรุงการดำเนินงาน ตลอดจนพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของวารสารอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถพัฒนาเข้าสู่ฐานข้อมูล ASEAN Citation Index (ACI) ใน พ.ศ. 2566 ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (ศูนย์ TCI) มีแนวคิดในการพัฒนาคุณภาพวารสารวิชาการไทย เพื่อเพิ่มศักยภาพการพัฒนางานวิจัยองค์ประกอบที่สำคัญประการหนึ่งคือ การดำเนินงานวารสารที่ถูกต้องตามหลักจริยธรรม และจรรยาบรรณ (publication ethics) ทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ จึงขอให้นักวิชาการ นักวิจัย และผู้เขียนทุกท่าน ไม่ดำเนินการตีพิมพ์ซ้ำ (duplications) มีข้อมูลการวิจัยซ้ำซ้อน (similarities) โดยไม่ได้รับอนุญาต และ/หรือ ไม่มีการอ้างอิงอย่างถูกต้อง

อนึ่ง ผลสัมฤทธิ์ในครั้งนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้หากขาดการสนับสนุนจากผลงานที่มีคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยจากนักวิชาการ นักวิจัย และผู้เขียนทุกท่าน รวมถึงคณะผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความที่กรุณาสันับสนุนการดำเนินงานของวารสารฯ เป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจนทีมงานกองบรรณาธิการฯ ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ทางกองบรรณาธิการขอยืนยันว่า กองบรรณาธิการยังคงมุ่งมั่นในการปรับปรุงการดำเนินงาน ตลอดจนพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของวารสารอย่างต่อเนื่อง และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อนักวิชาการ นักวิจัย ผู้เขียน และผู้อ่านในวงกว้างต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

- การพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิต กรณีศึกษา ขวดน้ำปลาไร้ไซเคิล
THE DEVELOPMENT OF THE PRODUCTION PROCESS TO INCREASE
PRODUCTIVITY: A CASE STUDY OF RECYCLED FISH SAUCE BOTTLES 1
พรทิพย์ เหลียวตระกูล และ ชัยนันท์ อินเี่ยม
- จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกระชายดำที่อบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศ
ร่วมกับไมโครเวฟ
DRYING KINETIC AND QUALITY OF BLACK KAEMPFERIA DRYING USING 21
MICROWAVE-VACUUM TECHNIQUE
จามร ภักดีศรีแพง ดวงสิริ สยมภาค และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์
- การพัฒนาระบบเตาเผาถ่านชีวมวลควบคุมระบบด้วยอินเทอร์เน็ตต่อฟิตติ้ง
A DEVELOPMENT OF BIOMASS CHARCOAL KILN SYSTEM CONTROL BY 42
INTERNET OF THINGS
ปฐมพงษ์ หอมศรี กมลวรรณ จิตจักร และ จิรวัฒน์ สิตรานนท์
- พฤติกรรมการรับกำลังของชิ้นส่วนคานหน้าตัดประกอบรูปตัวที
STRENGTH BEHAVIORS OF T-SHAPED COMPOSITE BEAM SECTIONS 63
นันทชัย ชูศิลป์ พงศ์ศักดิ์ สุขมณี และ ถาวร เกื้อสกุล
- การพยากรณ์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวแปรในการเชื่อม TIG ต่อสมบัติ
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
THE PREDICTION OF OPTIMAL PARAMETERS IN THE TIG WELDING OF 85
AISI 304 STAINLESS STEEL USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK
กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี ชีวพล นิตย่นรา จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร
และ พันทิวา พวงสาลี
- การศึกษาการเชื่อมโยงน้ำและความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการผลิตน้ำประปาของ
เมืองพัทยาในประเทศไทย
THE STUDY OF WATER-ENERGY NEXUS WITH WATER SUPPLY SYSTEM 107
OF PATTAYA CITY IN THAILAND
สุรศักดิ์ จันทร์ฉาย สุภรชชัย วรรัตน์ และ อำนาจ ผดุงศิลป์

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

แนวทางการออกแบบพื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลา

DESIGN GUIDELINES PUBLIC SPACE IN SONGKHLA MUNICIPALITY

124

ณัฐนิการ์ น้อยแสงยม และ ชลัท ทิพาการเกียรติ

อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาต่อการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง กรณีศึกษา:
เหล็กหัวสัฟ

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND TIME ON PLASMA NITRIDING
HARDENING OF BLUE HEAD STEEL

150

นภนต์ เกื้อน้อย จอมภพ ละออ จีรวัดณ์ ปลั่งใหม่ ประจักษ์ ลำจวน และ อุบลรัตน์
วาริวัฒน์

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดฝาเกลียวพลาสติกประเภทวัสดุ
โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพื่อลดปัญหาการหดตัว: กรณีศึกษา

OPTIMAL FACTOR ANALYSIS IN THE INJECTION PROCESS OF HIGH-
DENSITY POLYETHYLENE PLASTIC SCREW CAPS TO REDUCE
SHRINKAGE PROBLEMS: A CASE STUDY

162

ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง และ อติเรก ชัยนวกุล

การพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิต
กรณีศึกษา ขวดน้ำปลาไร้เชื้อ

THE DEVELOPMENT OF THE PRODUCTION PROCESS TO INCREASE
PRODUCTIVITY: A CASE STUDY OF RECYCLED FISH SAUCE BOTTLES

พรทิพย์ เหลียวตระกูล¹ และ ชัชชนันท์ อินเี่ยม²

¹อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา, 1061 ซอยอิสราภาพ 15 แขวงหิรัญรูจี เขตธนบุรี
กรุงเทพฯ 10600, pliewtrakul@hotmail.com

²อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา, 1061 ซอยอิสราภาพ 15 แขวงหิรัญรูจี
เขตธนบุรี กรุงเทพฯ 10600, c_iniam@hotmail.com

Pornthip Liewtrakul¹ and Chatchanan Iniam²

¹Lecturer, Information Technology and Data Science Program, Faculty of Science and
Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, 1061 Soi Issaraphab 15, Hirunrugi,
Thonburi, Bangkok 10600, Thailand, pliewtrakul@hotmail.com

²Lecturer, Automation Engineering Technology Program, Faculty of Engineering and
Industrial Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, 1061 Soi Issaraphab 15,
Hirunrugi, Thonburi, Bangkok 10600, Thailand, c_iniam@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตในกระบวนการผลิต กรณีศึกษา ขวดน้ำปลาไร้เชื้อ ซึ่งขอบเขตของงานวิจัยนี้ ครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการรับวัตถุดิบ คัดแยกผลิตภัณฑ์ การล้างทำความสะอาด จนกระทั่งบรรจุพร้อมส่งให้ลูกค้าต่อไป ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย (1) ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของขั้นตอนการทำงาน (2) วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและเสนอแนวทางแก้ปัญหาและปรับปรุงงาน (3) ทดลองปฏิบัติงานตามแนวทางที่นำเสนอ (4) วิเคราะห์ผลการดำเนินงานก่อน-หลังปรับปรุง (5) สรุปผล ซึ่งงานวิจัยนี้ เน้นการปรับปรุงเครื่องจักรใหม่และออกแบบวิธีการทำงานใหม่ ผลการศึกษาพบว่า อัตราผลิตภาพรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 36.0 อัตราผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 58.5 อัตราผลิตภาพวัตถุดิบเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.38 อัตราผลิตภาพแรงงาน

เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.50 ซึ่งแนวทางการปรับปรุงงานที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงการผลิตโดยรวมได้

คำสำคัญ: การพัฒนากระบวนการผลิต, การเพิ่มผลผลิต, ขวดน้ำปลารีไซเคิล

ABSTRACT

The objective of this research was to increase productivity in the production process, through a case study of recycled fish sauce bottles. The scope of this research contained raw material grouping, cleaning, and packaging for customers. The research methodology consisted of: (1) a Basic study of any information for working, (2) Fundamental data analysis and a way to problem-solving and work improvement, (3) an Experimental of the proposed guidelines, (4) an Analysis of operating results before and after improvement, (5) Conclusions. In this research, the emphasis is on improving machines and designing new working methods. This study found that the total productivity, labor productivity, material productivity, and energy productivity increased by 36%, 58.5%, 0.38%, and 8.50%, respectively. The research techniques obtained from this research can be applied to other industrial plants to improve overall production.

KEYWORDS: Development of the Production Process, Productivity, Recycled Fish Sauce Bottles

1. บทนำ

แก้วเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จากอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังคงเป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยม สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ขวดน้ำปลา เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่าการผลิตขวดใหม่ หรือซื้อขวดใหม่จากโรงงาน นอกจากนี้ ยังทนทานต่อความร้อนมากกว่าพลาสติก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย จากข้อมูลของบรรษัทเงินทุนอุตสาหกรรม [1] พบว่าการแข่งขันทางการตลาดและความต้องการของผู้บริโภค จากสถิติปี 2564 ปริมาณการบริโภคขวดแก้วในประเทศไทย มีจำนวนทั้งสิ้น 986,764 ตัน โดยแบ่งเป็นประเภทอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ในการผลิตขวดน้ำปลา 1 ตัน ต้องใช้วัตถุดิบประมาณ 1.2 ตัน ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้ สามารถจัดหาได้ภายในประเทศ ยกเว้น โซดาแอช ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เป็นผลให้มีความผันผวนทั้งในด้านราคาและปริมาณ นอกจากนี้ ในการผลิตขวดน้ำปลา ต้องใช้น้ำมันเตาในปริมาณสูง เนื่องจากว่า วัตถุดิบที่ใช้มีจุดหลอมเหลวสูง ประมาณ 1,450-1,600 องศาเซลเซียส

ดังนั้น เพื่อเป็นการลดการใช้วัตถุดิบและพลังงานในการผลิต จึงมีการนำขวดน้ำพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ ใน 3 แนวทาง คือ (1) ลดปริมาณการใช้ โดยผู้บริโภค ขวดน้ำพลาสติกใช้งานแล้ว มาใช้ซ้ำ (2) ใช้ซ้ำโดยผู้ผลิต ด้วยวิธีผ่านกลไกการเรียกบรรจุภัณฑ์คืนจากผู้บริโภคผ่านระบบมัดจำ หรือ ผู้ผลิตรับซื้อขวดน้ำพลาสติกจากร้านขายของเก่า เพื่อนำไปบรรจุสินค้าใหม่ (3) การรีไซเคิลเป็นการนำเศษแก้วมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ซึ่งช่วยลดพลังงาน เนื่องจากว่าเศษแก้วมีจุดหลอมเหลวประมาณ 900 องศาเซลเซียส

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการผลิต โดยเก็บข้อมูลจากโรงงานแห่งหนึ่ง ที่ตั้งอยู่ใน อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี ซึ่งเจ้าของโรงงานขอสงวนชื่อไว้ เพื่อรักษาภาพลักษณ์ที่ดี แต่อนุญาตให้เข้าศึกษากระบวนการทำงานทั้งหมดของการนำขวดแก้วกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการผลิตในโรงงานแห่งนี้ แบ่งได้ 3 สถานีงาน คือ สถานีงานคัดแยกขวด สถานีงานล้างขวด และสถานีงานบรรจุขวดลงในลัง เพื่อส่งให้โรงงานผลิตน้ำปลาต่อไป โดยแต่ละสถานีงานจะใช้แรงงานคนเป็นหลัก ซึ่งเครื่องมือช่วยทำงานที่สำคัญ คือ เครื่องล้างขวดน้ำปลา

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตขวดน้ำปลารีไซเคิล
- 2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากกระบวนการผลิตขวดน้ำปลารีไซเคิล
- 2.3 เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตขวดน้ำปลารีไซเคิล
- 2.4 เพื่อวัดประสิทธิภาพกระบวนการผลิตขวดน้ำปลารีไซเคิล

3. วัสดุและวิธีการ

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและปรับปรุงกระบวนการล้างขวดน้ำปลารีไซเคิล ในขั้นตอนการคัดแยกขวดน้ำปลา และขั้นตอนการล้างขวดน้ำปลา ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการในโรงงานกรณีศึกษา โดยนำเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม [2] เช่น แผนภูมิกระบวนการผลิต เทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H การออกแบบการทดลอง เป็นต้น นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต [3] โดยเริ่มจากการศึกษาแผนภูมิกระบวนการผลิตขวดน้ำปลารีไซเคิล (ก่อนปรับปรุง) ดังตารางที่ 1 และศึกษาแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิตขวดน้ำปลารีไซเคิล (ก่อนปรับปรุง) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 การศึกษาแผนภูมิกระบวนการผลิตขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ (ก่อนปรับปรุง)

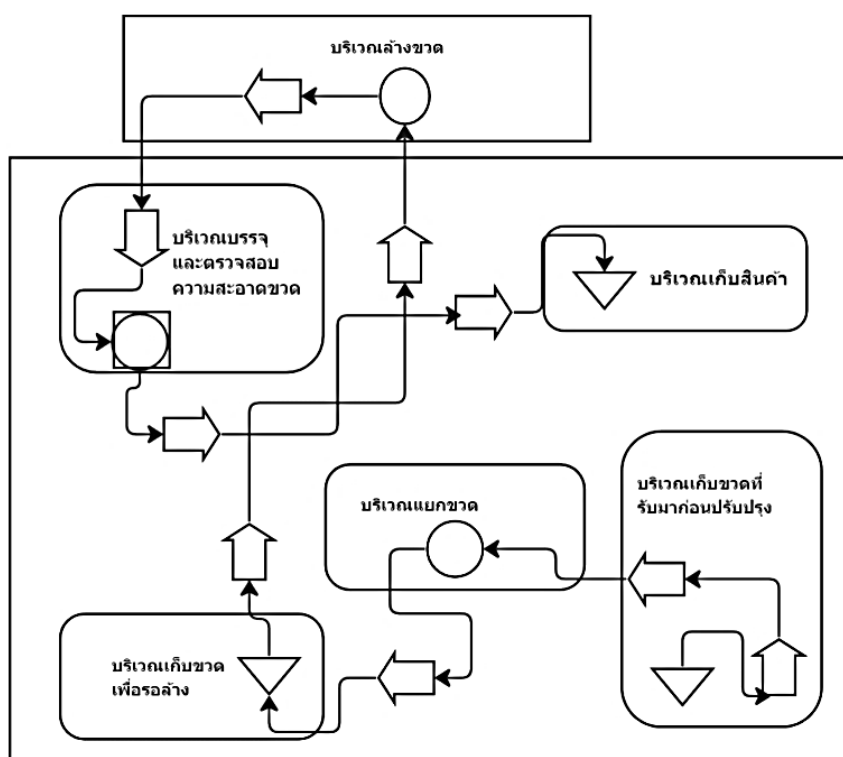
ขั้นตอนการทำงาน	สัญลักษณ์	ก่อนปรับปรุง	
		ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)
1. ขวดน้ำปลาถูกลำเลียงไปยังสถานีงานคัดแยก	⇒	18	300
2. ขวดน้ำปลาถูกแยกออกตามขนาด	○	4	60
3. ขวดน้ำปลาถูกลำเลียงไปที่เก็บขวด ตามประเภทที่แยกไว้	⇒	20	300
4. ขวดน้ำปลาที่แยกประเภทแล้ว ถูกลำเลียงไปยังสถานีงานล้างขวด	⇒	40	600
5. ขวดน้ำปลาถูกล้างทำความสะอาด	○	8	300
6. ขวดน้ำปลาถูกลำเลียงไปยังสถานีงานบรรจุขวด	⇒	7	180
7. ขวดน้ำปลาถูกตรวจสอบความสะอาดและบรรจุใส่ลัง	⊠	0	60
8. ขวดน้ำปลาถูกลำเลียงไปยังสถานที่เก็บ (โกดังเก็บสินค้า)	⇒	90	1,800
รวม		187	3,600

ตารางที่ 2 การศึกษาแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิตขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ (ก่อนปรับปรุง)

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต									
						สรุปผล			
							วิธีเดิม	วิธีที่เสนอ	ความแตกต่าง
ชื่อเรื่อง _ การล้างขวด					การทำงาน	4			
					การขนส่ง	5			
					การตรวจสอบ	0			
					การคอย	1			
					การเก็บรักษา	0			
แผนก _____ สถานีล้างขวด					ระยะทาง ม.	8			
หมายเลขแผนภูมิ _____					เวลา นาที	5.2			
เขียนโดย _____									
วันที่ _____ 3/3/2564									
ระยะทาง ม.	เวลา นาที	สัญลักษณ์		คำอธิบายการทำงาน					
1	0.3	●	○	→	□	▷	▽	ผสมสารซักล้างในน้ำ	
1	0.3	○	●	→	□	▷	▽	จุ่มขวดในอ่างน้ำ	
0	0.2	●	○	→	□	▷	▽	เปิดเครื่องล้าง	
0.5	0.2	●	○	→	□	▷	▽	เปิดน้ำ	
1	0.5	○	●	→	□	▷	▽	ยกขวดเสียบเข้าเครื่องล้าง	
0	1.5	●	○	→	□	▷	▽	ล้างขวด	
1	0.5	○	●	→	□	▷	▽	ดึงขวดออก	
1	0.5	○	●	→	□	▷	▽	คว่ำขวดเทน้ำออก	
0.5	0.2	○	●	→	□	▷	▽	คว่ำขวดในลัง	
2	1	○	●	→	□	▷	▽	นำขวดไปตาก	

หลังจากศึกษาแผนภูมิกระบวนการทำงาน แผนภูมิการไหลของการผลิตขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ (ก่อนปรับปรุง) แล้ว จึงนำมาประกอบวิเคราะห์แผนผังการทำงานของโรงงานผลิตขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ ดังรูปที่ 1

จากข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานผลิตขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ (ก่อนปรับปรุง) สามารถนำเทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H และหลักเกณฑ์ ECRS เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของขั้นตอนการทำงาน ในขั้นตอนการล้างทำความสะอาดภายในขวดได้ ดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของโรงงานผลิตขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ (ก่อนปรับปรุง)

ตารางที่ 3 คำถาม 5W1H ในขั้นตอนการล้างทำความสะอาดภายในขวด

หัวข้อ	5W1H	คำตอบ
วัตถุประสงค์	(What) ทำอะไร	ล้างทำความสะอาดภายในขวด
	(Why) ทำไมต้องทำ	ต้องการทำความสะอาดภายในขวด
สถานที่	(Where) สถานที่	จุดที่ตั้งเครื่องล้างขวดในสถานีงานล้างขวด
	(Why) ทำไมต้องทำที่นั่น	ต้องใช้เครื่องล้างขวดเป็นอุปกรณ์ช่วยทำงาน

ตารางที่ 3 คำถาม 5W1H ในขั้นตอนการล้างทำความสะอาดภายในขวด (ต่อ)

หัวข้อ	5W1H	คำตอบ
ลำดับ	(When) ทำเมื่อไร	ทำหลังจากล้างทำความสะอาดภายนอกขวด
	(Why) ทำไมถึงทำเมื่อนั้น	เมื่อทำความสะอาดภายนอกเสร็จ ผู้ปฏิบัติงานจะใส่น้ำในขวด เพื่อช่วยทำความสะอาดในขั้นตอนล้างทำความสะอาดภายในขวด
วิธีการ	(How) ทำอย่างไร	นำขวดเข้าไปใส่ในแปรงที่กำลังหมุนอยู่
	(Why) ทำไม	ให้แปรงช่วยทำความสะอาดภายในขวด

จากตารางที่ 3 เทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H พบปัญหาที่เกิดขึ้น 2 ประเด็น คือ 1) ทุกครั้งที่ล้างขวดผู้ใช้ต้องคว่ำขวดเพื่อเทน้ำทิ้งทุกครั้ง ซึ่งแนวทางแก้ไขคือ การเปลี่ยนแนวการล้างเป็นแบบแนวตั้งและใช้วิธีคว่ำขวด และ 2) ใช้เวลาในการล้างขวดแต่ละใบนานทำให้ได้ผลผลิตน้อย ดังนั้นต้องปรับปรุงเครื่องล้างให้สามารถใส่ขวดได้ครั้งละหลาย ๆ ใบ

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของโรงงานแห่งนี้ มีขวดหลากหลายชนิด เวลาที่ใช้ในการทำงานจึงไม่เท่ากัน ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์อัตราผลิตภาพแรงงานมีความแม่นยำยิ่งขึ้น จึงวัดอัตราผลิตภาพในแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยใช้สมการเพื่อประกอบการวิเคราะห์ ดังนี้

$$\text{อัตราผลิตภาพของผลิตภัณฑ์} = \frac{\text{จำนวนผลิตภัณฑ์ (ขวด)}}{\text{จำนวนแรงงาน (คน - วัน)}} \quad (1)$$

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนผันแปรทั้ง 2 ประเภท มีวิธีการคำนวณดังนี้

1) การวิเคราะห์ต้นทุนผันแปร สามารถแจกแจงลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้ มีวิธีการคำนวณดังนี้

ก) ค่าแรงต่อขวด คือ ค่าแรงที่ได้รับ โดยคำนวณจากจำนวนขวดที่ล้างได้ ค่าแรงต่อขวด

ข) ต้นทุนวัตถุดิบ (ขวด) เริ่มจากชั่งน้ำหนักขวดแต่ละชนิด ต้นทุนของขวดชนิดนั้น 1 กิโลกรัม ราคา 0.70 บาท เช่น ขวดสี 1 ขวด มีน้ำหนัก 391.28 กรัม ถ้าต้องการซื้อขวดน้ำหนัก กิโลกรัม (1,000 กรัม) จะต้องซื้อในราคา 0.70 บาท ดังนั้น หากซื้อขวด 1 ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 391.28 กรัม จะต้องซื้อในราคา $(0.70 \times 391.21) / 1,000 = 0.27$ บาท ดังนั้นขวดมีต้นทุน 0.27 บาท/ขวด

ค) ค่าล้างสำหรับบรรจุขวด คำนวณจากค่าเฉลี่ยราคาล้างต่อจำนวนขวดที่บรรจุลงในถัง ราคาใบละ 4.50 บาท สามารถบรรจุได้ 100 ขวด ดังนั้นขวดสี 1 ขวด มีต้นทุนสำหรับบรรจุ $4.50 / 100 = 0.045$ บาท

2) ต้นทุนผันแปรซึ่งไม่สามารถแจกแจงลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้ เริ่มจากรวบรวมค่าไฟฟ้า ค่าผงซักฟอก ค่าแรงล้างขวด และจำนวนขวดที่ล้างได้ในช่วงระยะเวลา 4 เดือน ดังนี้

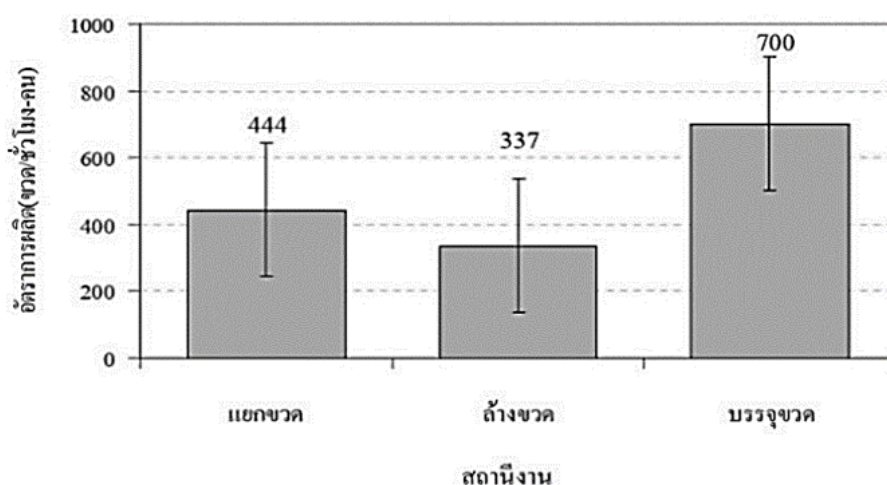
ก) ค่าไฟฟ้า ซึ่งได้จากใบเสร็จรับเงินที่โรงงานได้จ่ายไป นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยต่อจำนวนขวด

ข) ค่าผงซักฟอก คำนวณจากค่าเฉลี่ยของค่าผงซักฟอกต่อจำนวนขวด

ค) ค่าแรงล้างขวด คำนวณจากค่าเฉลี่ยของค่าแรงล้างขวดต่อจำนวนขวด

จากข้อมูลทั่วไปของโรงงาน พบว่า กระบวนการทำงานของโรงงานแห่งนี้ ประกอบด้วย 3 สถานีการทำงาน คือ สถานีงานแยกขวด สถานีงานล้างทำความสะอาด และสถานีงานบรรจุขวดลงลัง โดยมีจำนวนแรงงานในแต่ละสถานีได้แก่ สถานีแยกขวด 4 คน สถานีล้างขวด 8 คน และสถานีบรรจุขวด 3 คน

เมื่อทดลองจับเวลาในแต่ละสถานี พบว่าสถานีล้างขวดมีกำลังการผลิตต่ำสุด ดังนั้น เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ควรเลือกสถานีงานที่มีความจำเป็นเร่งด่วนมาปรับปรุงก่อน ซึ่งการเลือกสถานีงานเพื่อปรับปรุง ใช้วิธีการวัดอัตราการผลิตในแต่ละสถานีการทำงาน เพื่อพิจารณาถึงความจำเป็นเร่งด่วน ผลการวัดอัตราการผลิตแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิแท่งแสดงอัตราการผลิตในแต่ละสถานีการทำงานก่อนปรับปรุง

จากรูปที่ 2 พบว่า อัตราการผลิตในสถานีงานล้างทำความสะอาดมีอัตราการผลิตต่ำที่สุด รองลงมาคือสถานีงานแยกขวดและสถานีงานบรรจุขวดลงลัง ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ จึงเลือกงานในสถานีงานล้างทำความสะอาดและงานในสถานีงานแยกขวดมาทำการศึกษา เพื่อปรับปรุงการทำงานให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจากการค้นหาประเด็นการปรับปรุง พบว่า โรงงานแห่งนี้มีปัญหาอัตราผลิตภาพแรงงานลดลง ดังนั้น ควรมีการปรับปรุงงานในส่วนของแรงงาน เพื่อให้อัตราผลิต

ภาพแรงงานเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ การปรับปรุงงานควรคำนึงถึงต้นทุนของค่าผงซักฟอก ค่าแรงล้างขวด ค่าไฟฟ้า เพราะต้นทุนเหล่านี้สามารถลดได้ด้วยการปรับปรุงงาน ซึ่งสถานงานที่ควรปรับปรุงเร่งด่วน คือ สถานงานแยกขวดและสถานงานล้างขวด

ผลการวิเคราะห์แผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทคน หลังปรับปรุงวิธีการทำงาน คาดว่า ผลผลิตจะเพิ่มขึ้น ดังนั้น วิธีการทางสถิติจึงถูกนำมาใช้ โดยเปรียบเทียบอัตราการผลิต (ขวด/ชั่วโมง-คน) เป็นระยะเวลา 15 วัน โดยทดสอบสมมติฐานการทดลอง คือ

การทดสอบสมมติฐานใช้ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม Minitab® แสดงผลการเก็บข้อมูล ในระยะเวลา 15 วัน พบว่า ก่อนการปรับปรุงมีอัตราการผลิต ณ สถานงานล้างขวด มีค่าเฉลี่ย (ขวด/ชั่วโมง-คน) เท่ากับ 442.4 แต่ภายหลังการปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 575.3 นอกจากนี้ ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ตั้งไว้ สรุปได้ว่า อัตราการผลิตที่ได้จากการปรับปรุงสถานที่ทำงานแบบใหม่มากกว่าอัตราผลิตที่ได้จากสถานที่ทำงานแบบเดิมที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากข้อมูลอัตราการผลิต พบว่า ในโรงงานแห่งนี้ สถานงานล้างขวดเป็นสถานงานที่ควรได้รับการปรับปรุงอย่างเร่งด่วน ขั้นตอนการปรับปรุงงานในสถานงานดังกล่าว เริ่มจากการวิเคราะห์สภาพปัจจุบันของสถานงาน ซึ่งจุดประสงค์หลักของสถานงานนี้ คือ ล้างทำความสะอาดขวด การวิเคราะห์กระบวนการทำงานใช้แผนภูมิกระบวนการผลิต ประเภทวัสดุ (ขวด)

ผลการวิเคราะห์แผนภูมิกระบวนการผลิตและการสังเกตวิธีการทำงาน คือ ขวดจะถูกทำความสะอาดภายใน โดยเครื่องล้างขวด ซึ่งแปรงล้างขวดจะหมุนด้วยมอเตอร์ ขณะเดียวกันผู้ปฏิบัติงานจะนำปากขวดไปจ่อที่แปรงล้างขวด แล้วดันขวด เพื่อให้แปรงล้างขวดเข้าไปทำความสะอาดภายในขวด ผู้ปฏิบัติงานจะขยับขวดขึ้น-ลง เพื่อให้แปรงล้างทำความสะอาดภายในขวด จากนั้นจึงดึงขวดออกแล้วนำไปแช่ในน้ำสะอาด โดยขั้นตอนการทำความสะอาดภายในขวดนี้ ใช้เวลาเฉลี่ย 5 นาที

ต่อจากนั้น จึงเป็นขั้นตอนการกำหนดแนวทางการปรับปรุงงาน ใช้เทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของขั้นตอนการทำงาน ประกอบกับการสังเกตวิธีการทำงาน เพื่อทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น และนำหลักเกณฑ์ ECRS มาปรับปรุง ผลการกำหนดแนวทางการปรับปรุงงาน สำหรับกระบวนการล้างขวด ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คำถาม 5W1H ในขั้นตอนการล้างทำความสะอาดภายในขวด

หัวข้อ	5W1H	คำตอบ
วัตถุประสงค์	(What) ทำอะไร	ล้างทำความสะอาดภายในขวด
	(Why) ทำไมต้องทำ	ต้องการทำความสะอาดภายในขวด
สถานที่	(Where) สถานที่	จุดที่ตั้งเครื่องล้างขวดในสถานีนงานล้างขวด
	(Why) ทำไมต้องทำที่นั่น	ต้องใช้เครื่องล้างขวดเป็นอุปกรณ์ช่วยทำงาน
ลำดับ	(When) ทำเมื่อไร	ทำหลังจากล้างทำความสะอาดภายนอกขวด
	(Why) ทำไมถึงทำเมื่อนั้น	เมื่อทำความสะอาดภายนอกเสร็จ ผู้ปฏิบัติงานจะใส่น้ำในขวดเพื่อช่วยทำความสะอาดในขั้นตอนล้างทำความสะอาดภายในขวด
วิธีการ	(How) ทำอย่างไร	นำขวดเข้าไปใส่ในแปรงที่กำลังหมุนอยู่
	(Why) ทำไม	ให้แปรงช่วยทำความสะอาดภายในขวด

จากตารางที่ 4 เทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H พบปัญหาที่เกิดขึ้น 2 ประเด็น คือ 1) ขนแปรงล้างขวดลักษณะแข็ง และใหญ่กว่าปากขวด ต้องออกแรงดันขวด เพื่อให้ขนแปรงสามารถเข้าไปทำความสะอาดภายในขวด และต้องออกแรงดึงขวดเพื่อให้ขนแปรงออกมา ส่งผลให้ผู้ปฏิบัติงานบางคนมีอาการปวดเมื่อยบริเวณแขนหลังจากการทำงานเสร็จ ซึ่งแนวทางแก้ไขคือ การนำแปรงล้างขวดที่ขนแปรงมีลักษณะอ่อนมาใช้ และ 2) เมื่อล้างไปแล้วประมาณ 100 ขวด แปรงล้างขวดจะเกิดการงอตัว เพราะผู้ปฏิบัติงานต้องขยับขวดขึ้น-ลง เพื่อทำความสะอาดภายในเป็นผลให้ต้องเล็งปากขวดให้ตรงกับแปรงขณะดันขวด ดังนั้น ต้องนำอุปกรณ์อื่นมาใช้ เพื่อทดแทนแปรงล้างขวด

จากการศึกษากระบวนการทุกขั้นตอน สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางแก้ไขปัญหาดังต่อไปนี้

1) ผู้ปฏิบัติงานมีอาการแสบร้อนที่มือหลังจากปฏิบัติงาน ซึ่งมีสาเหตุจากการสัมผัสกับผงซักฟอกเป็นเวลานาน แนวทางการปรับปรุง คือ นำสารทำความสะอาดชนิดอื่นมาใช้ทดแทนผงซักฟอก

2) ภายในสถานีนงาน มีการจัดวางตำแหน่งไม่เหมาะสม ส่งผลให้ผู้ปฏิบัติงานต้องมีการเคลื่อนที่โดยไม่จำเป็น แนวทางการปรับปรุง คือ จัดวางแผนผังการทำงานในสถานีนงานใหม่ ให้อยู่ในระยะทำงาน

3) เครื่องล้างขวดที่ใช้ขณะก่อนปรับปรุง ไม่มีความปลอดภัย นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ท่าทางการทำงานของผู้ปฏิบัติงานไม่เหมาะสม แนวทางการปรับปรุง คือ ออกแบบเครื่องล้างขวดใหม่

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การหาแนวทางการปรับปรุงงาน สามารถแบ่งการปรับปรุงงานในสถานงานล้างขวด เป็น 2 ส่วน คือ (1) ออกแบบเครื่องล้างขวดให้เหมาะสมกับผู้ปฏิบัติงาน (2) เปลี่ยนสารทำความสะอาด เพื่อทดแทนผงซักฟอก การปรับปรุงงานทั้ง 2 ส่วน มีดังนี้

เครื่องล้างขวด เป็นอุปกรณ์ช่วยทำงานที่มีความสำคัญสำหรับโรงงานแห่งนี้ แต่เครื่องล้างขวดที่ใช้ขณะก่อนปรับปรุง ยังไม่มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานเท่าที่ควร นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ท่าทางการทำงานของผู้ปฏิบัติงานซึ่งใช้เครื่องล้างขวด ขณะก่อนปรับปรุง พบว่า ท่าทางการทำงานไม่เหมาะสม ดังนั้น การปรับปรุงเครื่องล้างขวดให้มีความปลอดภัยและออกแบบท่าทางการทำงานให้เหมาะสม ควรดำเนินการควบคู่กัน โดยมีผลการเปรียบเทียบการทำงานในสถานงานล้างขวด ก่อนปรับปรุงงาน กับหลังปรับปรุงงานในประเด็นต่าง ๆ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบการทำงานในสถานงานล้างขวดก่อนปรับปรุงงานกับหลังปรับปรุงงานในประเด็นต่าง ๆ

ประเด็นเปรียบเทียบ	ก่อนปรับปรุงงาน	หลังปรับปรุงงาน
1. ลำเลียงขวดจากสถานที่จัดเก็บขวดที่แยกประเภทแล้วมายังสถานงานล้างขวด	ผู้ปฏิบัติงานลำเลียงด้วยรถเข็น	คงเดิมไว้
2. ขวดถูกล้างทำความสะอาดภายนอก	ใช้แรงงานคนทำความสะอาด	ยังคงเดิมไว้
3. ขวดถูกใส่เข่งรองล้างภายในขวด	เมื่อล้างภายนอกขวดเสร็จ จะนำขวดใส่เข่งเพื่อรองล้างภายในขวด	ตัดออกไป
4. เลื่อนเข่งไปยังเครื่องล้างขวด	ใช้แรงงานคน	ตัดออกไป
5. ทำความสะอาดภายในขวด	แปรงล้างขวดทำความสะอาดภายในขวด	แรงฉีดน้ำทำความสะอาดภายในขวด
6. ขวดถูกแช่ในบ่อเพื่อล้างน้ำสะอาด	นำขวดซึ่งทำความสะอาดภายในเสร็จ แช่ในบ่อเพื่อล้างผงซักฟอก	ตัดออกไป

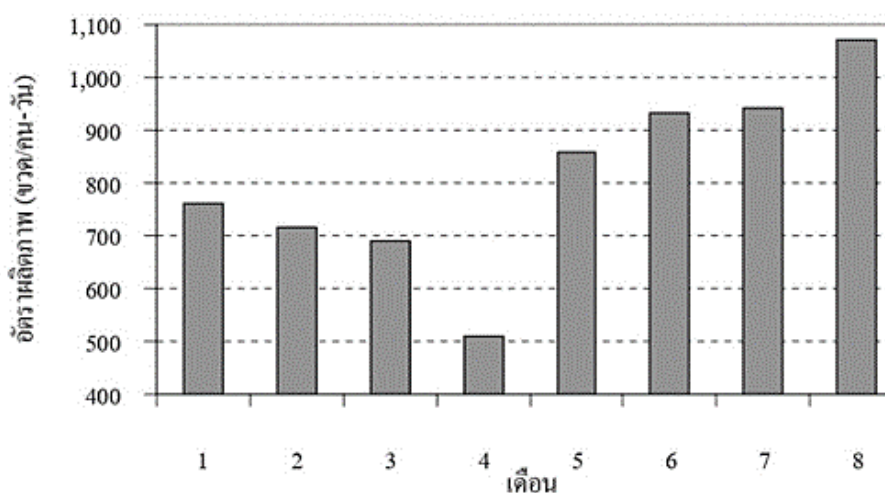
4. ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ปัญหาของโรงงานผลิตน้ำปลาแต่เดิม ใช้แรงงานคนในการล้างขวดด้วยวิธีการจ้าง โดยคิดตามสัดส่วนตารางกำหนดค่าแรงงานขวดแยกตามขนาด ดังตารางที่ 2 เช่น แรงงาน 1 คน ล้างขวดน้ำปลา 500 ขวด จ่ายค่าแรง 160 บาท

ข้อมูลอัตราผลิตภาพ ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการผลิตของโรงงานก่อนการปรับปรุง โดยการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำการวัดอัตราผลิตภาพรวมมาใช้ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของโรงงานในภาพรวม [4] โดยใช้การคำนวณดัชนีการเพิ่มผลผลิต ดังสมการที่ 2

$$\text{ดัชนีการเพิ่มผลผลิต} = \frac{\text{อัตราผลิตภาพเดือนที่วิเคราะห์}}{\text{อัตราผลิตภาพในเดือนฐาน}} \quad (2)$$

ผลจากการคำนวณดัชนีอัตราผลิตภาพรวม (หลังปรับปรุง) พบว่า ดัชนีผลิตภาพมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่เดือนฐานเป็นต้นมา แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพโดยรวมของปัจจัยการผลิตภายในโรงงานลดลง เมื่อเทียบกับเดือนฐาน (ก่อนปรับปรุง) ดังนั้น เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของดัชนีผลิตภาพโดยรวมที่ลดต่ำลงและใช้สมการผลิตภาพ ผลการวิเคราะห์และสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง พบว่า อัตราผลิตภาพของแต่ละปัจจัยการผลิต แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ดัชนีผลิตภาพรวม เดือนที่ 1-4 (ก่อนปรับปรุง) เดือนที่ 5-8 (หลังปรับปรุง)

ผลการทดสอบสมมติฐาน พบว่า การปรับปรุงการทำงานในสถานงานแยกขวด และสถานงานล้างขวด สามารถเพิ่มผลผลิตได้ เมื่อวิเคราะห์กระบวนการทำงานด้วยแผนภูมิกระบวนการผลิต พบว่า การล้างขวดจำนวน 800 ขวด ระยะทางการเคลื่อนที่ของวัสดุ (ขวด) ลดลงโดยเฉลี่ย 26 เมตร หรือ 61.9% ระยะเวลาในการทำงานลดลง โดยเฉลี่ย 360 วินาที หรือ 54.54% ดังนั้น จึงนำวิธีการทำงานซึ่งปรับปรุงแล้ว มาทดลองใช้ในโรงงานเป็นระยะเวลา 4 เดือน ผลการเก็บข้อมูลดัชนีผลิตภาพรวม พบว่า การปรับปรุงดัชนีผลิตภาพรวม 4 เดือนหลัง ดัชนีผลิตภาพรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 36% เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุง ผลการวิเคราะห์อัตราผลิตภาพในแต่ละปัจจัยการผลิตมีดังนี้

1) อัตราผลิตภาพวัตถุดิบ ก่อนปรับปรุงในเดือนที่ 1-4 เฉลี่ย 2.58 หลังปรับปรุงในเดือนที่ 5-8 เฉลี่ย 2.59 หรือเพิ่มขึ้น 0.38%

2) อัตราผลิตภาพแรงงาน มีการปรับปรุงวิธีการทำงาน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทำงานง่ายขึ้น อาการปวดเมื่อยและอาการแสบร้อนที่มือของผู้ปฏิบัติงานล้างขวดหายไป ทำให้อัตราผลิตภาพแรงงาน

เพิ่มขึ้นจากเดิม ก่อนปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.89 หลังปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยที่ 2.99 หรือเพิ่มขึ้น 58.5% ดังนั้นการเพิ่มผลผลิตของแรงงาน พบว่า อัตราผลิตภาพแรงงานต่ำกว่าเดือนที่ 1 ซึ่งเป็นเดือนฐาน

จากการวิเคราะห์ต้นทุนการดำเนินงาน มีอัตราการเพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงกระบวนการทำงาน การลดต้นทุนการดำเนินงานมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราผลิตภาพได้นำต้นทุนการดำเนินงานมาใช้ เพื่อให้โรงงานทราบถึงต้นทุนการดำเนินงาน อันนำไปสู่การลดต้นทุนควบคู่ไปกับการเพิ่มผลผลิต จึงต้องทำการวิเคราะห์ต้นทุนการดำเนินงาน ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ต้นทุนการดำเนินงาน ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

1) ต้นทุนผันแปร [5] ซึ่งสามารถแจกแจงลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้ ประกอบด้วย ค่าแรงต่อขวด หากเป็นขวดใสขนาดกลางและใหญ่ ค่าแรงต่อขวดเท่ากับ 0.20 บาท ขวดเล็กและขวดสีชาใหญ่ ราคาต่อขวดเท่ากับ 0.25 บาท ส่วนขวดสีชากลาง มีค่าเท่ากับ 0.15 บาท นอกจากนี้ ยังมีค่าลังบรรจุขวด ค่าวัตถุดิบ (ขวดน้ำปาร์ไซเคิล) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 6-7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 จำนวนผลิตภัณฑ์ในช่วงระยะเวลา 4 เดือนก่อนปรับปรุง

รายการ	เดือน				รวม
	1	2	3	4	
จำนวนผลิตภัณฑ์ (ขวด)	51,563	80,906	50,600	49,002	232,071

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนผันแปร

รายการ	เดือน				รวม	ต้นทุน (บาท/ขวด)
	1	2	3	4		
ค่าแรงล้างขวด (บาท)	7,175	12,588	5,330	3,990	29,083	0.125
ค่าผงซักฟอก (บาท)	1,218	2,135	904	676	4,933	0.020
ค่าเชือกฟาง (บาท)	500	1,000	300	200	2,500	0.010
ค่าน้ำประปา (บาท)	5,284	6,697	4,938	4,692	21,611	0.093
ค่าไฟฟ้า (บาท)	10,074	11,884	8,796	7,596	38,350	0.165

หมายเหตุ: ลังที่ใช้ในการบรรจุขวดน้ำปาร์ไซเคิล เป็นลังหมุนเวียน จึงไม่มีค่าใช้จ่าย

จากแนวทางการปรับปรุงกระบวนการทำงาน พบประเด็นสำคัญดังนี้

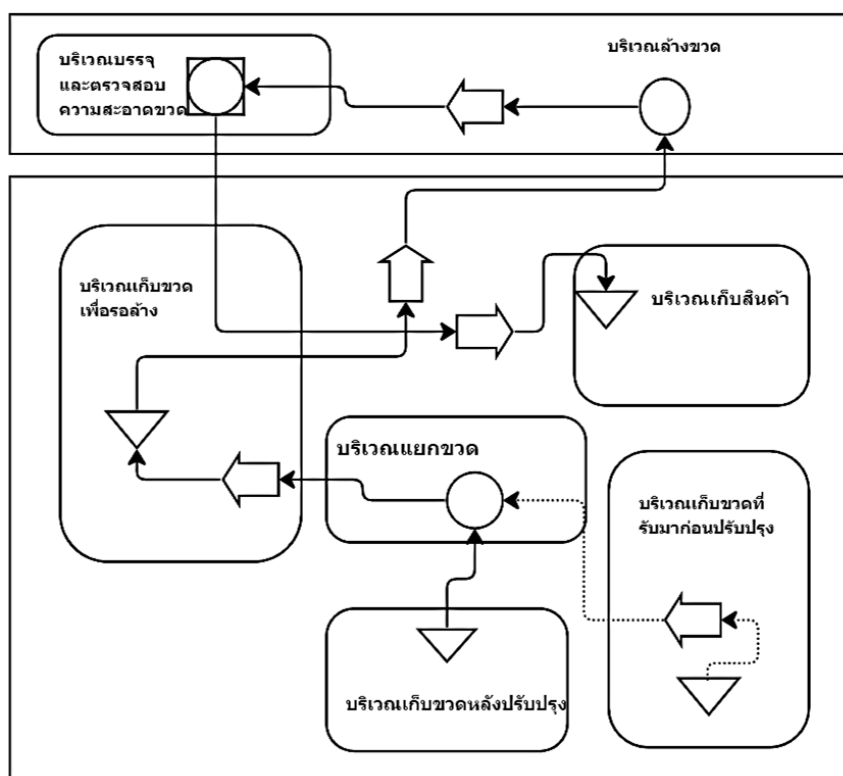
1) ลดระยะทางการลำเลียงวัตถุดิบ (ขวดน้ำปาร์ไซเคิล) จากสถานที่จัดเก็บขวดมายังสถานีงานแยกขวด โดยเปลี่ยนวิธีการทำงานจากเดิม สถานที่จัดเก็บขวดเป็นสถานที่ซื้อ-ขายขวด

หลังจากซื้อ-ขายเสร็จจะนำขวดไปเก็บในสถานที่ดังกล่าว เปลี่ยนเป็นซื้อ-ขายขวดในสถานีนงานแยกขวด หลังจากซื้อขายเสร็จจะนำขวดเทลงบนโต๊ะทำงานทันที แต่หากโต๊ะทำงานไม่สามารถรองรับจำนวนขวดได้เพียงพอ ให้วางไว้ใกล้กับโต๊ะทำงานเพื่อลดระยะทางในการลำเลียง

2) ปรับปรุงขั้นตอนแยกประเภทขวดที่ต้องการนำไปใส่ในลังที่จัดเตรียมไว้ให้ง่ายขึ้น จากเดิมที่ไม่มีการกำหนดตำแหน่งการวางลัง เพื่อใส่ขวดที่ผู้ปฏิบัติงานเลือกมาจากโต๊ะทำงาน ให้เปลี่ยนเป็นการกำหนดตำแหน่งการวางลังดังกล่าว

3) ปรับปรุงเครื่องล้างขวดแบบใหม่ (แนวตั้ง) ซึ่งเครื่องล้างขวดแบบเก่า (แนวนอน) ผู้ล้างขวดต้องสอดขวดไปตามแปรงล้างขวดแนวนอน เมื่อการล้างเสร็จจลื่น จำเป็นต้องดึงขวดออกมาแล้วคว่ำขวดเพื่อเทน้ำทิ้ง ส่งผลให้ใช้เวลาเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 3 วินาทีต่อขวด หากใช้เครื่องล้างขวดแบบใหม่ (แนวตั้ง) ผู้ล้างขวดต้องคว่ำขวดไปตามแปรงแนวตั้ง ทำให้ไม่จำเป็นต้องเทน้ำทิ้งภายหลังจากการล้าง

หลังจากการปรับเปลี่ยนแผนผังกระบวนการทำงานของโรงงานผลิตขวดน้ำปาลาร์โซเคิล (หลังปรับปรุง) และแผนภูมิการไหลของขบวนการผลิตขวดน้ำปาลาร์โซเคิล (หลังปรับปรุง) จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4 และตารางที่ 8



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานของโรงงานผลิตขวดน้ำปาลาร์โซเคิล (หลังปรับปรุง)

ตารางที่ 8 แผนภูมิการไหลของขบวนการผลิตขวดน้ำปาร์ไลเซล (หลังปรับปรุง)

แผนภูมิการไหลของขบวนการผลิต							
				สรุปผล			
					วิธีเดิม	วิธีที่เสนอ	ความแตกต่าง
ชื่อเรื่อง _ปรับปรุงกระบวนการล้างขวด02				การทำงาน	4	5	1
				การขนส่ง	5	2	-3
แผนก _____ สถานีล้างขวด				การตรวจสอบ	0	0	0
หมายเลขแผนภูมิ _____				การคอย	1	1	0
เขียนโดย _____				การเก็บรักษา	0	0	0
วันที่ _____ 3/6/2564				ระยะทาง ม.	8	4.5	-3.5
				เวลา นาที	5.2	3.4	-1.8
ระยะทาง ม.	เวลา นาที	สัญลักษณ์	คำอธิบายการทำงาน				
1	0.3	●○→□▷▽	ผสมสารซักล้างในน้ำ				
1	0.5	●○→□▷▽	คว่ำขวดในลัง				
0	0.2	●○→□▷▽	เปิดเครื่องล้าง				
0.5	0.2	●○→□▷▽	เปิดน้ำ				
0	0.2	●○→□▷▽	ยกลังวางบนเครื่องล้าง				
0	0.5	●○→□▷▽	ล้างขวด				
0	0.5	●○→□▷▽	ยกลังออก				
2	1	○●→□▷●▽	นำขวดไปตาก				

เมื่อปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานของโรงงานผลิตขวดน้ำปาร์ไลเซลแล้ว ผู้วิจัยได้ดำเนินการเปรียบเทียบกระบวนการทำงานในสถานงานแยกขวดก่อนปรับปรุงงานและหลังปรับปรุงงาน [6] โดยสรุปเป็นประเด็นต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบการทำงานในสถานงานแยกขวดก่อนปรับปรุงงาน และหลังปรับปรุงงานในประเด็นต่าง ๆ

ประเด็นเปรียบเทียบ	ก่อนปรับปรุงงาน	หลังปรับปรุงงาน
อุปกรณ์ช่วยผลิต	รถเข็น	รถเข็น, โครงเหล็กเพื่อวางภาชนะ
วิธีการทำงาน		
1. ลำเลียงวัตถุดิบ (ขวดน้ำปาร์ไลเซล) จากสถานที่จัดเก็บขวดมายังสถานงานแยกขวด	ปฏิบัติงานลำเลียงวัตถุดิบ (ขวดน้ำปาร์ไลเซล) จากสถานที่จัดเก็บขวดมายังสถานงานแยกขวด โดยใช้รถเข็น	รับขวดน้ำปาร์ไลเซลจากสถานงานแยกขวด เมื่อเสร็จสิ้น ให้เทขวดลงบนโต๊ะทำงานในสถานงานแยกขวด
2. แยกประเภทขวดที่ต้องการนำไปใส่ในลังที่จัดเตรียมไว้	ลังซึ่งจัดเตรียมไว้สำหรับใส่ขวดที่แยกประเภทแล้ว ไม่มีการจัดวางในตำแหน่งที่แน่นอน	ลังซึ่งจัดเตรียมไว้ สำหรับใส่ขวดที่แยกประเภทแล้ว มีการจัดวางในตำแหน่งที่แน่นอน

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบการทำงานในสถานงานแยกขวดก่อนปรับปรุงงาน และหลังปรับปรุงงานในประเด็นต่าง ๆ (ต่อ)

ประเด็นเปรียบเทียบ	ก่อนปรับปรุงงาน	หลังปรับปรุงงาน
วิธีการทำงาน (ต่อ)		
3. นำลึงซึ่งใส่ขวดที่เลือกแล้วไปเก็บในสถานที่ (โกดังเก็บสินค้า) ที่กำหนดไว้	ผู้ปฏิบัติงานล้าเลียงวัตถุดิบไปยังสถานที่ (โกดังเก็บสินค้า) ที่กำหนดไว้ โดยใช้รถเข็น	คงวิธีการทำงานแบบเดิมไว้
การไหลของวัสดุ	ล้าเลียงครั้งละ 4 ลัง	คงแบบเดิมไว้
ผู้ปฏิบัติงาน	ผู้ปฏิบัติงานต้องออกแรงมากเพื่อล้าเลียงลึง	ผู้ปฏิบัติงานออกแรงน้อยลงเพราะระยะทางล้าเลียงน้อยลง

จากตารางเปรียบเทียบการทำงานในสถานงานแยกขวดก่อนปรับปรุงงาน และหลังปรับปรุงงานในประเด็นต่าง ๆ พบว่า แผนภูมิกระบวนการทำงานของการผลิตขวดน้ำปาร์ไลเซลภายหลังการปรับปรุงกระบวนการใหม่มีอัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้น โดยผลจากเปรียบเทียบทั้งก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงที่มีผลต่อระยะทาง เวลา และแรงงาน แสดงให้เห็นดังตารางที่ 10-11

ตารางที่ 10 แผนภูมิกระบวนการทำงานของการผลิตขวดน้ำปาร์ไลเซลภายหลังการปรับปรุงกระบวนการใหม่

ขั้นตอนการทำงาน	สัญลักษณ์	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง	
		ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)
1. ล้าเลียงวัตถุดิบ (ขวดน้ำปาร์ไลเซล) จากสถานที่จัดเก็บขวดมายังสถานงานแยกขวด		18	300	5	120
2. แยกประเภทขวดที่ต้องการนำไปใส่ในลังที่จัดเตรียมไว้		4	60	1	30
3. นำลึงซึ่งใส่ขวดที่เลือกแล้วไปเก็บในสถานที่ที่กำหนดไว้		20	300	10	150
รวม	3	42	660	16	300

ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบแผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทแรงงาน ก่อนและหลังปรับปรุงวิธีการทำงาน

รายการ	ขั้นตอนการทำงาน	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)
ก่อนปรับปรุงการทำงาน	3	42	660
หลังปรับปรุงการทำงาน	3	16	300
ผลต่าง	0	26	360
ลดลง (%)	0	61.9	54.54

5. วิจัยรณ

จากการวิจัยเรื่องการพัฒนากระบวนการเพิ่มผลผลิต กรณีศึกษา ขวดน้ำปาร์ไอเซล ได้มีการศึกษากระบวนการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน การเพิ่มอัตราผลผลิตของกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก ผลการศึกษากระบวนการผลิต พบว่า บางกระบวนการผลิตในปัจจุบันยังทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ จากการศึกษากะบวนการทำงานด้วยเวลามาตรฐาน ได้เสนอแนวทางการปรับปรุง 2 แนวทาง แนวทางที่ 1 ปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานและอุปกรณ์ให้เหมาะสม พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตได้ 27.90% แนวทางที่ 2 ปรับเปลี่ยนการทำงานของเครื่องจักร พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตได้ 40.23% จากผลที่กล่าวมา โรงงานเลือกใช้แนวทางที่ 2 ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน เพราะว่าผลผลิตที่ได้จากการปรับปรุง เป็นไปตามเป้าหมายที่โรงงานได้กำหนดไว้คือ 6 ตันต่อวัน [7] นอกจากนี้ ยังมีการนำเทคนิคอื่นมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอีกให้มมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ผลิตภณท์เพิ่มขึ้นมากกว่ากระบวนการผลิตก่อนการปรับปรุง ซึ่งผลจากการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิต พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณผลิตภณท์อีก 97.77 เป็นร้อยละ 132.57 โดยเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 34.8 และสามารถผลิตผลิตภณท์อีก 4,400 ก่อน เป็น 5,966 ก่อน ซึ่งเพิ่มขึ้น 1,566 ก่อน [8] แต่ในภายภาคหน้า หากได้มีการนำระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ มาควบคุมการทำงานให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ การทำงานก็จะสะดวก รวดเร็วขึ้น เนื่องจากมีฐานข้อมูลการจัดการที่เป็นระบบ ทำให้วิเคราะห์ ประเมินผล เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจได้เป็นอย่างดี [9] นอกจากนี้ ยังลดต้นทุนแรงงาน และสามารถตรวจสอบกระบวนการทำงานได้ทุกขั้นตอนตลอดเวลา

6. สรุปผล

การพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิต กรณีศึกษา ขวดน้ำปาร์ไอเซลนี้ เป็นการศึกษ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานในโรงงาน โดยใช้กระบวนการแก้ปัญหาทั่วไป ร่วมกับเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้วิธีการทำงานที่สามารถเพิ่มผลผลิต

ลดต้นทุน และรักษาคุณภาพให้คงเดิม กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลคือ โรงงานผลิตขวดน้ำพลาสติก ย่านปทุมธานี ประกอบกิจการรูปแบบวิสาหกิจชุมชน

การค้นหาคำแนะนำการปรับปรุง ได้ใช้ข้อมูลอัตราผลิตภาพโดยรวมและอัตราผลิตภาพในแต่ละปัจจัยการผลิต ประกอบด้วย อัตราผลิตภาพแรงงาน อัตราผลิตภาพวัตถุดิบ อัตราผลิตภาพค่าใช้จ่ายวัสดุ อัตราผลิตภาพพลังงาน ในช่วงระยะเวลา 4 เดือน ก่อนปรับปรุง พบว่า อัตราผลิตภาพโดยรวมมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราผลิตภาพแรงงาน ดังนั้น ควรมีการปรับปรุงวิธีการทำงานเพื่อเพิ่มอัตราผลิตภาพแรงงาน นอกจากนี้ จากข้อมูลการวิเคราะห์ต้นทุนการดำเนินงาน พบว่า ค่าแรงล้างขวด ค่าผงซักฟอก และค่าไฟฟ้า สามารถลดได้ด้วยการปรับปรุงวิธีการทำงาน โดยสถานงานที่มีความจำเป็นและควรได้รับการปรับปรุงมากที่สุด คือ สถานงานแยกขวดและสถานงานล้างขวด ดังนั้น ประเด็นการปรับปรุงงาน คือ เพิ่มอัตราผลิตภาพแรงงานในสถานงานแยกขวดและล้างขวด โดยคำนึงถึงการลดต้นทุนของแรงล้างขวด ผงซักฟอก ค่าน้ำประปาและค่าไฟฟ้ารวมด้วย

การปรับปรุงงานในสถานงานแยกขวดและล้างขวด มีขั้นตอนตามลำดับ คือ (1) วิเคราะห์สภาพปัจจุบันของสถานงาน (2) กำหนดแนวทางการปรับปรุงการทำงาน (3) ทำการปรับปรุงตามแนวทางที่กำหนดขึ้นใหม่ (4) ทำการทดลองวิธีการทำงาน เครื่องมือ สถานีการทำงาน ภายหลังการปรับปรุงแล้ว

ผลการวิเคราะห์สภาพปัจจุบันในสถานงานแยกขวดก่อนปรับปรุง พบว่า การทำงานแยกขวดประมาณ 10 ลัง ก่อนปรับปรุง ผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนที่เฉลี่ย 18 เมตร ใช้เวลาในการทำงาน 660 วินาที ปัญหาที่พบมี 2 ปัญหา คือ (1) ปัญหาการขนย้ายลังจากจุดที่จัดเก็บขวดมายังสถานงาน เพราะไม่มีอุปกรณ์การลำเลียงที่ทันสมัย ซึ่งปรับปรุงโดยเปลี่ยนจุดที่จัดเก็บขวดให้ใกล้กับสถานงานมากขึ้น (2) ปัญหาการสูญเสียเวลาเนื่องจากผู้ปฏิบัติงานต้องมองหาตำแหน่งวางลัง เพื่อใส่ขวดที่ตนเลือกแล้วทุกครั้ง เพราะไม่มีการกำหนดตำแหน่งของลังสำหรับใส่ขวดที่ผู้ปฏิบัติงานเลือกมาวาง ณ จุดใกล้ตัว การปรับปรุงทำโดยกำหนดตำแหน่งการวางของลังให้ชัดเจน โดยพิจารณาจากปริมาณของขวดชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากขนาดของขวดที่มีปริมาณมากจะอยู่ใกล้ผู้ปฏิบัติงานมากที่สุด ส่วนขวดที่มีปริมาณน้อยจะอยู่ไกลจากผู้ปฏิบัติงานออกไป

ผลการวิเคราะห์แผนภูมิกระบวนการผลิตหลังปรับปรุง พบว่า การทำงานแยกขวดประมาณ 10 ลัง ระยะทางการเคลื่อนที่ของผู้ปฏิบัติงานลดลงจาก 18 เมตร เหลือ 5 เมตร หรือลดลง 61.9% และเวลาการทำงานลดลงจาก 660 วินาที เหลือ 300 วินาที หรือลดลง 54.54% ซึ่งหมายความว่า อัตราการผลิตที่ได้จากการปรับปรุงเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์แผนภูมิกระบวนการผลิตในสถานงานล้างขวดก่อนปรับปรุง พบว่า การล้างขวด 1 บ่อซีเมนต์ มีขั้นตอนการทำงาน 10 ขั้นตอน ผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนที่เฉลี่ย 97.4 เมตร ใช้เวลาทำงานเฉลี่ย 248 นาที ปัญหาที่พบมี 3 ปัญหา คือ (1) ปัญหาอาการสบร้อนที่มีมือของผู้ปฏิบัติงาน

เพราะผู้ปฏิบัติงานต้องสัมผัสกับผงซักฟอกเป็นเวลานาน วันละ 8 ชั่วโมง ซึ่งปรับปรุงโดยนำน้ำหมักชีวภาพมาใช้เป็นสารทำความสะอาดทดแทนผงซักฟอก (2) ปัญหาผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนที่โดยไม่จำเป็น เพราะภายในสถานงาน มีการจัดวางตำแหน่งไม่เหมาะสม ปรับปรุงโดยการจัดวางแผนผังการทำงานให้อยู่ในระยะทำงานของผู้ปฏิบัติงานและเปลี่ยนแปลงระบบการทำงานจาก Lot Production เป็น One Piece Production (3) ปัญหาอาการปวดเมื่อยบริเวณแขนของผู้ปฏิบัติงาน เพราะเครื่องล้างขวดก่อนปรับปรุงใช้แปรงล้างขวด ซึ่งขนแปรงมีลักษณะแข็งและมีขนาดใหญ่กว่าปากขวด ส่งผลให้ผู้ปฏิบัติงานต้องออกแรงดันขวด เพื่อให้แปรงล้างขวดเข้าไปทำความสะอาดภายใน และออกแรงดึง เพื่อให้แปรงล้างขวดออกจากขวด นอกจากนี้ เมื่อล้างได้ประมาณ 100 ขวด แปรงล้างขวดจะมีลักษณะงอ ทำให้ไม่สะดวกขณะทำงาน การใช้แรงดันน้ำในการชำระล้างขวดทดแทนแปรงล้างขวดถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหา

จากการทดสอบสมมติฐานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในทุกผลิตภัณฑ์ ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า ขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ขนาดต่าง ๆ สามารถใช้แรงฉีดทำความสะอาดได้ เมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการคืนทุนของเครื่องล้างขวดที่ได้ทำการปรับปรุง พบว่า ระยะเวลาคืนทุนใช้เวลาประมาณ 2 เดือน

นำวิธีการทำงาน ซึ่งผ่านการทดสอบสมมติฐานทั้ง 2 สถานงาน มาทดลองใช้ในโรงงานผลิตขวดน้ำปาร์ไอเซลล์ย่านปทุมธานี เป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า ดัชนีผลผลิตภาพรวมเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น 54% เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุง ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 วิธีการวัดอัตราผลิตภาพแบบองค์รวมและการวัดอัตราผลิตภาพเฉพาะส่วน ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ สามารถนำไปใช้ได้ในธุรกิจที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

7.2 ถ้านำต้นทุนมาวิเคราะห์อัตราผลิตภาพ ควรมีการวิเคราะห์ต้นทุนเหล่านั้น ควบคู่กันไปด้วย เพราะ ทำให้โรงงานได้เห็นถึงแนวทางการลดต้นทุนและการเพิ่มอัตราผลิตภาพของโรงงาน ควบคู่กัน

7.3 สำหรับการวิจัยต่อไปในส่วนของเครื่องล้างขวดที่ใช้ระบบฉีดน้ำแรงดันสูง ควรทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาแรงดันน้ำที่เหมาะสม

References

- [1] The Industrial Finance Corporation of Thailand (IFCT) Annual Report 2020. The Market Competition of the Glass Manufacturing Industry in Thailand. Bangkok; 2020. (In Thai)

- [2] Yodphichit N. The application of work study techniques to increase productivity: a case study, Ruam Karnchang Co., Ltd. The 53rd Academic conference, Faculty of Engineering for the Engineering Innovations for Sustainable Resource Management, Khon Kaen University; 2017. (In Thai)
- [3] Chanthamat B. A developing work with quality management systems and increasing productivity. Bangkok: Technology Promotion Association (Thai - Japanese); 2018. (In Thai)
- [4] Yampuang P. Engineering Economics. rev. ed. Bangkok: SE-ED Books; 2019. (In Thai)
- [5] Ruangraphan C. The basic statistics with examples of analysis with MINITAB SPSS/PC and SAS. Bangkok: Klungnana Vitthaya Press; 2015. (In Thai)
- [6] Chutima P. Engineering experiment design. Bangkok: Chulalongkorn University; 2016. (In Thai)
- [7] Jaranoon S. Increasing productivity in plastic recycle production [thesis]. Pathum Thani: Thammasat University; 2017. (In Thai)
- [8] Raremee M, Saesang T. The Optimization of the production process by lean technique, a case study of the brick and block manufacturing process. The 3rd National Academic Conference of Rajamangala University of Technology Rattanakosin: The Integrating knowledge for a sustainable society. Hua Hin, Thailand: Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus; 2018 (In Thai)
- [9] Iniam C, Liewtrakul P. A development of Information System for Online Electric Conduit Marketing. Journal of Engineering and Industrial Technology Bansomdej 2021;2(1): 26-42. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ.ดร.พรทิพย์ เหลียวตระกูล อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา 1061 ซอยอิสรภาพ 15 แขวงหิรัญรูจี เขตธนบุรี กรุงเทพฯ 10600. E-mail: pliewtrakul@hotmail.com โทรศัพท์ 08-1269-2747



อาจารย์ชัชพันธ์ อินเี่ยม อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยี
วิศวกรรมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา 1061 ซอยอิสรภาพ 15 แขวง
หิรัญรูจี เขตธนบุรี กรุงเทพฯ 10600. E-mail: c_iniam@hotmail.com
โทรศัพท์ 08-6979-9069

Article History:

Received: November 10, 2022

Revised: May 1, 2023

Accepted: May 10, 2023

จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกระชายดำที่อบแห้ง
ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ
**DRYING KINETIC AND QUALITY OF BLACK KAEMPFERIA DRYING
USING MICROWAVE-VACUUM TECHNIQUE**

จามร ภัคดีศรีแพง¹ ดวงสิริ สยมภาค² และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตติ³

¹นักศึกษา, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน)
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก,
43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, jamornpakseepaeng@gmail.com
²อาจารย์, หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร)
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก,
43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, dhongsiri_sa@rmutto.ac.th
³อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน)
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก,
43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, kittisak_wi@rmutto.ac.th

Jamorn Pakseepaeng¹, Dhongsiri Sayompark² and Kittisak Witinantakit³

¹Student, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, jamornpakseepaeng@gmail.com
²Lecturer, Bachelor of Science (Food Science and Technology) Faculty of Science and
Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, dhongsiri_sa@rmutto.ac.th
³Lecturer, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra
Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, kittisak_wi@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ เพื่อศึกษา
จลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง ความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ
และคุณภาพของกระชายดำหลังจากการอบแห้ง ในด้านสี ปริมาณน้ำอิสระและการต้านอนุมูลอิสระ

กระชายดำมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 121.58% d.b. อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 7.47-12.18% d.b. โดยความดันห้องอบแห้ง 3 ระดับ คือ ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 กิโลปาสกาล และแหล่งความร้อนจากไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa ใช้เวลาในการอบสั้นที่สุด 150 นาที แต่การอบแห้งที่ความดัน 20 kPa จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 50.73 MJ/kg_{water evap.} และความแตกต่างของสีโดยรวมต่ำที่สุด คือ 8.21 นอกจากนี้ ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ ไม่เกิน 0.6 และสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระชายดำสด ซึ่งกระชายดำหลังอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีสารฟีนอลิกรวม 2.73 mg GAE/g f.w. และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 1.00 mg AAE/g f.w. สูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าการตากแดด สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำได้เหมาะสมที่สุดคือแบบจำลองของ Midilli โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.99936 สูงที่สุด และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) 0.00737 ต่ำที่สุด

คำสำคัญ: กระชายดำ, การอบแห้ง, ไมโครเวฟ, สุญญากาศ

ABSTRACT

The objective of this research was to study on drying kinetics, specific energy consumption, qualities were color and water activity, antioxidants and antioxidant activities, as well as mathematical modeling of drying of black kaempferia. The moisture content of black kaempferia was reduced from 121.58% to 7.47-12.18% d.b. by combined vacuum and microwave technique at three levels of drying pressure, i.e., atmospheric pressure, absolute pressure of 20 and 5 kPa using a microwave power of 800 Watts. The study found that the shortest drying time of 150 minutes using an absolute pressure of 5 kPa. Anyway, drying at 20 kPa absolute pressure had the lowest specific energy consumption of 50.73 MJ/kg_{water evap.} and the lowest total color difference is 8.21. However, all experimental conditions had water activity within the standard, not more than 0.6, total phenolic compounds and antioxidant activity were decreased compared to fresh black kaempferia. Drying of black kaempferia at absolute pressure of 5 kPa had the highest total phenolic compounds at 2.73 mg GAE/g f.w. and the highest antioxidant activity of 1.00 mg AAE/g f.w., which were higher than sun drying. Midilli's empirical mathematical model is suitable to predict drying kinetics for drying black kaempferia. It has the highest coefficient of determination (R^2) 0.99936 and the lowest root mean square error (RMSE) 0.00737.

KEYWORDS: Black kaempferia, Drying, Microwave, Vacuum

1. บทนำ

กระชายดำ (*Kaempferia parviflora* Wallich. ex Baker) เป็นหนึ่งในพืชสมุนไพรที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งได้รับการส่งเสริมให้มีการส่งออกและถือเป็นหนึ่งในสมุนไพรโปรดักส์แชมเปียน ตามแผนแม่บทแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย ฉบับที่ 1 ปี พ.ศ. 2559-2564 กระชายดำนั้นนอกจากผลิตเพื่อการบริโภคในประเทศแล้ว ยังมีการผลิตเพื่อส่งออกอีกด้วย โดยประเทศคู่ค้าที่สำคัญ คือ เกาหลี และญี่ปุ่น ซึ่งส่วนมากจะซื้อในลักษณะของกระชายอบแห้ง การผลิตเพื่อส่งออกต้องผลิตให้ได้คุณภาพและมาตรฐาน ตั้งแต่กระบวนการเพาะปลูก การเก็บเกี่ยวไปจนถึงการแปรรูปจึงสามารถส่งออกได้ [1] โดยจุดแข็งด้านการตลาดของกระชายดำ ได้แก่ ถิ่นเพาะปลูกที่ยังสามารถเพาะปลูกได้เฉพาะภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้ประเทศอื่นเข้ามาแข่งขันได้ยาก โดยในประเทศไทยมีการปลูกกระชายดำตามแถบที่เป็นภูเขา มีการปลูกมากในจังหวัดเพชรบูรณ์ พิษณุโลก และจังหวัดเลย โดยสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกกระชายดำคือ เป็นพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 500-700 เมตร ดินมีความร่วนซุย ระบายน้ำได้ดี ตลาดที่สำคัญของกระชายดำและสารสกัดจากกระชายดำ ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร มีอัตราการเติบโตของมูลค่าอุตสาหกรรมเฉลี่ยในช่วง 3 ปี เพิ่มขึ้นร้อยละ 19.52 และคาดว่าจะเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกระชายดำมีสรรพคุณทางยาสูง ในเรื่องของบำรุงร่างกาย ช่วยในเรื่องของการไหลเวียนเลือดที่ดี การลดการอักเสบและมีการทำการตลาดว่ามีสรรพคุณเทียบเท่าโสมของเกาหลี ช่วยชะลอวัย ด้านอีกเสบและเพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อทำให้รู้สึกกระปรี้กระเปร่า และสมรรถภาพทางเพศ เป็นต้น [2] ในการนำกระชายดำไปบริโภคหรือใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ส่วนหนึ่งจะใช้กระชายดำแห้งที่สามารถเก็บรักษาได้นานทั้งระหว่างการขนส่งและการแปรรูป ดังนั้นกระบวนการทำแห้งจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญก่อนนำไปบริโภคหรือแปรรูป การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ตลอดจนการควบคุมกระบวนการอบแห้งเพื่อคงคุณภาพของกระชายดำหลังการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟนั้นเป็นกระบวนการทำให้เกิดความร้อนจากการที่วัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งสนามไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดการหมุนและสั่นของอนุภาคไดโอดินและของโมเลกุลน้ำภายในวัสดุ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัสดุ [3] นอกจากนั้นคลื่นไมโครเวฟยังสามารถทะลุทะลวงผ่านชั้นเนื้อเยื่อของวัสดุเข้าสู่ชั้นในได้อย่างรวดเร็วในขณะที่ผิวชั้นนอกของวัสดุก็ยังไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนที่สูงมาก ดังนั้นจึงทำให้น้ำในวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นและระเหยอย่างรวดเร็วทั้งจากภายนอกและภายในวัสดุไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งทำให้สามารถรักษาโครงสร้างทางกายภาพส่วนอื่น ๆ ของวัสดุให้ยังคงมีสภาพใกล้เคียงวัสดุสดได้ดีพอสมควร และสำหรับการอบแห้งภายใต้สภาวะ

ความดันสุญญากาศเป็นการปรับสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งให้มีสภาวะที่ทำให้อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำในวัสดุต่ำลง ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้เร็วขึ้น และเมื่อนำจุดเด่นของไมโครเวฟและสุญญากาศมารวมกันในกระบวนการอบแห้ง จะส่งผลให้ประหยัดพลังงานและเวลาในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ [4] ทำให้วัสดุได้รับความร้อนในระยะเวลาที่สั้นลง ซึ่งอาจจะส่งผลดีกับคุณสมบัติบางประการของวัสดุ เช่น สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสดีกว่าการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังรักษาคุณค่าทางโภชนาการ ประหยัดพลังงาน ควบคุมได้ง่าย ปลอดภัย ตัวเครื่องจักรมีขนาดเล็ก ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และยังสามารถผลิตได้เองในประเทศ [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการศึกษาจนผลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟและคุณภาพทางกายภาพของกระชายดำที่ผ่านการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง รวมถึงสารสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร [6] และผลิตภัณฑ์เพื่อการดูแลสุขภาพ [2] ด้วยเทคนิคดังกล่าวข้างต้น

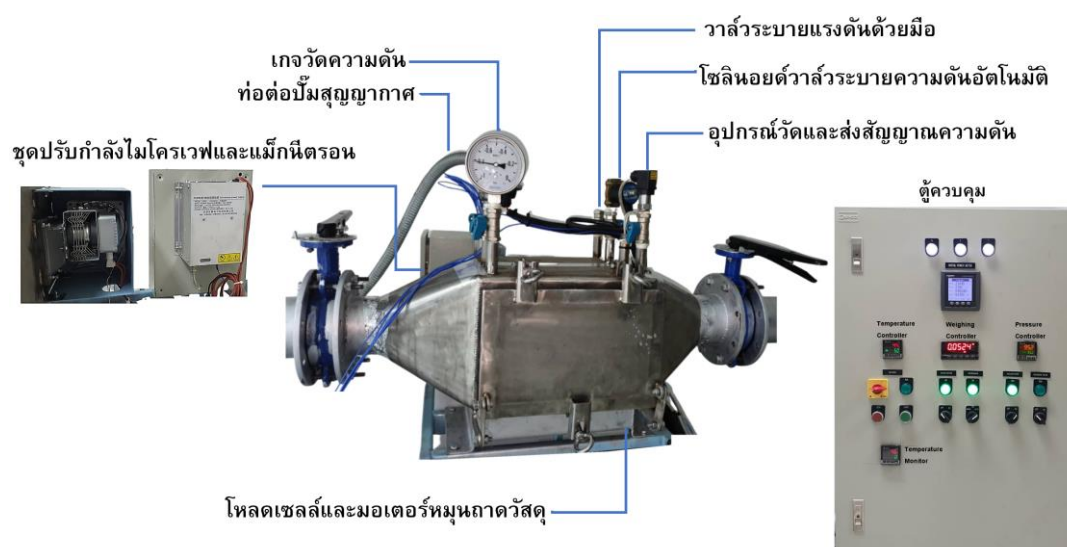
2. อุปกรณ์และการดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัย เป็นเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานระดับห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องอบแห้งจะมีแหล่งความร้อนจากแมกนีตรอนไมโครเวฟยี่ห้อ LG ขนาด 1000 วัตต์ ระดับกำลังของไมโครเวฟทำการปรับตั้งผ่านชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟแบบทำงานต่อเนื่อง รุ่น LCEL01D และปั๊มสุญญากาศขนาด 1 แรงม้า สามารถสร้างความดันภายในห้องอบแห้งได้ที่มีความดันสัมบูรณ์ 2 กิโลปาสคาล ในส่วนระบบการอ่านค่าและควบคุม มีระบบวัดค่าความดันห้องอบแห้งด้วย Pressure Transmitter ยี่ห้อ Zega รุ่น PT9200W ช่วงการวัด -1 ถึง 1 บาร์ ความแม่นยำ $\pm 0.5\%$ ที่ทำงานร่วมกับชุดควบคุมความดันเพื่อทำการติดต่อปั๊มสุญญากาศ ยี่ห้อ Delta รุ่น DTA4848 ความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 บาร์ ใช้รูปแบบการควบคุมป้อนกลับแบบ PID ซึ่งสามารถควบคุมความดันให้อยู่ในระดับที่ต้องการ มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.2 บาร์ ในการชั่งน้ำหนักของวัสดุที่นำมาอบแห้งจะวางถาดวัสดุบนแกนหมุนที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขณะทำการอบแห้ง ซึ่งติดตั้งอยู่บนโหลดเซลล์ ยี่ห้อ TedeA Huntleigh รุ่น 1022 พิกัด 2 กิโลกรัม แรงดันเอาท์พุท 2mV/V ที่ทำงานร่วมกับอุปกรณ์แสดงค่าน้ำหนัก ยี่ห้อ Eyecon รุ่น EICMC-1AB ความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 กรัม ความแม่นยำ $\pm 0.01\%$ จากนั้นจะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-10 V_{dc} เพื่อบันทึกค่าน้ำหนักด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Graphtech Midi Logger รุ่น GL220 ในส่วนค่ากำลังและพลังงานไฟฟ้าจะใช้เครื่องวัดและบันทึกแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Schneider รุ่น PM2200 ซึ่งวัดกระแสไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงกระแส ยี่ห้อ Qubix รุ่น MSQ-30 พิกัด 30/5A Class 1.0 ระบบการทำงานทั้งหมดถูก

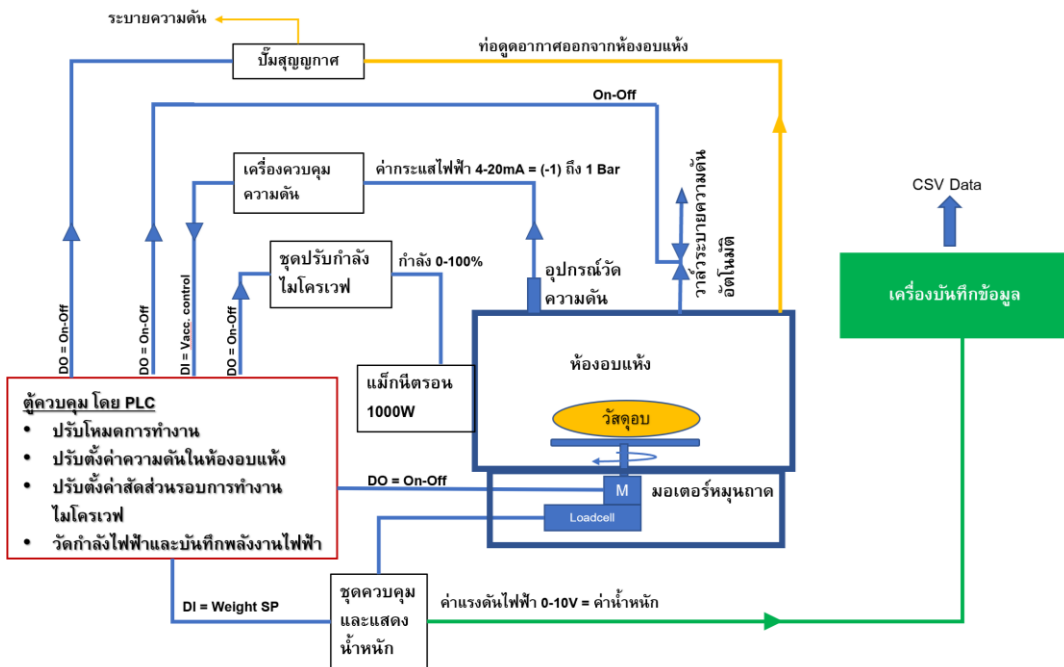
ควบคุม PLC ยี่ห้อ Siemens รุ่น LOGO! โดยเครื่องอบแห้งจะมีส่วนประกอบและระบบการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2

สำหรับการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารอบแห้งกระชายดำโดยใช้เทคนิคสุญญากาศร่วมกับ ไมโครเวฟ ทำการปรับตั้งกำลังกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟไว้ที่ 800 วัตต์ และกำหนดเวลาเปิด-ปิด แมกนีตรอนเป็นช่วง ๆ แบบ 1:2 [7] ซึ่งเวลาเปิดต่อเวลาปิด คือ 20:40 วินาที ตลอดจนการทดลอง โดยปรับตั้งที่เครื่องควบคุมกำลังไมโครเวฟและอ่านค่ากำลังไฟฟ้าค่าจากมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้า แบบดิจิตอล ในส่วนความดันห้องอบแห้งจะทำการปรับตั้งที่เครื่องควบคุมความดันเพื่อควบคุม การทำงานของปั๊มสุญญากาศผ่านระบบ PLC ให้ความดันในห้องอบแห้งคงที่



รูปที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

ในการทดลองจะปรับตั้งความดันห้องอบแห้งเป็นค่าความดันสัมบูรณ์ตามเงื่อนไขการทดลอง คือ ความดันบรรยากาศ (101.325 kPa, ไม่เปิดปั๊มสุญญากาศ) ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa ตามลำดับ คำนวณน้ำหนักทำการวัดด้วยโพลีเซลล์ภายในเครื่องอบแห้ง ส่งค่าน้ำหนักผ่านเครื่องแสดง น้ำหนักและส่งต่อเข้าเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ตลอดจนการทดลอง



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

2.2 วิธีการทดลอง

กระชายดำที่ปลูกในพื้นที่อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งมีอายุหลังการเก็บเกี่ยวประมาณ 7-8 เดือน ถูกนำมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำมาหั่นเป็นแว่นมีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ทำการซังและบันทึกน้ำหนักก่อนทำการอบแห้ง และนำเข้าเครื่องอบแห้งโดยจัดเรียงบนจานแก้ว ครั้งละ 155.0 ± 1.0 กรัม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจัดเรียงกระชายดำบนจานแก้วเพื่อนำเข้าเครื่องอบแห้ง

นำตัวอย่างกระชายดำกลุ่มเดียวกันไปตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์เป็นระยะเวลา 2 วัน ตามวิธีทั่วไปของเกษตรกรเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงระหว่างผลิตภัณฑ์จากทดลองและผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย

ในห้องตลาดด้วยวิธีการตากแดด และทุกเงื่อนไขการอบแห้งจะลดความชื้นกระชายดำให้ใกล้เคียงกับความชื้นตามมาตรฐานสินค้าเกษตรพืชสมุนไพร 10% d.b. [8] โดยให้มีความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงประมาณ 8-12% d.b.

เมื่อเริ่มทำการอบแห้ง จะทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนการอบแห้ง และบันทึกค่าน้ำหนักของกระชายดำระหว่างการทดลองทุก ๆ 15 นาที ด้วย Data logger เมื่อสิ้นสุดการทดลอง บันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า หยุดบันทึกข้อมูลน้ำหนัก และนำกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งมาชั่งและบันทึกน้ำหนัก หลังจากนั้นคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและนำกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปทำการวัดคุณภาพ ได้แก่ การวัดค่าสี ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และนำกระชายดำบางส่วนไปอบแห้งต่อด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC [9] จากนั้นนำข้อมูลความชื้นมาวิเคราะห์หาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

2.3 การหาความชื้น

การหาความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content, M_d) ของกระชายดำ สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักกระชายดำที่ต้องการหาความชื้น (w) จากนั้นนำกระชายดำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC เพื่อหาค่าน้ำหนักกระชายดำแห้ง (d) และนำค่าน้ำหนักมาคำนวณ ตามสมการที่ (1) [10]

$$M_d = 100 \times (w-d) / d \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.), w คือ น้ำหนักของวัสดุสดที่ต้องการหาความชื้น (g) และ d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (g)

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถหาได้จากการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งที่ทำการวัดและบันทึกโดยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Schneider รุ่น PM2200 ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกระชายดำ ตามสมการที่ (2) [11]

$$SEC = 3.6E_p / (m_i - m_f) \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ/kg}_{\text{water evap.}}$), E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh) และ m_i และ m_f คือ น้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังอบแห้ง (kg) ตามลำดับ

2.5 การทดสอบคุณภาพสี

การทดสอบคุณภาพด้านสีของกระชายดำทำโดยการวัดด้วยเครื่องวัดสี 3HN รุ่น NH310 ระบบสีที่ใช้คือ CIE ใช้แสงสว่างที่ 6500 K ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสีน้อยกว่า 0.04 (ΔE^*_{ab}) ผลของการวัดค่าสีแต่ละครั้งจะให้ผลออกมาเป็น 3 ค่า คือ L^* , a^* และ b^* โดยจะทำการวัดค่าสีที่กึ่งกลางของชิ้นกระชายดำ จำนวน 30 ตัวอย่าง ในแต่ละการทดลอง หลังจากนั้นนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์ทางสถิติและคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับสีของกระชายดำสด โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3) [12]

$$\Delta E = [(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

เมื่อ ΔE คือ ความแตกต่างของสีโดยรวม, $(L_1^* - L_2^*)$ คือ ความแตกต่างของค่าความสว่างของกระชายดำสดและกระชายดำแห้ง, $(a_1^* - a_2^*)$ คือ ความแตกต่างของค่าความเป็นสีแดงถึงสีเขียวของกระชายดำสดและกระชายดำแห้ง และ $(b_1^* - b_2^*)$ คือ ความแตกต่างของค่าความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงินของกระชายดำสดและกระชายดำแห้ง

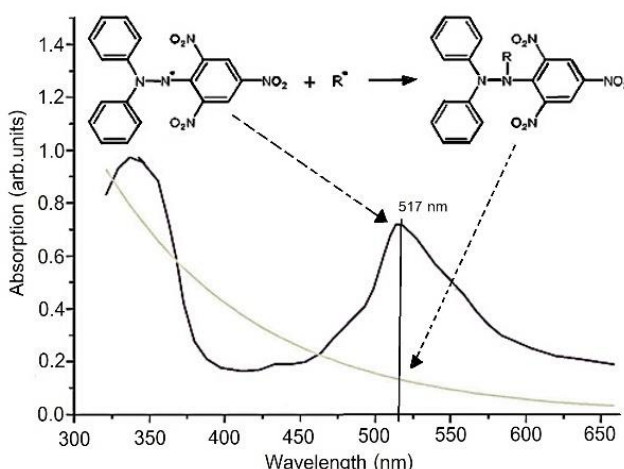
2.6 ปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญ สร้างสปอร์ หรือปริมาณน้ำอิสระที่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและชีวเคมีต่าง ๆ ได้ เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาถึงมากกว่าค่าความชื้นในวัสดุ โดยวัสดุหลังอบแห้งควรมีค่าปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่า 0.6 ซึ่งจุลินทรีย์จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [13] ซึ่งในการทดลองจะใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระยี่ห้อ Aqualab รุ่น Pre ช่วงการอ่านค่า 0.03-1 ที่อุณหภูมิ 25 °C ความแม่นยำในการวัด ± 0.003 โดยเตรียมตัวอย่างครั้งละประมาณ 5 กรัม ใส่ภาชนะเพื่อนำเข้าเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.7 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) คืออนุมูลอิสระที่มีความเสถียร (Stable free radical) ซึ่งมีสีม่วงเข้มและดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร เมื่อรับอิเล็กตรอนจากสารต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดกระชายดำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปออกซิไดซ์ (DPPH) ที่ไม่

ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทำให้สีม่วงของสารละลายจางลงและสามารถตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระ DPPH ที่เหลืออยู่ได้ การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถทำได้โดยการนำสารละลายมาตรฐาน ascorbic acid หรือสารสกัดที่เจือจางจนได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับ DPPH ความเข้มข้น 208 ไมโครโมลาร์ 5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองเขย่านาน 60 วินาที เก็บที่อุณหภูมิ 25 °C ในที่มืดเป็นเวลา 40 นาที วัดค่า absorbance ที่ 517 นาโนเมตร และคำนวณ Ascorbic acid equivalent antioxidant capacity (AEAC) ของสารสกัดโดยการแทนค่า absorbance ลงในสมการของกราฟมาตรฐาน ascorbic acid และแสดงค่าในหน่วยน้ำหนักสมมูล มิลลิกรัมของ Ascorbic acid ต่อ 1 กรัม น้ำหนักสด (mg AA/g f.w.) [14]



รูปที่ 4 โครงสร้างทางเคมีและการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) [12]

การหาปริมาณรวมของสารโพลีฟีนอล (Total polyphenolic contents) เป็นการหาปริมาณของสารประกอบโพลีฟีนอลทั้งหมดที่มีในตัวอย่างทดสอบ ด้วยการใช้สารละลาย Folin-Ciocalteu (F-C reagent) มีส่วนประกอบสำคัญคือ Phosphomolybdate และ Phosphotungstate สารละลาย F-C reagent สำเร็จรูป และพร้อมใช้ในการทดสอบ ทำปฏิกิริยากับสารมาตรฐานของโพลีฟีนอล (นิยมใช้ gallic acid เป็นสารมาตรฐานของสารโพลีฟีนอล) หรือสารสกัดกระชายดำ จากนั้นเติม โซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) บ่มปฏิกิริยาต่อไปเป็นเวลา 90 นาที ในที่มืด สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของโพลีฟีนอลกับ F-C reagent จะมีสีน้ำเงินเข้ม และดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร การรายงานค่าของปริมาณทั้งหมดของสารโพลีฟีนอล จะแสดงในหน่วย น้ำหนักสมมูล มิลลิกรัมของ gallic acid ต่อ 1 กรัม น้ำหนักสด (mg GAE/g f.w.) [15]

2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกระชายดำ จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้สมการเอมพิริคัล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาให้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีจำนวน 5 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งโดยทั่วไปสมการเอมพิริคัลที่นำมาใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ที่เป็นฟังก์ชันของค่าความชื้น ณ เวลาใด ๆ (Moisture content, M_t) และค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, M_{eq}) แต่เนื่องจากค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความชื้นที่เวลาใด ๆ และค่าความชื้นเริ่มต้น (Initial moisture content, M_i) ดังนั้นจึงประมาณให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (4) [16]

$$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_i - M_{eq}) = M_t / M_i \quad (4)$$

เมื่อ MR คือ ค่าอัตราส่วนความชื้น, M_i คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น (d.b.), M_t คือ ค่าความชื้นที่เวลาใด ๆ (d.b.) และ M_{eq} คือค่าความชื้นสมดุล (d.b.)

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

No.	Name of Model	Model equation	Reference
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	[17]
2	Modified Page I	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[18]
3	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[19]
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[20]
5	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + (bt)$	[21]

*a b c k และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

ในการหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสม โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการอบแห้ง ไปวิเคราะห์สมการโดยวิธีถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) จากผลการหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลรูปแบบต่างๆ ในตารางที่ 1 จะมีดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของแต่ละสมการในการทำนายจลนพลศาสตร์ในการอบแห้ง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6) โดยสมการที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นสมการที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และค่า RMSE ต่ำที่สุด [22]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (6)$$

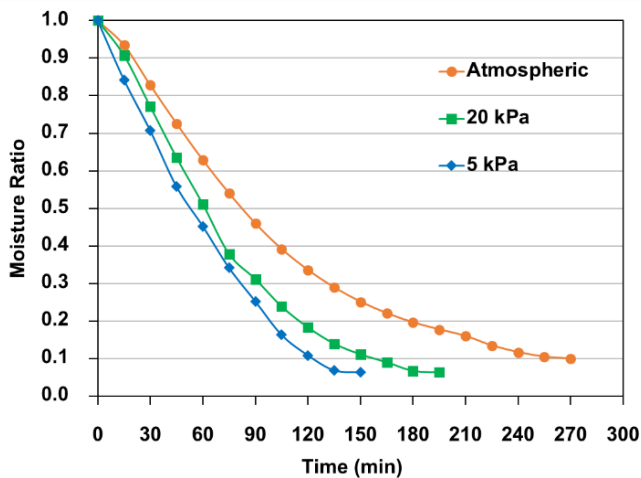
เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง, $\overline{MR_{exp}}$ คือ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง, $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล และ N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

3 ผลการการวิจัย

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งกระชายดำที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 121.58% มาตรฐานแห้ง จนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 7.47-12.18% มาตรฐานแห้ง โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 800 W (ปิด:เปิด = 20:40 วินาที) ที่ความดันบรรยากาศ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa พบว่าความดันภายในห้องอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้น กล่าวคือเมื่ออบแห้งกระชายดำที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 5 kPa ใช้เวลาในการอบแห้ง 150 นาที มีความชื้นสุดท้ายที่ 7.47% มาตรฐานแห้ง แต่เมื่ออบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 20 kPa ใช้เวลาอบแห้ง 195 นาที มีความชื้นสุดท้ายที่ 7.87% มาตรฐานแห้ง และเมื่ออบแห้งที่ความดันบรรยากาศ ใช้เวลาในการอบแห้ง 270 นาที และมีความชื้นสุดท้ายที่ 12.18% มาตรฐานแห้ง การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของกระชายดำ ดังรูปที่ 5

การอบแห้งภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะสามารถลดความชื้นได้เร็วที่สุด เนื่องจากที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จุดเดือดของน้ำจะมีค่าเพียง 32.87 °C ซึ่งต่ำกว่าที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 20 kPa และความดันบรรยากาศซึ่งมีจุดเดือดของน้ำ 60.06 และ 99.97 °C ตามลำดับ ดังนั้นการลดความชื้นในห้องอบแห้งจึงทำให้น้ำในวัสดุระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า [23] จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลง และอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกที่วัสดุยังคงมีความชื้นสูงความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ และคงที่ในที่สุด [24]

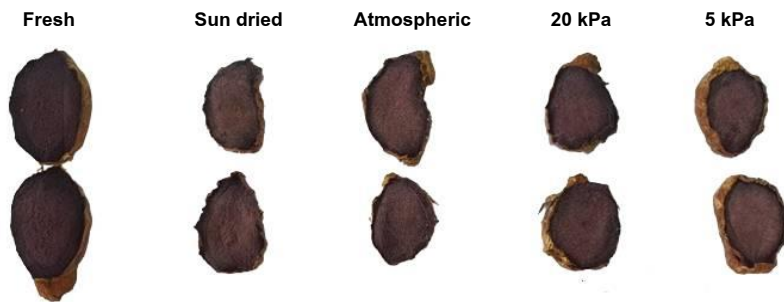


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระชายดำในกระบวนการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa

3.2 คุณภาพของกระชายดำ

หลังจากการทดลองอบแห้งกระชายดำด้วยเงื่อนไขต่างๆ รวมถึงการตากแดด ได้ทำการตรวจวัดค่าคุณภาพด้าน สี ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสารสำคัญและการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการทดลองพบว่ากระชายดำที่ผ่านการอบแห้งมีค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้นจากกระชายดำสด ซึ่งการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นจากกระชายดำมากที่สุด และค่าสีแดง (a^*) จะมีค่าลดลงจากกระชายดำสดและมีค่าสูงขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยความดันสัมบูรณ์ที่ลดลง ส่วนค่าสีน้ำเงิน (b^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากกระชายดำสดตามความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในการทดลองอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa มีการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมจากค่าสีของกระชายดำสดน้อยที่สุด (ΔE) 8.21 และมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยกว่าการตากแดด ส่วนการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะมีการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมสูงที่สุด 10.55 ทั้งนี้การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟจะสร้างความร้อนในการอบแห้งค่อนข้างคงที่ [25] ทำให้ห้องอบแห้งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการทดลอง แต่เมื่อพิจารณาจุดเดือดของน้ำที่ความดันต่างๆ จะพบว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa จุดเดือดของน้ำมีค่า 60.06 °C ขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จุดเดือดของน้ำมีค่าต่ำที่สุด 32.87 °C ซึ่งความร้อนส่วนใหญ่ใช้ในการระเหยน้ำจากกระชายดำ ทำให้กระชายดำมีอุณหภูมิไม่สูงและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล [12] ซึ่งอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสว่างเพิ่มขึ้นจากกระชายดำสด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของกระชายดำที่อบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จึงมีค่าสูงที่สุด ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 6 ในส่วนของปริมาณน้ำอิสระทุกเงื่อนไข

การทดลองมีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้งที่สามารถเก็บรักษาโดยที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้และมีแนวโน้มต่ำลงตามความดันห้องอบแห้งที่ลดลง



รูปที่ 6 สีของกระชายดำที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ

ตารางที่ 2 คุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำอิสระของกระชายดำ

Condition	Moisture (%d.b.)	Color				a_w
		L^*	a^*	b^*	ΔE	
Fresh	121.58	32.68 ± 2.18^a	10.68 ± 0.63^a	-2.68 ± 1.07^a	N/A	N/A
Sun dried	8.10	42.28 ± 2.94^{bc}	8.68 ± 0.82^b	-1.77 ± 0.78^b	9.95 ± 2.78^{ab}	0.471 ± 0.05^{ab}
Atmospheric	12.18	40.31 ± 3.07^b	7.47 ± 0.70^c	-2.74 ± 1.17^a	8.55 ± 2.55^{ab}	0.550 ± 0.01^b
20 kPa	7.87	40.16 ± 3.55^b	8.42 ± 1.03^b	-3.01 ± 1.54^a	8.21 ± 3.09^b	0.399 ± 0.08^a
5 kPa	7.47	42.97 ± 3.44^c	9.00 ± 0.90^b	-3.46 ± 1.00^a	10.55 ± 3.38^a	0.378 ± 0.02^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ในการตรวจสอบการต้านอนุมูลอิสระโดยการตรวจวัดสารฟีนอลิกรวมและทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งจะทำให้สารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงจากกระชายดำสด โดยกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะมีสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด 2.73 ± 0.15 mg GAE/g f.w. และ 1.00 ± 0.02 mg AAE/g f.w. ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าทุกๆ เงื่อนไขการทดลองรวมถึงการตากแดด ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa ใช้เวลาอบแห้งสั้นกว่าเงื่อนไขการอบแห้งอื่น ๆ เป็นผลทำให้สารต้านอนุมูล

อิสระคงตัวได้ดีกว่า เนื่องจากระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นลงช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชันและการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระได้ [26] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณ Total phenolic content และ Antioxidant activity ของกระชายดำที่อบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

Condition	Total phenolic content as gallic acid equivalent (mg GAE/g f.w.)	Antioxidant activity as ascorbic acid equivalent (mg AAE/g f.w.)
Fresh	3.41 ± 0.10^a	1.09 ± 0.10^a
Sun dried	2.34 ± 0.19^b	0.93 ± 0.06^{bc}
Atmospheric	2.34 ± 0.07^b	0.85 ± 0.01^c
20 kPa	2.68 ± 0.10^b	0.98 ± 0.02^b
5 kPa	2.73 ± 0.15^b	1.00 ± 0.04^{ab}

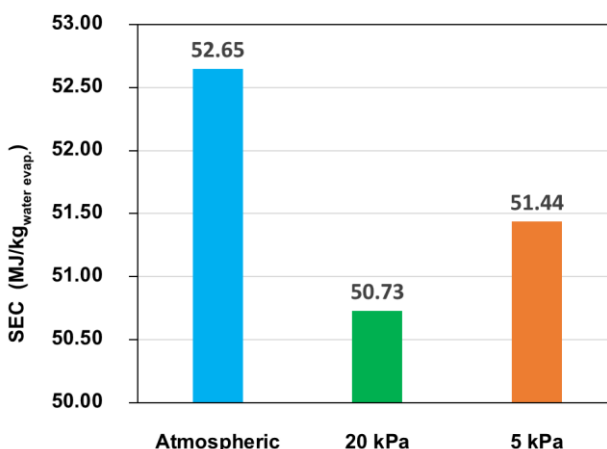
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าการอบแห้งกระชายดำด้วยกำลังไมโครเวฟ 800 W ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งเพื่อการรักษาคุณภาพสมุนไพรในเชิงสมุนไพร และแม้ว่าการอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันจะมีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีจากการวัดที่แตกต่างกัน แต่เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพแล้วสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งในทุกเงื่อนไขไม่แตกต่างกันมากนัก

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งที่ความดันบรรยากาศมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงที่สุด $52.65 \text{ MJ/kg}_{\text{water evap.}}$ เนื่องจากใช้เวลาอบแห้งนานกว่าการทดลองอื่นๆ และการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa พบว่ามีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ $51.44 \text{ MJ/kg}_{\text{water evap.}}$ ซึ่งสูงกว่าการอบแห้งที่ความดัน 20 kPa ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ $50.73 \text{ MJ/kg}_{\text{water evap.}}$ เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการสร้างความดันสุญญากาศมากกว่าเพื่อให้ได้ความดันที่กำหนด บัณฑิตสุญญากาศจึงสิ้นเปลืองพลังงานในการดูดอากาศออกจากห้องอบแห้งมากกว่า ดังรูปที่ 7 โดยเวลาในการ

อบแห้งที่ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa คือ 270, 195 และ 150 นาทีตามลำดับ



รูปที่ 7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งกระชายดำ

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

จากผลการทดลองด้านจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 5 รูปแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) อยู่ในช่วง 0.98436-0.99936 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ในช่วง 0.00737-0.03887 ดังตารางที่ 4 โดยพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และค่า RMSE ต่ำที่สุด คือ สมการของ Midilli โดยให้ค่า $R^2 = 0.99936$ และ $RMSE = 0.00737$

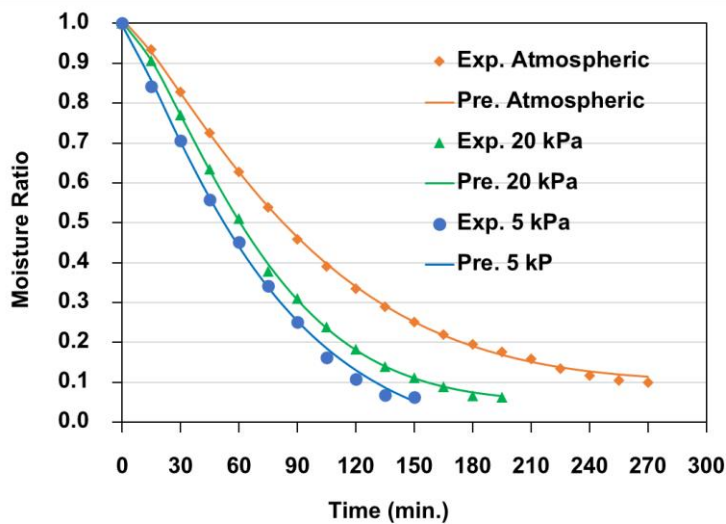
แบบจำลองเอมพิริคัลดังตารางที่ 1 เป็นรูปแบบของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเป็นรูปแบบที่คล้ายกับเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ ทำให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.97 ทุกแบบจำลอง โดยเฉพาะแบบจำลองเอมพิริคัลของ Modified Page I และ Midilli ซึ่งมีรูปแบบของสมการเทอมแรกคล้ายกันโดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.99 แต่สมการ Midilli จะมีค่า R^2 สูงกว่าเล็กน้อย เมื่อพิจารณาแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli จะประกอบด้วยสมการที่เป็นฟังก์ชันของเวลาสองเทอมรวมกัน คือ สมการเอ็กซ์โพเนนเชียลและสมการเชิงเส้น โดยค่าคงที่ของสมการเชิงเส้นมีค่าค่อนข้างน้อยในช่วงแรกของการอบแห้งจึงไม่ส่งผลต่อการทำนายความชื้นมากนัก แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงท้ายของการอบแห้งความชื้นของวัสดุเปลี่ยนแปลงน้อยหรือมีความชื้นของกราฟน้อย ความชันของกราฟที่ได้จากการคำนวณของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลจะมีค่ามากกว่าผลการทดลอง ดังนั้นเทอมของสมการ

เชิงเส้นซึ่งมีค่ามากขึ้นในช่วงท้ายจะช่วยชดเชยค่าที่ได้จากเทอมของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลส่งผลให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

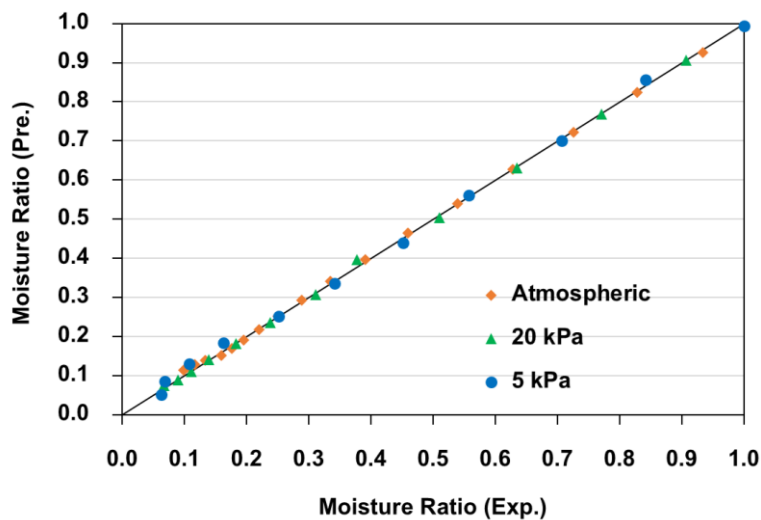
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

Model	Condition	Constant	R ²	RMSE
Newton	Atmospheric	k=0.00860	0.99195	0.02570
	20 kPa	k=0.01264	0.97922	0.04550
	5 kPa	k=0.01475	0.98191	0.04541
	Average		0.98436	0.03887
Modified Page I	Atmospheric	k=0.00855 n=1.11512	0.99597	0.01806
	20 kPa	k=0.01237 n=1.30476	0.99855	0.01192
	5 kPa	k=0.01449 n=1.27552	0.99818	0.01316
	Average		0.99756	0.01438
Handerson and Pabis	Atmospheric	k=0.00905 a=1.04838	0.99547	0.01915
	20 kPa	k=0.01360 a=1.07594	0.98694	0.03572
	5 kPa	k=0.01551 a=1.04990	0.98587	0.03661
	Average		0.98943	0.03049
Logarithmic	Atmospheric	k=0.00905 a=1.04845 c=-0.00013	0.99547	0.01915
	20 kPa	k=0.01090 a=1.15732 c=-0.10562	0.99218	0.02765
	5 kPa	k=0.01179 a=1.18012 c=-0.14984	0.99656	0.01805
	Average		0.99474	0.02162
Midilli	Atmospheric	k=0.00314 a=1.00963 b=0.00028 n=1.24082	0.99954	0.00611
	20 kPa	k=0.00250 a=1.00341 b=0.00020 n=1.38029	0.99968	0.00557
	5 kPa	k=0.00549 a=0.99456 b=-0.00028 n=1.21081	0.99885	0.01045
	Average		0.99936	0.00737

การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการทำนายตามสมการของ Midilli ดังรูปที่ 8 และเมื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นตรงที่มีความชัน 45 องศา ดังรูปที่ 9 แสดงว่าแบบจำลองเอมพิริคัล Midilli สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างการทดลองและผลการทำนายด้วยแบบจำลองของ Midilli

4. สรุป

การอบแห้งกระชายดำที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 121.58% มาตรฐานแห้ง ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ ความดัน

สัมบูรณ์ 20 kPa และ 5 kPa ตามลำดับ จนกระทั่งมีความชื้นสุดท้าย ที่ 7.47-12.18% มาตรฐานแห้ง พบว่าเมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลงส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงด้วย โดยการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะใช้เวลาการอบแห้งสั้นที่สุดคือ 150 นาที การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด คือ 50.73 MJ/kg_{water evap.} และมีค่าความเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสีของกระชายดำสด คือมีค่า $\Delta E = 8.21$ และปริมาณน้ำอิสระทุกการทดลองมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คืออยู่ในช่วง 0.378-0.550 สารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงจากกระชายดำสดในทุก ๆ เงื่อนไขการอบแห้ง คืออยู่ในช่วง 2.34-2.73 mg GAE/g f.w. และ 0.83-1.00 mg AAE/g f.w. ตามลำดับ และกระชายดำที่อบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดและใกล้เคียงกับกระชายดำสดมากที่สุด คือ 2.73 ± 0.15 mg GAE/g f.w. และ 1.00 ± 0.04 mg AAE/g f.w. ตามลำดับ และสูงกว่าการตากแดดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งในชุดการทดลองนี้ได้แม่นยำที่สุด ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด $R^2 = 0.99936$ และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด RMSE = 0.00737

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก และภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

References

- [1] Department of Agricultural Extension. Krachaidum production for export. Agricultural Extension Journal 2020;295:27-9. (In Thai)
- [2] National Science and Technology Development Agency. Project to study the market opportunity of targeted. Thai Herbs Journal 2018;61-72. (In Thai)
- [3] Li Z, Raghavan GSV, Orsat V. Optimal power control strategies in microwave drying. Journal of Food Engineering 2010;99:263-8.
- [4] Lv HF, Ma XX, Zhang B, Chen XF, Liu XM, Fang CH, et al. Microwave-vacuum drying of round bamboo: a study of the physical properties. Construction and Building Materials 2019;211:44-51.

- [5] Songsermpong S. Microwave Processing of Food. Bangkok: Danex Interporation; 2016. (In Thai)
- [6] Chahbani A, Fakhfakh N, Baltia MA, Mabrouk M, El-Hatmi H, Zouari N, et al. Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.). Food Bioscience 2018;25:32-8.
- [7] Keser D, Guclu G, Kelebek H, Keskin H, Soysal Y, Sekerli YE, et al. Characterization of aroma and phenolic composition of carrot (*Daucus carota* 'Nantes') powders obtained from intermittent microwave drying using GC-MS and LC-MS/MS. Food and Bioproducts Processing. 2020;119:350-9.
- [8] National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. Thai agricultural Standard. TAS 3005 PART 2-2020. (In Thai)
- [9] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analysis Chemists. 17th ed. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [10] Manangan W, Witinantakit K. Water lily drying using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding, Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(3):84-98. (In Thai)
- [11] Tirawanichakul S, Chanchiew S, Tirawanichakul Y. Pennywort drying using infrared radiation drying kinetics, energy consumption and quality aspect. KKU Research Journal 2013;18(2):311-24. (In Thai)
- [12] Zhoua YH, Pei YP, Sutar PP, Liu DH, Deng LZ, Duan X, et al. Pulsed vacuum drying of banana: Effects of ripeness on drying kinetics and physicochemical properties and related mechanism. Food and Science Technology 2022;161:113362.
- [13] Devahastin S. Drying of Foods and Biomaterials. Bangkok: Top Publishing; 2012. (In Thai)
- [14] Magalhaes LM, Segundo MA, Reis S, Lima JL. Methodological aspects about in vitro evaluation of antioxidant properties. Analytica Chimica Acta 2008;613(1):1-19.
- [15] Ainsworth EA, Gillespie KM. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. Nature Protocol 2007;2(4): 875-7.
- [16] Rungsawang S, Jaekhom S, Uengkimbuan N, Witinantakit K. Shiitake mushroom drying using vacuum and infrared radiation technique. SWU Engineering Journal 2019;14(3):1-13. (In Thai)

- [17] Lui Q, Bakker-Arkema FW. Stochastic modeling of grain drying: part 2 mode development. *Journal of Agricultural Research* 1997;66:275-80.
- [18] Diamante LM, & Munro PA. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 1993;51:271-6.
- [19] Doymaz I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 2004;61:359-64.
- [20] Togrul IT, Pehlivan D. Mathematical modeling of soar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering* 2002;55:209-16.
- [21] Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single- layer drying. *Drying Technology* 2002;20(7):1503-13.
- [22] Faruq AA, Zhang M, Fan D. Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices. *Drying Technology* 2019;37(3):409-23.
- [23] Song C, Wu T, Li Z, Li J, Chen H. Analysis of the heat transfer characteristics of blackberries during microwave vacuum heating. *Journal of Food Engineering* 2018;22:70-8.
- [24] Cuccurullo G, Giordano L, Metallo A, Cinquanta L. Drying rate control in microwave assisted processing of sliced apples. *Biosystems Engineering* 2018;180:24-30.
- [25] Poongunploy P. Effect of black galingale drying by microwave-hot air combination on drying behavior, temperature, color, shrinkage and specific energy consumption. *Journal of Science & Technology MSU* 2017;36(6):661-7.
- [26] Zeng S, Wang B, Lv W, Wu Y. Effects of microwave power and hot air temperature on the physicochemical properties of dried ginger (*Zingiber officinale*) using microwave hot-air rolling drying. *Food Chemistry* 2023;404(Pt B):134741.

ประวัติผู้เขียนบทความ



จามร ปักดีศรีแพง ตำแหน่ง นักศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 ม.6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 088-282-9959 Email: jamornpakseepaeng@gmail.com



ดวงสิริ สยมภาค ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 ม.6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 089-562-9894 Email: dhoungsiri_sa@rmutto.ac.th



กิตติศักดิ์ วิวิ้นท์กิตต์ ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกเลขที่ 43 ม.6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 086-386-1885 Email: kittisak_wi@rmutto.ac.th

Article History:

Received: January 12, 2023

Revised: April 22, 2023

Accepted: May 10, 2023

การพัฒนาระบบเตาเผาถ่านชีวมวลควบคุมระบบ ด้วยอินเทอร์เน็ตออฟดิงส์

A DEVELOPMENT OF BIOMASS CHARCOAL KILN SYSTEM CONTROL BY INTERNET OF THINGS

ปฐมพงษ์ หอมศรี¹ กมลวรรณ จิตจักร² และ จิรวัดน์ สิตรานนท์³

¹นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,
patomphong.homsri@gmail.com

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

Patomphong Homsri¹, Kamonwan Jitjack² and Jirawat Sitranon³

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

^{2,3}Lecturer, Department of Energy Technology, School of Engineering and Innovation,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,
Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand,

²kamonwan_ji@rmutto.ac.th, ³Jirawat_si@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเตาเผาถ่านชีวมวลเชิงความร้อนประสิทธิภาพสูงควบคุมด้วยระบบอินเทอร์เน็ตออฟดิงส์ โดยทำการออกแบบและสร้างเป็นแบบถังแนวนอนขนาด 400 ลิตรทำจากสแตนเลส ภายในมีช่องกระจายความร้อน จำนวน 3 ตำแหน่ง สามารถกระจายความร้อนได้ในเตาได้อย่างทั่วถึง มีการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน มีท่อน้ำสัมน้ำไม่เชื่อมเข้ากับระบบกำจัดมลพิษทางอากาศที่เป็นระบบสกรับเบอร์แบบน้ำมีปั๊มน้ำพ่นแบบสเปรย์ 2 ตำแหน่ง ขนาด 0.5 แรงม้า และมีพัดลมดูดอากาศขนาด 1 แรงม้า เพื่อกำจัดก๊าซไอเสียที่ควบแน่นไม่ได้และมีแผ่นกรองคาร์บอนกัมมันต์เป็นการลดมลพิษออกสู่บรรยากาศ และใช้การควบคุมปัจจัยที่กำหนดของระบบการเผาถ่านชีวมวลผ่านสมาร์ตโฟนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ที่เชื่อมต่อกับระบบการทำงานของเตาเผา ระบบจะทำการควบคุมการปิดช่องอากาศเข้า เมื่อค่าอุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้เหมาะสม การทดสอบระบบได้ทำการเผาถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ความชื้นร้อยละ 13.20 ตามมาตรฐานเปียก ผลการทดลองพบว่าใช้เวลาในการเผาไหม้ไม้จนเป็นถ่านรวม 480 นาที โดยได้น้ำหนักของถ่านชีวมวลร้อยละ 39.48 เมื่อเทียบกับเนื้อไม้ก่อนทำการเผา และมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานร้อยละ 40.39 ระบบควบคุมทางไกลผ่านสมาร์ทโฟนสามารถควบคุมและตรวจสอบค่าความร้อนแต่ละตำแหน่งในเตาเผาได้ทั้งระบบ สามารถติดตามค่าได้ตลอดการทดลอง

คำสำคัญ: เตาเผาถ่านชีวมวล อินเทอร์เน็ตออฟติงส์ ถ่านชีวมวล

ABSTRACT

This study was aimed to develop a highly thermal effective biomass charcoal kiln controlled by the Internet of things (IoT). The kiln was designed from a 400-liter horizontal stainless steel tank. The internal wall was attached with 3 metal fins to circulate the heat inside the kiln, and insulation was installed to reduce the heat loss. The wood vinegar tube was connected to an air pollution disposal system, a wet scrubber tower with two ½ horsepower electric sprayers, and a one-horsepower air blower was installed to dispose non-condensable exhaust gas. The activated charcoal filters were used to reduce air pollutants from the kiln. The parameters of the kiln was controlled by smartphone via the Internet connection installed in the kiln. All air entrances of the system were closed once the temperature reached the certain set points. The Eucalyptus firewood with a diameter of 4-6 centimeters and length of 60 centimeters were used to test the system, where the initial moisture content was at 13.20 %wet basis. It was found that the production process took 480 minutes, and the output biomass charcoal was 39.48% of the initial firewood weight. The energy conversion efficiency was 40.39%. A smartphone application was able to remotely control and track the system parameters during the experiment.

KEYWORDS: Biomass charcoal kiln, Internet of things, Biomass charcoal

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น ข้าว อ้อย ยางพารา มันสำปะหลัง ปาล์ม ข้าวโพด เป็นต้น โดยมีพื้นที่ทางการเกษตรในประเทศไทยรวม 149.25 ล้านไร่ [1] ซึ่งเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีทำให้ประเทศไทยมีชีวมวลเกิดขึ้นและมีชีวมวลเหลือทิ้ง

ทางการเกษตรที่แปรผันโดยตรงกับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศเป็นจำนวนมาก การนำชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะระดับชุมชนของกลุ่มเกษตรกรพื้นที่ต่างจังหวัด ที่ได้นำชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเป็นเชื้อเพลิง ที่สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนสูง เช่น การนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาทำเชื้อเพลิงเชื้ออัดแท่งของกลุ่มเกษตรกรอำเภอแก่งหางแมว จังหวัดจันทบุรี [2] หรือการนำกะลามะพร้าว เปลือกและผลไม้ กิ่ง และลำต้นไม้ยางพาราของกลุ่มเกษตรกรทวิผล อำเภอnahม่อม จังหวัดสงขลา นำมาผลิตเป็นถ่านชีวมวลตามวิถีชาวสวนยางพารา [3] เป็นต้น

ปริมาณความต้องการของถ่านชีวมวลมีปริมาณความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นับตั้งแต่ราคาน้ำมันมีการปรับตัวที่สูงขึ้น ทำให้ภาคครัวเรือนเริ่มให้ความสนใจในการนำถ่านชีวมวลมาใช้ในการหุงต้มอาหารเพิ่มมากขึ้น ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้ด้วยสถานการณ์การแพร่กระจายของโรคติดต่อเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ได้คลี่คลายลง และมียกเลิกประกาศสถานการณ์ฉุกเฉินในทุกเขตท้องที่ทั่วราชอาณาจักรเมื่อวันที่ 1 ตุลาคมที่ผ่านมาทำให้ภาคธุรกิจบริการร้านอาหารโดยเฉพาะร้านหมูกระทะมีความต้องการถ่านชีวมวลในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ปัจจุบันเตาเผาถ่านมีการใช้งานกันหลายรูปแบบในกลุ่มเกษตรกร เช่น เตาเผาแบบถั่งตั้งและแบบถั่งนอนขนาด 200 ลิตรโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้พัฒนาขึ้น [4] และเตาเผาแบบดินเหนียว เตาอิฐก่อ เตาอิฐเตะ และเตาเผายุคใหม่รูปทรงและขนาดต่าง ๆ ตามการใช้งานในแต่ละท้องถิ่น แต่เตาเผาถ่านที่เกษตรกรใช้อยู่ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากไม่สามารถควบคุมและจำกัดปริมาณของอากาศภายในเตาเผาได้ และมีการกระจายความร้อนในเตาเผายังไม่ดีหรือค่าความร้อนไม่ทั่วถึง [5] เตาเผาถ่านที่มีคุณภาพสูงจะมีลักษณะเป็นแบบถั่งนอนให้ค่าความร้อนสูงขึ้นและติดไฟได้เป็นเวลานาน [6-8] อีกทั้งการระบบการเผาไหม้ถ่านการควบคุมต่าง ๆ ยังต้องใช้ความชำนาญและแรงงานคนในการดำเนินการเผาตลอดกระบวนการและใช้เวลาในกระบวนการผลิตมาก

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาและนำนวัตกรรมและเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ใช้กับเตาเผาถ่านกันเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา ลดแรงงานคน และระยะเวลาในการเผาไหม้ของเตาเผา เช่น การนำอินเทอร์เน็ทออฟติงส์เข้ามาติดตั้งในกระบวนการเผาในเตาเผาต่าง ๆ มากขึ้น ดังผลงานวิจัยของ Intamas et al [9] ได้สร้างชุดเตาสำหรับขยะติดเชื้อโควิด-19 ในเขตเทศบาลนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช ควบคุมด้วยระบบอัจฉริยะ (IOT) และทดสอบประสิทธิภาพของชุดเตาเผา ผลการศึกษาพบว่า การสร้างชุดเตาเผาสำหรับขยะติดเชื้อโควิด-19 ที่ระบบควบคุมอัจฉริยะ (IOT) เป็นการนำนวัตกรรมสำหรับเตาเผาให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงสุด 99.90% และอัตราการเผาขยะสูงที่สุดที่ 182 kg/hr นอกจากนี้ระบบควบคุมอัจฉริยะ (IOT) ยังสามารถควบคุมการทำงานเปิดวาล์วแก๊สและเป็นต้นแบบควบคุมการเปิดวาล์วแก๊สได้จริงและมีประสิทธิภาพ Maruyama et al [10] ได้ทำการออกแบบและสร้างเตาเผาถ่านความร้อนสูงแบบมี

ระบบฝาปิดอัตโนมัติ เพื่อแก้ไขปัญหาในเรื่องเวลาในการดูแลระบบและเวลาการเผาไหม้ของเตาเผาแกลบดำ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแรกวัตถุดิบที่ใส่เข้าไปเท่ากับ 18 kg ได้แกลบดำเท่ากับ 7.5 kg หรือ 41.67% ใช้คนทำการปิดเตาใช้เวลา 5 ชั่วโมง และแบบที่สองมีการออกแบบและสร้างระบบปิดอัตโนมัติและชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ มีการติดตั้งเซ็นเซอร์ด้านล่างของเตาเผาและตั้งค่าอุณหภูมิที่ 280 °C เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด เซ็นเซอร์จะสั่งให้กลไกของระบบปิดอัตโนมัติปิดลงทันที วัตถุดิบที่ใส่เข้าไปเท่ากัน 18 kg แต่แกลบดำได้จากแบบที่สองมีปริมาณมากกว่าแบบแรก 8.3 kg หรือ 46.12% ซึ่งประหยัดเวลาในการดูแลเตาจากระบบแรก นอกจากนี้การเผาแกลบยังได้แกลบที่มีคุณภาพสูงมีปริมาณเก้าน้อยไม่เกิน 10% ของแกลบดำทั้งหมด ซึ่งผลการทดลองได้ปริมาณเก้าประมาณ 5% จึงทำให้เตาเผาแกลบมีคุณภาพขึ้น นอกจากนี้ Ruangsaeen et al [6] ได้ทำการพัฒนาเตาเผาถ่านไม้หุงต้มมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนขนาดความจุ 750 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณความชื้น สารระเหย เก้า และค่าความร้อน ให้ได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านไม้หุงต้ม (มผช. 657/2547) โดยใช้วัตถุดิบเป็นไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณน้ำหนัก 3 ระดับ คือ 400 kg 600 kg และ 800 kg ผลที่ได้พบว่า ถ่านมีค่าความชื้น 5-11% ปริมาณสารระเหย 20-26% ปริมาณเก้า 5-10% และค่าความร้อนสูง 6,243-6,599 cal/g ซึ่งถ่านที่เผาได้มีแนวโน้มเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านไม้หุงต้ม

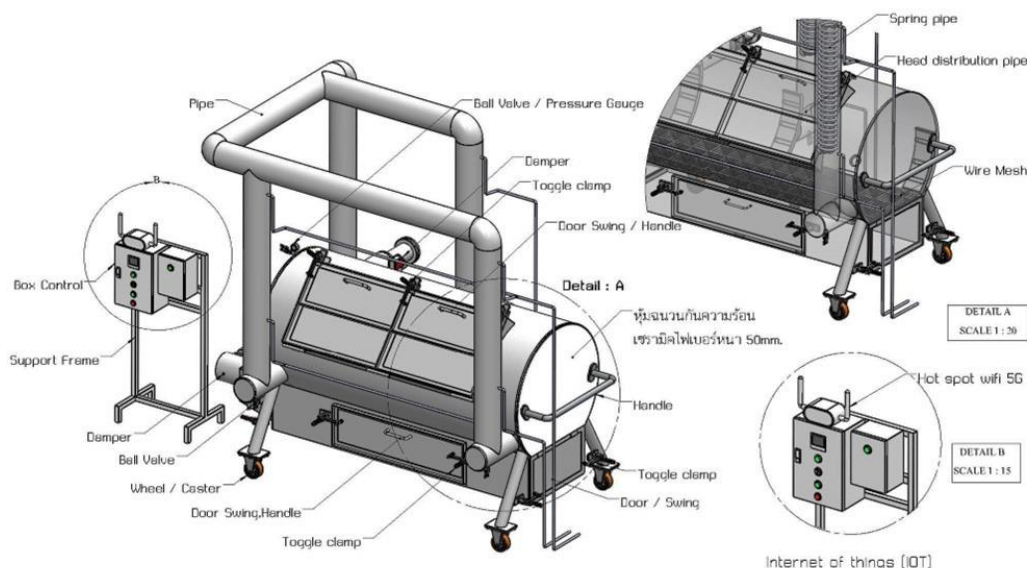
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเตาเผาถ่านชีวมวลแบบถังนอนขนาด 400 ลิตร ประสิทธิภาพสูงและควบคุมการเผาไหม้โดยใช้การควบคุมผ่านระบบอินเทอร์เน็ทออฟติงส์ผ่านระบบสมาร์ตโฟนและคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถใช้ควบคุมชุดการปิดช่องเชื้อเพลิงและปล่อยระบายควัน เพื่อให้ชีวมวลในเตาเผาเกิดการเผาไหม้ได้สมบูรณ์และลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตถ่านในแต่ละชุดการเผา ลดจำนวนคนดูแลระบบ และได้นำสัสมควันไม้ในกระบวนการผลิตถ่าน เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรให้สูงขึ้น เป็นการสร้างงานสร้างอาชีพเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับกลุ่มเกษตรกรในพื้นที่ และสามารถนำไปพัฒนาเพื่อต่อยอดในเชิงพาณิชย์ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และทำให้เกิดอาชีพใหม่ ๆ ของกลุ่มเกษตรกรเกิดขึ้นอีกด้วย

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบเตาเผาถ่านชีวมวล

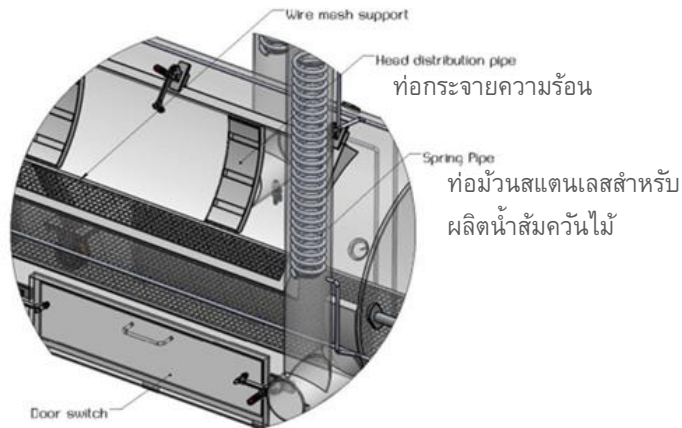
เตาเผาชีวมวลออกแบบให้เป็นแบบแนวนอนเพื่อให้มีค่าความร้อนสูงและมีการกระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึงโดยมีขนาด 0.80x1.75 เมตร คิดเป็นปริมาตร 0.88 ลูกบาศก์เมตร โดยตัวเตาทำจากวัสดุสแตนเลสหนา 3 มิลลิเมตร มีช่องใส่เชื้อเพลิงสำหรับเป็นช่องใส่ฟืนที่อยู่ด้านล่างของเตาจำนวน 1 ช่อง ขนาดกว้าง 0.30 เมตร ยาว 0.40 เมตร ปล่อยระบายควันและท่อน้ำสัสม

ควันท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.50 เซนติเมตร สูง 1.50 เมตร เพื่อทำหน้าที่ระบายควันท่อเพื่อควบแน่นน้ำส้มควันท่อจำนวน 3 ปล่อง ดังแสดงในรูปที่ 1



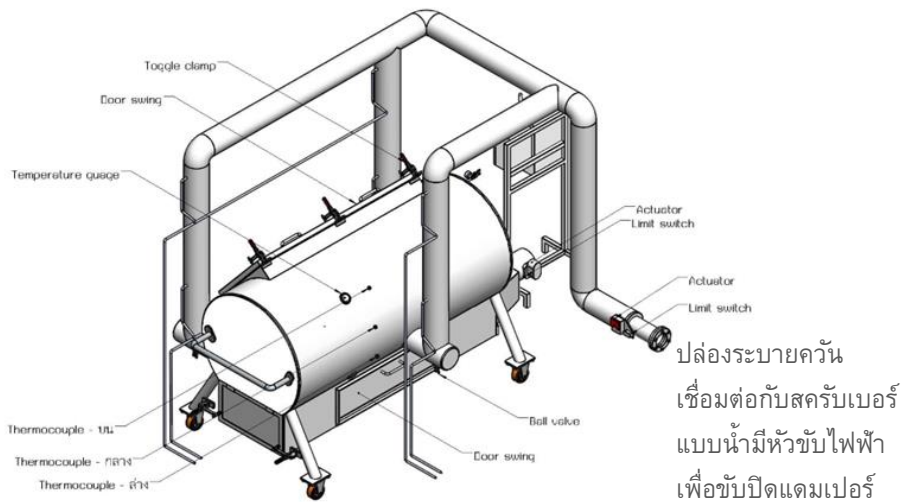
รูปที่ 1 องค์ประกอบของเตาเผาถ่านชีวมวล

ภายในเตาเผามีท่อกระจายความร้อนที่แนบชิดไปกับเตาเผาจำนวน 3 ตำแหน่ง ท่อกระจายความร้อนจะนำความร้อนจากด้านล่างขึ้นมายังด้านบนและบนของเตาเผา เตาเผามีการหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเซรามิกไฟเบอร์ ขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร สามารถทนความร้อนได้สูงสุด $1,300^{\circ}\text{C}$ [11-12] และรอบนอกหุ้มซ้ำด้วยแผ่นสแตนเลสขนาดความหนา 0.50 มิลลิเมตร ใช้วงแหวนเซรามิกไฟเบอร์ขนาดความหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อลดการสูญเสียความร้อนขณะเผาไหม้ รวมทั้งใช้วงแหวนกันไฟที่มีคุณสมบัติสามารถทนความร้อนสูงสุด $1,300^{\circ}\text{C}$ ใส่วงแหวนกันไฟที่ขอบประตูและช่องเชื้อเพลิงด้านล่างเพื่อป้องกันการรั่วของก๊าซจากการเผาไหม้และอากาศที่สามารถเข้าไปภายในเตาเผาได้ [13] มีโครงสร้างที่ทำหน้าที่ยึดเตาเผาให้มีความแข็งแรงเพิ่มล้อเหล็กจำนวน 4 ล้อเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิทั้งภายในเตาบริเวณด้านบนและด้านล่างและภายในปล่องควันท่อจะมีท่อสแตนเลสม้วน (Spring pipe) ขนาดท่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/2 นิ้ว ม้วนคอยล์ขนาด $75 \times 15 \times 100$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2

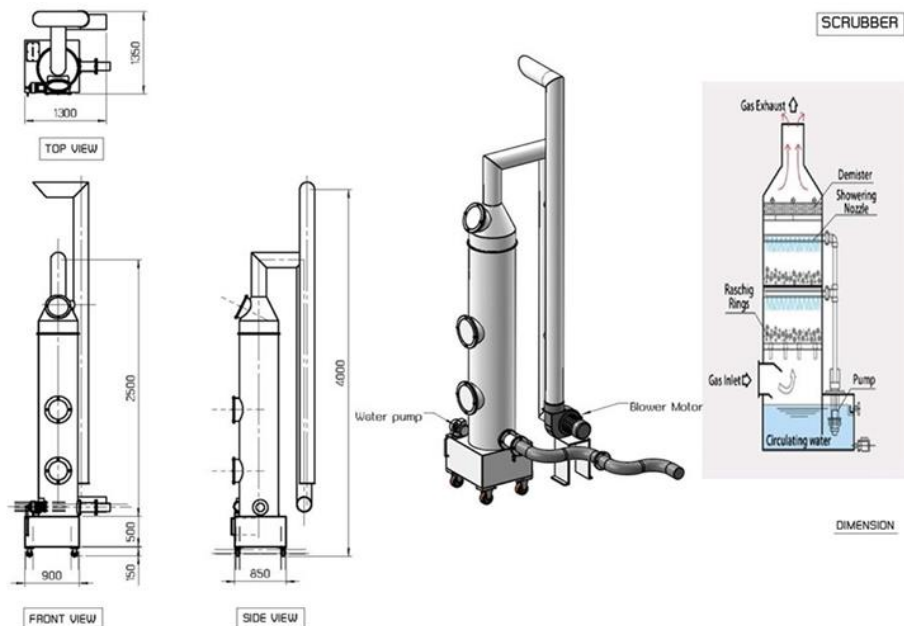


รูปที่ 2 ช่องกระจายความร้อนและท่อน้ำส้มควันไม้ภายในเตาเผาถ่านชีวมวล

ปล่องระบายควันเชื่อมต่อกับระบบควบคุมมลพิษทางอากาศด้วยสกริปเบอร์แบบน้ำ เมื่อก๊าซพิษและน้ำมันดินที่เกิดจากการเผาไหม้ออกจากเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 3 จะผ่านเข้าระบบกำจัดมลพิษทางอากาศด้วยสกริปเบอร์แบบน้ำ ซึ่งมีขนาดกว้างxสูง เป็น 0.4x1.8 เมตร สกริปเบอร์ทำจากวัสดุสแตนเลสหนา 3 มิลลิเมตร ใช้พัดลมดูดอากาศขนาด 1 แรงม้า และปั๊มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า เพื่อฉีดพ่นด้วยสเปรย์ฝอยจำนวน 2 จุด มีแพ็คกิ้งมีเดีย (Packing Media) คอยดักจับก๊าซพิษและน้ำมันดินด้านใน ด้านบนของสกริปเบอร์มีแผ่นกรอง (Carbon Filter) ที่ทำจากถ่านคาร์บอนกัมมันต์ เพื่อใช้สำหรับกรองอากาศเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นทำการติดตั้งระบบควบคุม พร้อมติดตั้งชุดกระจายสัญญาณ 5G พร้อมทำการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตออฟติงส์เข้ากับหัวขับไฟฟ้าและลิมิตสวิตช์เข้ากับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อทำการบันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผาทั้ง 3 ตำแหน่ง และติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอลทำงานโดยอัตโนมัติ เมื่อค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาด้านล่างถึงค่าที่ตั้งไว้ในระบบหัวขับไฟฟ้าจะทำการสั่งให้แอมเปอร์ปิดช่องอากาศที่เข้าเตา และปิดช่องอากาศที่ไปยังสกริปเบอร์แบบน้ำด้วยทั้ง 2 ตำแหน่ง



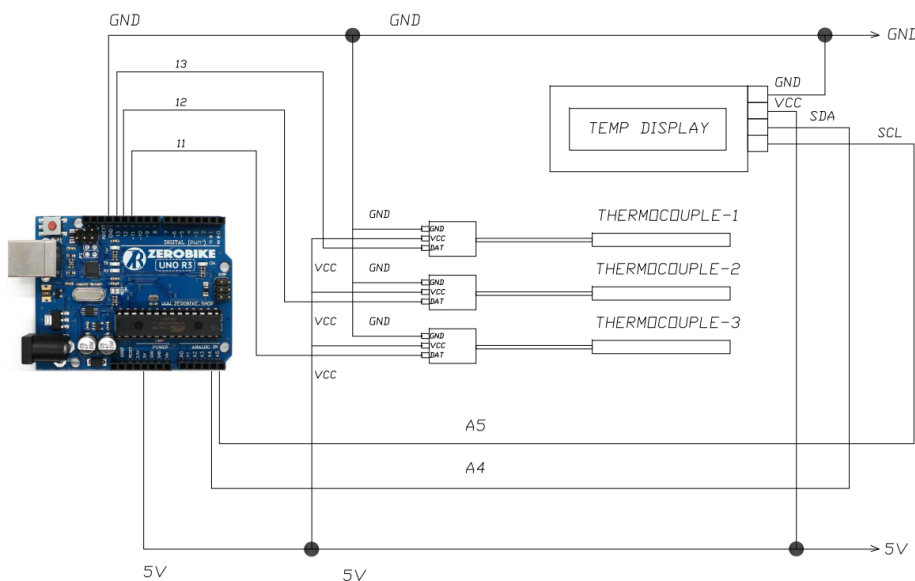
รูปที่ 3 ปล่องระบายควันเชื่อมต่อกับระบบควบคุมมลพิษทางอากาศด้วยสกริปเตอร์แบบน้ำ



รูปที่ 4 ชุดระบบควบคุมมลพิษทางอากาศด้วยสกริปเตอร์แบบน้ำ

2.2 การออกแบบและติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตออฟติงส์

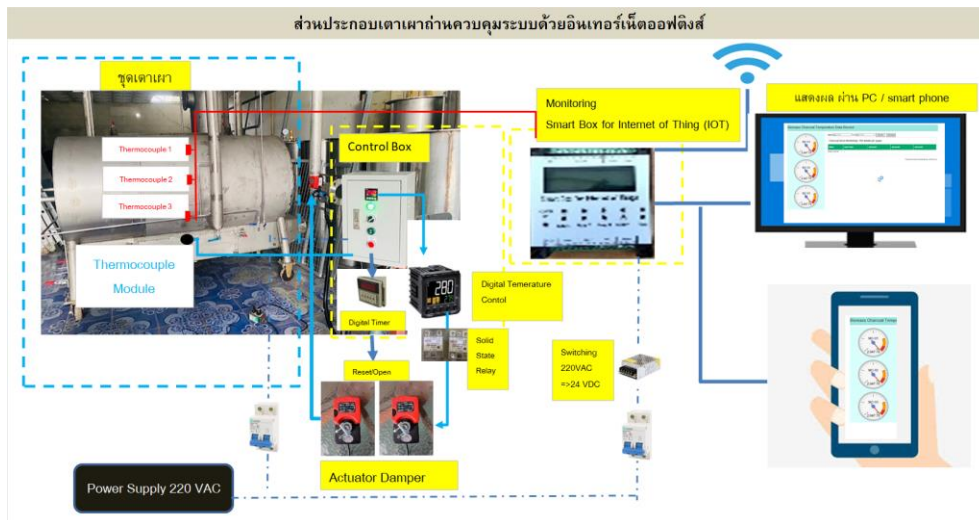
ทำการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี C++ ของ Arduino สำหรับใช้ควบคุมระบบโดยระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ผ่านคอมพิวเตอร์และสมาร์ทโฟน เขียนโค้ดในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 Arduino Uno ด้วยโปรแกรม Arduino IDE ผ่านฟังก์ชันสำหรับควบคุมการปิดด้วยระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ผ่านคอมพิวเตอร์และสมาร์ทโฟน และทำการคอมไพล์โปรแกรม Arduino IDE และดาวน์โหลดโปรแกรม Arduino IDE ลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และทำการทดสอบการทำงานของโปรแกรม [14] ออกแบบระบบอินเทอร์เน็ตออฟติงส์ โดยเลือกใช้ PHP + Java Script เนื่องจากเป็นแอปพลิเคชันสำหรับงานอินเทอร์เน็ตออฟติงส์ เป็นโปรแกรมที่เขียนง่าย ไม่ต้องทำการเขียนแอปพลิเคชันสามารถใช้งานเชื่อมต่อเข้ากับอินเทอร์เน็ตและชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น Arduino ESP8266 ESP32 Raspberry Pi เป็นต้น และสามารถรองรับได้ทั้งแอนดรอยด์และไอโอเอส [14-15] สำหรับการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าที่ใช้กับบอร์ด Arduino ในระบบอินเทอร์เน็ตออฟติงส์ แสดงในรูปที่ 5



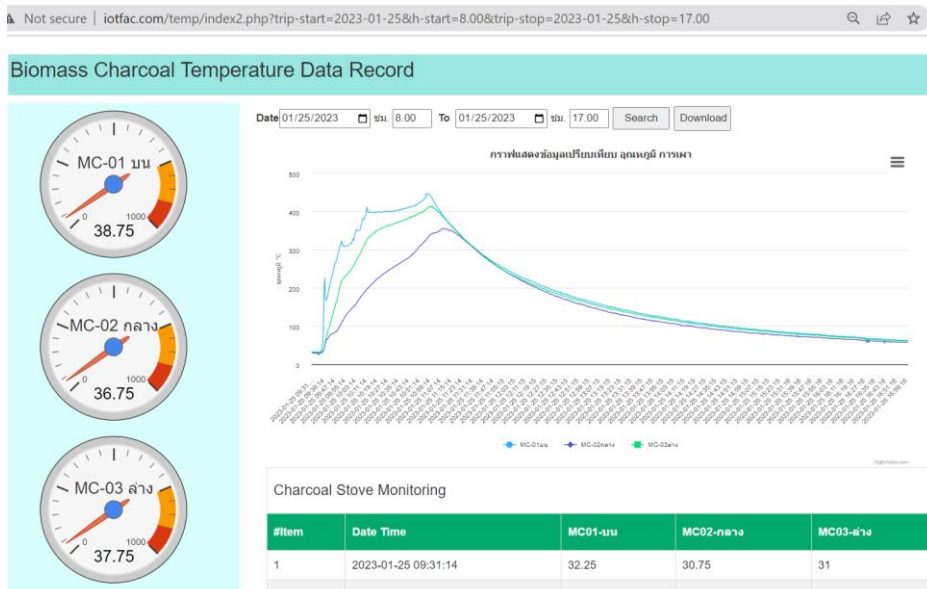
รูปที่ 5 การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าที่ใช้กับ Arduino ในระบบอินเทอร์เน็ตออฟติงส์

ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 3 ตำแหน่ง บน กลาง และล่าง และระบบอินเทอร์เน็ตออฟติงส์ในเตาเผาแสดงได้ดังรูปที่ 6 ในการนำอินเทอร์เน็ตออฟติงส์มาใช้ในการกระบวนการเผาถ่านเป็นการเพิ่มระบบจัดการข้อมูล เพื่อให้ส่งข้อมูลค่าอุณหภูมิของเตาเผาตำแหน่ง บน กลาง และล่าง เข้า Cloud Server ทุก ๆ 30 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยผ่านระบบ

อินเทอร์เน็ตไร้สาย มีหน้าจอแสดงผลอุณหภูมิบนเว็บไซต์ทันทีและต่อเนื่องจนจบกระบวนการ สามารถดูสถานะอุณหภูมิได้จากทุกที่บนสมาร์ทโฟน และสามารถดูค่าอุณหภูมีย้อนหลังได้ 3 เดือน มีระบบสืบค้นข้อมูลตามวัน เดือน ปี สามารถบันทึกผลออกมาเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้ในการประมวลผลการทดลองได้อย่างสะดวก และผู้ปฏิบัติงานไม่จำเป็นต้องอยู่หน้าเตาเผาเพื่อเฝ้าดูอุณหภูมิที่หน้าเตาตลอดเวลา

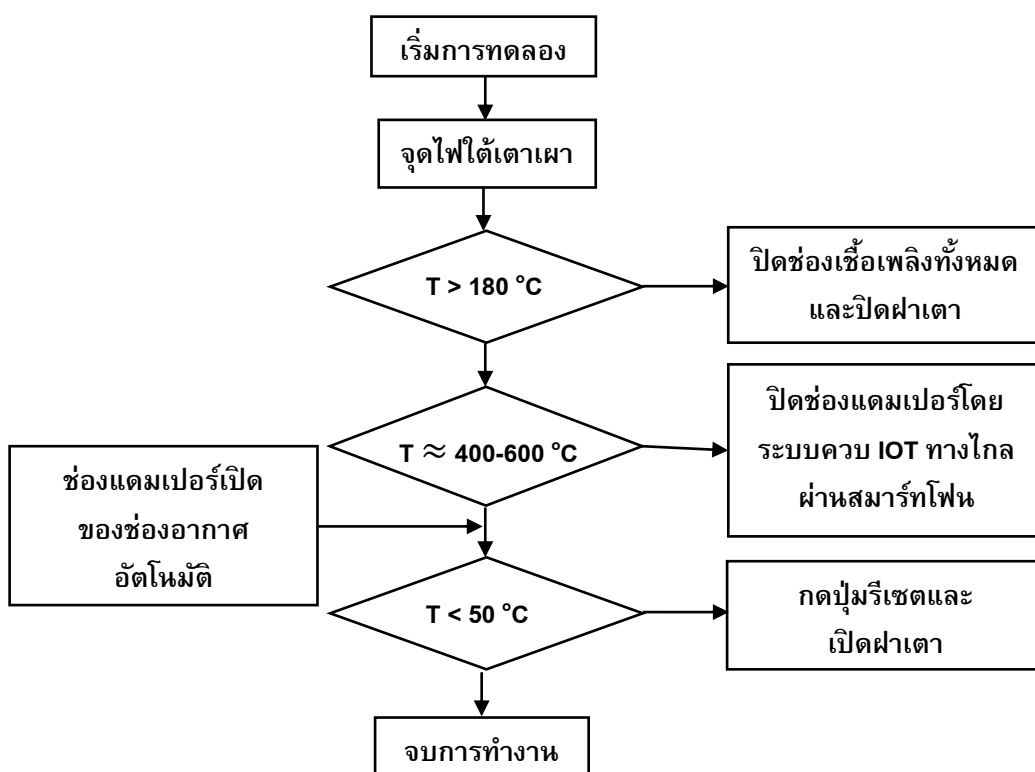


รูปที่ 6 ชุดอุปกรณ์ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและระบบอินเทอร์เน็ตไร้สาย



รูปที่ 7 ภาพอุณหภูมิของเตาเผาถ่านเก็บผลในระบบบันทึกบน Cloud Server

รูปที่ 8 แสดงผังระบบควบคุมการเผาไหม้ของเตาเผาถ่านชีวมวลด้วยระบบอัตโนมัติ โดยเริ่มติดเตาจากช่องใส่เชื้อเพลิงด้านล่างและเปิดฝาช่องใส่ชีวมวลสำหรับทำถ่าน เมื่อค่าอุณหภูมิมากกว่า $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำการปิดช่องใส่เชื้อเพลิงด้านล่างและช่องใส่ชีวมวล เมื่ออุณหภูมิถึง ตามที่ระบุไว้ในระบบคือ ช่วง $400\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ระบบอัตโนมัติจากการตั้งค่าผ่านระบบอินเตอร์เน็ตออฟดิงส์จะสั่งการให้ปิดช่องอากาศทั้งหมดเพื่อเข้ากระบวนการอบถ่าน และปล่อยให้ระบบเย็นลงจนถึง $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงเปิดระบบเพื่อเก็บถ่านต่อไป



รูปที่ 8 ผังระบบควบคุมการเผาไหม้ของเตาเผาถ่านชีวมวล ด้วยระบบอัตโนมัติ

2.3 วิธีการทดลอง

1) นำวัตถุติดทดสอบระบบ คือ ไม้ยูคาลิปตัสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 เซนติเมตร ไปทำความสะอาดโดยการเป่าด้วยลมแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง นำมาตัดเป็นท่อนให้มีขนาดความยาวขนาด 60 เซนติเมตร

2) นำไม้ที่เตรียมไว้ทำการวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นสัมผัสแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Exotec Instrument รุ่น MC-380XCA ย่านการวัดความหนา 0-100 มิลลิเมตรย่านการวัดความชื้น 0-85%

ค่าความละเอียด ± 1 % MC ดังรูปที่ 9 (ก) ซึ่งค่าความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการเผาแต่ละรอบไม่เกิน 30% wb

3) ชั่งน้ำหนักไม้ก่อนเข้าเตาเผาด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ยี่ห้อ ZEPPER รุ่น A12-EA4050-60 ย่านการชั่ง 0-60 kg ค่าความละเอียด ± 5 g ขนาดแท่นชั่ง 40x50 เซนติเมตร (เครื่องชั่งผ่านตรวจรับรองจากสำนักชั่งตวงวัดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว) ดังรูปที่ 9 (ข) โดยในแต่ละครั้งการทดลองมีน้ำหนักไม้ก่อนเผาที่ 70 kg



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ทำการวัดค่าความชื้นของไม้และทำการชั่งมวลไม้ก่อนเข้าเตาเผา

4) นำไม้ที่เป็นเชื้อเพลิงเริ่มต้นการเผาไหม้ใส่ในช่องด้านล่างของเตา จุดไฟเพื่อให้เกิดกระบวนการเผาไหม้เข้าในห้องเผาไหม้ สังเกตการลุกไหม้ของไฟโดยให้มีเปลวไฟจนลุกทั่วทั้งเตาเผา ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเผาไหม้ของไม้ในเตาเผา

5) ทำการเปิดชุดควบคุมระบบอินเทอร์เน็ทออฟดิงส์ จากนั้นทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ท 5G เพื่อทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่อยู่ภายในเตาเผาผ่านสายเทอร์โมคัปเปิลที่ได้มีการเจาะช่องขนาดเล็กไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจำนวน 3 จุด คือ ตำแหน่งด้านล่าง ด้านกลาง และด้านบนของกึ่งกลางของเตาเผา แล้วทำการสอดหัววัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ให้ปลายแตะที่ผิวเตาส่วนในของเตาเผา ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ชุดระบบระบบอินเทอร์เน็ทออฟดิงส์

6) เมื่อสังเกตเห็นไฟลุกดีแล้วให้ทำการปิดช่องเชื้อเพลิงด้านล่างเตาทั้งหมด ดังรูปที่ 12 (ก) ยกเว้นด้านที่มีแอมเปอร์ซึ่งจะทำการปล่อยไว้ให้อากาศไหลเข้าเตาเพื่อให้ภายในห้องเผาไหม้ยังคงเกิดการเผาไหม้ต่อเนื่องอย่างสมบูรณ์ต่อไป ดังรูปที่ 12 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 12 ปิดช่องเชื้อเพลิงยกเว้นช่องอากาศอัดโนมิตี

7) เมื่ออุณหภูมิด้านล่างภายในเตาเผามีค่าอุณหภูมิประมาณ 450°C ระบบจะทำการสั่งการให้เซ็นเซอร์ควบคุมกลไกของหัวขับไฟฟ้าขับเคลื่อนเปิดช่องอากาศอัดโนมิตีทันที เพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ได้อีกดังรูปที่ 13 (ก) ช่องอากาศอัดโนมิตี

(ข) ปล่องระบายควันที่ต่อกับระบบสครับเบอร์แบบน้ำ จากนั้นทำการปล่อยทิ้งไว้จนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เข้าใกล้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมซึ่งสามารถดูได้จากสมาร์ทโฟน หรือคอมพิวเตอร์ และหน้าตู้ควบคุมบริเวณหน้าเตาเผาหลังจากอุณหภูมิภายในลดลงเท่ากับสิ่งแวดล้อม ทำการกดปุ่มรีเซตที่ตู้คอนโทรลเพื่อทำการเปิดแอดมเปอร์ทั้ง 2 จุด และทำการเปิดฝาเตาเผา เมื่อถ่านเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C แล้วนำถ่านที่ได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล เพื่อนำไปคำนวณหา % ของผลผลิตถ่าน (Yield %) และชั่งน้ำหนักน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากกระบวนการผลิตถ่าน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าผลิตภัณฑ์ก๊าซต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 13 หัวขับไฟฟ้าสั่งการทำงานให้ขับเคลื่อนเปอร์ปิดช่องอากาศอัตโนมัติ

สำหรับขั้นตอนตั้งแต่ขั้นตอนการทดลองที่ 1-6 ใช้คนงานทำงานเพียง 1 คน และเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 7 คนงานสามารถดูอุณหภูมิการเผาไหม้ผ่าน สมาร์ทโฟน หรือคอมพิวเตอร์ โดยไม่ต้องอยู่หน้าเตาเผา เพื่อดำเนินการปิดช่องอากาศของระบบการเผาไหม้ ทำให้สามารถลดปริมาณงานในการจัดการเผาถ่านได้

2.4 วิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาถ่าน

1) ในการทดลองเผาถ่านชีวมวลสามารถหาค่าร้อยละผลผลิตถ่าน (Yield %) O.D. basis ได้จากสมการที่ (1) [16]

$$\text{ผลผลิตถ่าน (Yield \%)} = \frac{(\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - (\text{ค่าความชื้น}/100) \times \text{น้ำหนักของถ่านชีวมวล})}{\text{น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ}} \times 100 \quad (1)$$

2) ผลิตภัณฑ์ก๊าซ สามารถหาได้จากน้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำส้มควันไม้และน้ำหนักสุดท้ายผลิตภัณฑ์ของถ่านชีวมวลที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าร้อยละโดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\text{ปริมาณก๊าซ (\%)} = \text{ปริมาณไม้พื้ก่อนเผา (\%)} - \text{ปริมาณของถ่าน (\%)} - \text{ปริมาณน้ำส้มควันไม้ (\%)} \quad (2)$$

2.5 การหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของถ่านชีวมวล (Energy conversion efficiency %)

ในการหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน เป็นการพิจารณาพลังงานที่ป้อนเข้าและออกในระบบการเผาไหม้ สามารถหาได้จากสมการที่ (3) [17]

$$\eta_{En} = \text{Yield \%} \times (\text{HHV}_{\text{ถ่านชีวมวล}} / \text{LHV}_{\text{ไม้ยูคาลิปตัส}}) \quad (3)$$

เมื่อ HHV_{ถ่านชีวมวล} คือ ค่าความร้อนสูงของถ่านหลังเผา (High Heating Value) (kJ/kg)

LHV_{ไม้ยูคาลิปตัส} คือ ค่าความร้อนต่ำของไม้พื้ก่อนเผา (Low Heating Value) (kJ/kg)

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K วัดอุณหภูมิจำนวน 3 ตำแหน่ง โดยวัดที่ผนังเตาเผาชั้นใน พบว่าอุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาแต่ละตำแหน่งการวัด มีความแตกต่างกัน โดยค่าอุณหภูมิที่สูงสุดในเตาเผาจะเป็นช่วงกลางของเตา แต่ลักษณะเส้นกราฟ มีความคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 14 สามารถอธิบายช่วงการเผาไหม้เป็น 4 ช่วง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว [5] และงานวิจัยการพัฒนาเตาเผาถ่านไม้หุงต้มมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน [6] ดังนี้

1) ขั้นตอนการไล่ความชื้น (Dehydration) ใช้อุณหภูมิในช่วง 20-270 °C เป็นขั้นตอนการใช้ความร้อนจากเชื้อเพลิงด้านล่างของเตาเพื่อให้ไม้ยูคาลิปตัสเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ระยะเวลาในการเผาจะขึ้นอยู่กับความชื้นของไม้ยูคาลิปตัส ความชื้นมากใช้เวลามากขึ้น ไม้พื้ที่แห้งจะสามารถลดระยะเวลาในการเผาลง

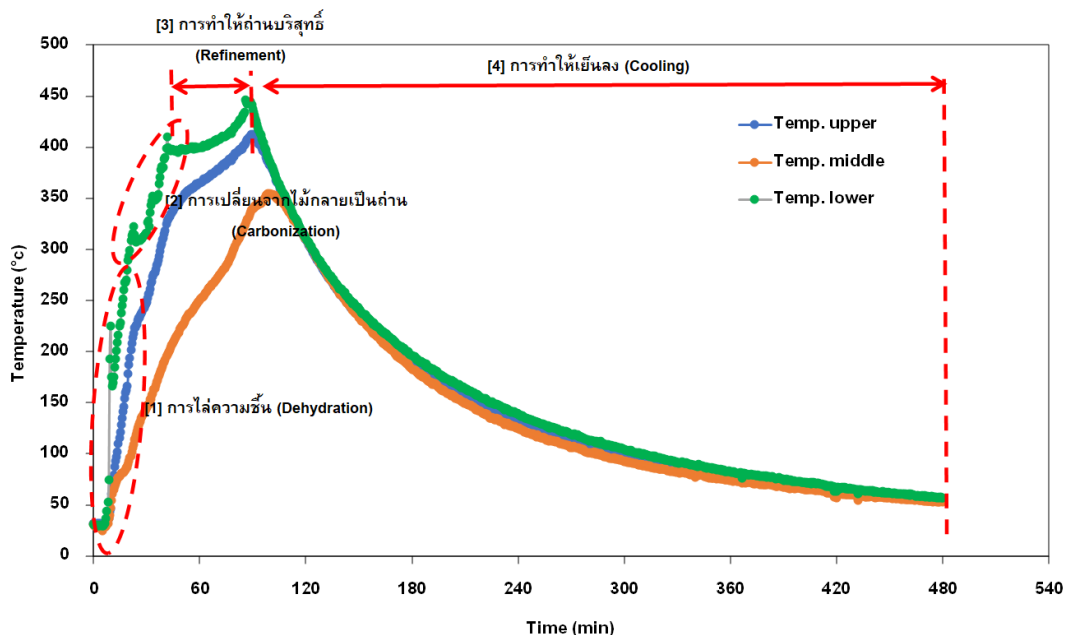
2) ขั้นตอนการเปลี่ยนจากไม้กลายเป็นถ่าน (Carbonization) ในช่วงอุณหภูมิ 270-400 °C ในขั้นตอนนี้จะมี 2 คือช่วงแรกอุณหภูมิ 270-350 °C มีความร้อนที่สะสมไว้จะคลายความร้อนออกมา จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) เชลลูโลสจะมีการสลายตัวอย่างรวดเร็ว มีควันสีขาวปนออกมาหรือควันดำมีกลิ่นฉุน ควันดำจะน้อยลงและเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทาโดยควบคุมอุณหภูมิไว้ให้คงที่โดยการควบคุมอากาศที่ช่องอากาศอัตโนมัติเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ขั้นตอนนี้มีการถ่ายเทความร้อนจากด้านล่างเตาค่อยๆ ถ่ายเทไปยังจุดต่างๆ ทั่วทั้งเตา ถ้ามีการปล่อยให้อุณหภูมิสูงเร็วเกินไปไม้ยูคาลิปตัสจะกลายเป็นเถ้ามาก ช่วงที่สองอุณหภูมิ 350-400 °C ในช่วงนี้เชลลูโลสยังคงมีการสลายตัวทั้งหมดและจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 °C ขั้นตอนนี้ไม้จะ

กลายเป็นถ่าน (Carbonization) คิวน์ที่ออกมาจะประกอบด้วยสารที่เกิดขึ้นใหม่หลายชนิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) และสามารถกลั่นเป็นของเหลวที่ปล่องระบายควันที่ติดตั้งท่อน้ำสัมนควันไม่สำหรับผลิตน้ำสัมนควันไม้

3) ขั้นตอนการทำถ่านให้บริสุทธิ์ (Refinement) หลังจากไม้จะกลายเป็นถ่านสิ้นสุดลงที่อุณหภูมิ 400 °C แต่ยังคงมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ต่ำ และมีน้ำมันดินเป็นส่วนประกอบในปริมาณสูง เนื่องจากน้ำมันดินเป็นสารที่ก่อกวนเมื่อนำถ่านคุณภาพต่ำไปประกอบอาหารปิ้งย่าง จึงต้องทำการเผาถ่านให้บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้งานโดยเติมอากาศเข้าไปเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ประมาณ 26 นาที

4) ขั้นตอนการทำให้ถ่านเย็นลง (Cooling) เมื่อแฉะเปอร์ปิดช่องอากาศอัตโนมัติแล้ว เตาเผาจะปล่อยให้เย็นลงอุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C จึงจะนำถ่านไปใช้งานได้เพื่อไม่ให้ถ่านลุกติดไฟเองเมื่อได้รับออกซิเจนจากอากาศ

โดยรวมใช้เวลาในกระบวนการเผาถ่านทั้งสิ้นประมาณ 8 ชั่วโมง และสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการเผาไหม้จากเตาเผาแบบดั้งเดิม [5] แบบเตาหลุม หรือแบบเตาเผาแบบถัง 200 ลิตร โดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการเผาไหม้จากไม้กลายเป็นถ่าน ซึ่งเตาเผาดังกล่าวใช้เวลาในการเผาระหว่าง 15-20 ชั่วโมง



รูปที่ 14 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของเตาเผาถ่าน

ไม้ยูคาลิปตัสที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตถ่าน ความชื้นของไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำมาวิเคราะห์และทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ตามมาตรฐาน (ASTM D 5373) วิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ตามมาตรฐาน (ASTM D7582) และวิเคราะห์ค่าความร้อนแบบกรอส (High heating value: HHV) และแบบเนท (Low heating value : LHV) ที่ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (ว.ว.)

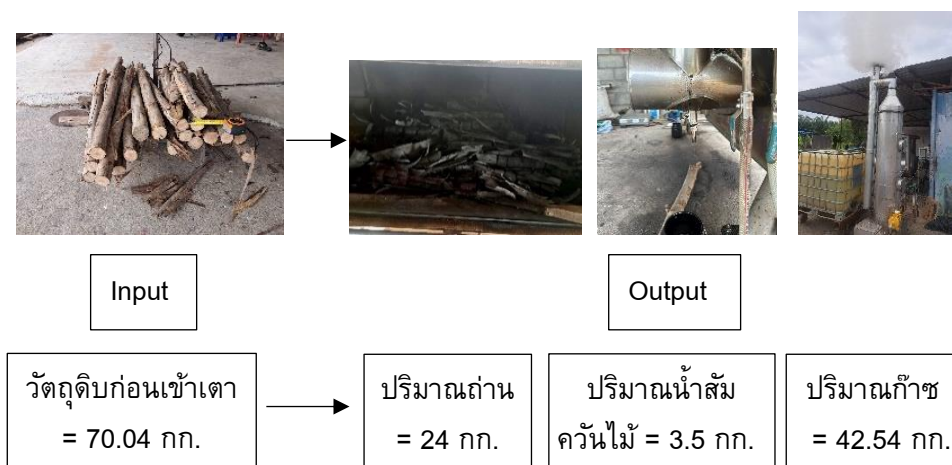
จากกราฟดังรูปที่ 14 จะเห็นว่าลักษณะกราฟของอุณหภูมิของไม้ยูคาลิปตัสจะมีช่วงเวลาในการเผาไหม้อุณหภูมิค่อย ๆ สูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลา 1.30 ชั่วโมง เนื่องจากก๊าซไอเสียและน้ำมันดินจะถูกดูดไปยังท่อน้ำสัมน้ำมันที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบกำจัดมลพิษอากาศด้วยสกรับเบอร์แบบน้ำด้วยพัดลมดูดอากาศขนาด 1 แรงม้า และภายในเตาเผามีท่อกระจายความร้อนจำนวน 3 ท่อ สามารถกระจายความร้อนได้ในภายในเตาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเตาเผาถ่านแบบทั่วไปซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของของ Sangsuk et al [11] ซึ่งอธิบายว่าท่อและปล่องกระจายความร้อนภายในเตาเผาที่มีรูสลิตที่ด้านบนและกลางของปล่องรอบตัวจะสามารถกระจายความร้อนให้ทั่วถึงภายในเตาเผา และเมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการเผาแบบเดิมพบว่าความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น ทำให้เตาเผาถ่านมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sinsa-ad [5] พบว่า ให้ค่าไอโอได้น้ำมันเบอร์ชองถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ใช้ระยะเวลาสั้นจะให้ประสิทธิภาพในการเผาที่ดีกว่าแบบเดิมถึง 70% และให้ค่าพลังงานความร้อนสูงและยาวนานกว่า ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Phimpabutra et al [18] ได้อธิบายผลของอุณหภูมิเผาไหม้และคุณสมบัติของถ่านที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเตาเผาถ่านแบบไหลขึ้นขนาดเล็ก พบว่า ไม้ยูคาลิปตัสให้ร้อยละของผลผลิตถ่าน 27% และปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 45.9% ซึ่งได้ปริมาณที่น้อยกว่าผลการทดลองที่ได้ ในขณะที่ค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 32.51-33.26 kJ/kg

ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวแปร ปริมาณต่าง ๆ ที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณความชื้นของไม้ยูคาลิปตัสก่อนเผามีค่า 13.20% ค่าน้ำหนักแห้งของไม้ยูคาลิปตัสก่อนเผา 60.79 kg หลังเผาได้น้ำหนักถ่าน 24 kg ปริมาณน้ำสัมน้ำมัน 3.50 kg คิดเป็นค่าปริมาณผลผลิตถ่าน 39.48% คำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 40.39% ซึ่งผลการทดลองที่ได้ให้ค่าความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสที่สูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [19]

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการเผาถ่านชีวมวลจากไม้ยูคาลิปตัส

ตัวแปร	ก่อนเผา	หลังเผา(ถ่าน)
ปริมาณความชื้นของไม้ยูคาลิปตัส (%) wb	13.20	-
น้ำหนักแห้งของไม้ยูคาลิปตัส (kg)	60.79	24.00
น้ำส้มควันไม้ (kg)	-	3.50
ค่าความร้อนของไม้ยูคาลิปตัส (MJ/kg)	32.51	33.26
พลังงานความร้อนของถ่านจากการเผาไหม้ (MJ)	1,976.44	798.24
ผลผลิตถ่าน (Yield %)	-	39.48
ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%)	40.39	

คำนวณปริมาณก๊าซจากการชั่งน้ำหนักของไม้พื้่นก่อนเผาซึ่งน้ำหนักถ่านไม้หลังเผา และชั่งน้ำหนักน้ำส้มควันไม้ที่ได้ โดยสมมูลมวลก่อนเผาเท่ากับมวลหลังเผา ตามสมการที่ 2 สามารถหาสมมูลมวลในกระบวนการเผาไม้ยูคาลิปตัสได้ ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 สมมูลมวลของเตาเผาถ่าน

4. สรุป

จากการออกแบบและพัฒนาเตาเผาเชิงความร้อนประสิทธิภาพสูงในครั้งนี้นพบว่า เตาเผาให้ปริมาณถ่านในปริมาณมากถึง 24 kg ผลผลิตถ่าน 39.48% และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 40.39% ใช้เวลา 8 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับเตาเผาแบบดั้งเดิม ภายในเตาเผามีการกระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึงทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง การใช้ระบบอินเทอร์เน็ทออฟดิงส์เข้ามา

ควบคุมปิดและเปิดช่องอากาศอัตโนมัติซึ่งจะทำให้สามารถปิดเตาเผาได้รวดเร็วและจำกัดอากาศไม่ให้เข้าไปภายในเตาเผาทำให้เกิดการอบด้วยความร้อน ได้ถ่านในปริมาณที่มาก โดยมีค่าปริมาณคาร์บอนคงตัว 75.2% ปริมาณเถ้า 2.4% ค่าความชื้น 3.5% ปริมาณสารระเหย 22.4% และให้ค่าความร้อนที่สูงในช่วง 32.51-33.26 kJ/kg และประหยัดเวลาในการผลิตถ่าน ใช้คนงานดูแลระบบเพียงคนเดียว และไม่ต้องเสียเวลารอปิดและเปิดระบบเผาถ่านในช่วงที่อุณหภูมิยังไม่ถึงอุณหภูมิที่กำหนด ทำให้คนงานสามารถไปทำงานอื่นได้ และสามารถดูอุณหภูมิจากมือถือหรือจากทุก ๆ ที่ และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C จะทำการรีเซ็ตระบบและเปิดฝาเตา จากเวลาในการผลิตถ่านที่สั้นลง ทำให้สามารถผลิตถ่านได้ 3 ครั้งต่อวัน

5. ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทำการศึกษาไม้อื่น ๆ เพิ่มเติม นอกจากไม้ยูคาลิปตัส เช่น ไม้ยางพารา กะลามะพร้าว และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เพื่อจะได้ทราบว่าประสิทธิภาพของเตาเผาถ่าน (Kiln productivity: kg/hr) ผลผลิตของถ่าน (Yield %) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency %)
- 2) การเผาถ่านนั้นควรเผาถ่านในพื้นที่โล่งแจ้ง ที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวกและไม่เป็นการรบกวนชาวบ้านในพื้นที่ใกล้เคียง
- 3) ระบบบำบัดสครับเบอร์แบบน้ำจะต้องมีการดูแลบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากน้ำมันดินที่เกิดจากการเผาไหม้ ที่ออกมาปนมากับน้ำในระบบซึ่งจะต้องใช้สารเคมีในการกำจัดก่อนปล่อยสู่แหล่งธรรมชาติทุกครั้ง แพ็คกิ้งมีเดีย (Packing Media) และคาร์บอนฟิลเตอร์ (Carbon Filter) ต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีเพื่อชำระล้างให้สะอาดเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินที่มากับก๊าซไอเสีย ซึ่งจะเกิดการอุดตันและลดประสิทธิภาพในการกรองของสครับเบอร์แบบน้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย และขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่เป็นต้นสังกัดในการให้มาได้มาซึ่งทุน สถานที่ทำวิจัย และความรู้ในการจัดทำงานวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Renewable and alternative energy development plan 2018-2037 (AEDP2018). Bangkok: Department of Alternative Energy Development and Efficiency; 2017. (In Thai)
- [2] Homraruen W, Phoochinda W. Utilization of durian shell and mangosteen shell as fuel briquette and fertilizer: a case study of Kaeng Hang Maeo district, Chanthaburi province. Ph.D. in Social Sciences Journal 2019;9(2):452-66. (In Thai)
- [3] Rattanathavorn T, Jittiwassurat P. The process of producing biomass charcoal from agricultural residue using local rubber planters' method: A case study of Taveepol Agricultural Group in Namom, Songkhla. Journal of Agricultural Research & Extension 2018;35(2):44-54. (In Thai)
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. A manual for the production and use of a 200 liter drum kiln. Bangkok: Department of Alternative Energy Development and Efficiency; np. (In Thai)
- [5] Sinsa-ad A. Development of activated charcoal from a coconut shell kiln. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal 2017;10(2):95-108. (In Thai)
- [6] Ruangsak K, Heman A, Tasaraj H, Reungrit S, Kraisoda P, Heman W, et al. Development of wood charcoal for cooking retort with community product standards. Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation 2022;1(1):1-10. (In Thai)
- [7] Rathasilpokin N. A comparative study on the efficiency of a 200 liter charcoal oven between horizontal and vertical designs. Phichit: Phichit Provincial Energy Office; 2011. (In Thai)
- [8] Ruchuwarak P, Tathong P. Charcoal burning, the traditional way of local community to alternative energy technology. Academic Journal of Humanities and Social Sciences Buriram Rajabhat University 2014;6(2):52-71. (In Thai)
- [9] Intamas P, Ruayruay W, Wongklang W, Prommuang K, Boonraksa P. Development of incinerator sets for COVID-19 infected waste using Intelligent Control (IoT). Institute of Vocational Education Southern Region 1 Journal 2022; 7(1):108-17. (In Thai)
- [10] Maruyama K, Kidransan T, Jansuya P. The design and build husk furnace heat automatic shut-off. Rajamangala University of Technology Lanna (RMUTL) Engineering Journal 2016;1(2):22-8. (In Thai)

- [11] Sangsuk S, Buathong C, Suebsiri S. High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production. *Energy for Sustainable Development* 2020;59:1-7.
- [12] Rakkangan P, Sakulpongmalee K, Intanin J, Moonsri P. Development of thermal efficiency of 200 liters Charcoal Kiln by using insulate enveloped. In the 7th Thailand Renewable Energy for Communities Conference; 2014 Nov 12-14; Nakhon Pathom, Thailand. Nakhon Pathom: Rajamangala University of Technology Rattanakosin; 2014. p. 266-71. (In Thai)
- [13] Thapsamut T, Chaopisit I, Timyamprasert A, Sritanu S, Somkeattikul K, Siripaiboon C, et al. Design and fabrication of biomass and municipal solid waste carbonizer. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal* 2021;27(1):25-31. (In Thai)
- [14] Somsong P, Khanuengnit S, Bundasak S. Smart farm and poultry that automatic working with sensor and can control with smartphone. *Rattanakosin Journal of Science and Technology* 2020;2(3):167-75. (In Thai)
- [15] Sukkri S, Seh S, Mak-on S. Trash management web application. *Journal of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University* 2021;2(2):50-7. (In Thai)
- [16] Wongsawiang O, Unpiphat M, Chareannate C, Chaichana E. Pyrolysis of agricultural residues in the local area of Nakhon Pathom Province. *Journal of Thai Interdisciplinary Research* 2016;11(3):46-53.
- [17] Sangsuk S, Suebsiri S, Puakhom P. The metal kiln with heat distribution pipes for high quality charcoal and wood vinegar production. *Energy for Sustainable Development* 2018;47:149-57.
- [18] Phimpabutra N, Chaiya A, Chawkla S. Effect of wood type on combustion temperature characteristics and properties of charcoal prepared by high temperature pyrolysis process. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal* 2020; 12(16):50-60. (In Thai)
- [19] Cavalcanti E, Carvalho M, Azevedo J. Exergoenvironmental results of a eucalyptus biomass-fired power plant. *Energy* 2019;189:116188.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปฐมพงษ์ หอมศรี นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 083-789-2652 Email: patomphon.homsri@gmail.com



ดร.กมลวรรณ จิตจักร ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 092-332-5566 Email: kamonwan_ji@rmutto.ac.th



ผศ.ดร.จิรวัดน์ สิตรานนท์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ประธานหลักสูตร และอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

งานวิจัย: Thermal Energy, Solar Energy, Steam-Air Power, Solar Thermal Water Pump โทรศัพท์ 081-001-0903 Email: Jirawat_si@rmutto.ac.th

Article History:

Received: February 1, 2023

Revised: June 28, 2023

Accepted: June 30, 2023

พฤติกรรมการรับกำลังของชิ้นส่วนคานหน้าตัดประกอบรูปตัวที STRENGTH BEHAVIORS OF T-SHAPED COMPOSITE BEAM SECTIONS

นันทชัย ชูศิลป์¹ พงศ์ศักดิ์ สุขมณี² และ ทาวรณ เกื้อสกุล³

^{1,2,3}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000,

¹nuntachai.c@rmutsv.ac.th, ²pongsak.s@rmutsv.ac.th and ³tavorn.k@rmutsv.ac.th

Nuntachai Chusilp¹, Pongsak Sookmanee² and Tavorn Kuasakul³

^{1,2,3}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Srivijaya,

1 Ratchadamnoennok Rd., Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,

¹nuntachai.c@rmutsv.ac.th, ²pongsak.s@rmutsv.ac.th and ³tavorn.k@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังของชิ้นส่วนประกอบสำเร็จรูปคาน-พื้น ด้วยวัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็ก และพัฒนาชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับการก่อสร้าง ยิงขึ้น โดยตัวอย่างเป็นคานรูปตัวทีประกอบจากไม้ยางนาและคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 คานตัวทีคอนกรีตเสริมเหล็ก (TB-RC) รูปแบบที่ 2 คานตัวทีวัสดุผสม ระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อตอกตะปู (TB-C-N) รูปแบบที่ 3 คานตัวทีวัสดุผสมระหว่าง ไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อเชาะร่องตอกตะปู (TB-C-GN) และรูปแบบที่ 4 คานตัวทีวัสดุผสม ระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อเชาะร่องตอกวงแหวน (TB-C-GR) การทดสอบกระทำ ภายในห้องปฏิบัติการโดยทดสอบการดัดของคานรูปตัวทีด้วยการทดสอบแบบ 4 จุด เปรียบเทียบ ผลกับคานตัวทีคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพกำลังต้านทานโมเมนต์เทียบกับ TB-RC ที่ระยะการแอนตัวที่ $L/240$ (10 มิลลิเมตร) เท่ากับร้อยละ 6.20, 31.79 และ 42.47 และ ที่ระยะการแอนตัวที่ $L/120$ (20 มิลลิเมตร) เท่ากับร้อยละ 28.87, 51.76 และ 86.76 สำหรับ คาน TB-C-N TB-C-GN และ TB-C-GR ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง TB-C-GN และ TB-C-GR และสูงกว่า TB-C-N หลายเท่า และยังพบว่าค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ หน้าตัดคานตลอดทั้งความลึกยังคงเป็นเส้นตรงทั้งก่อนและหลังการรับแรง

คำสำคัญ: ชิ้นส่วนประกอบ,คาน-พื้น, ไม้ยางนา, คอนกรีตเสริมเหล็ก, กำลังต้านทานโมเมนต์

ABSTRACT

The objective of this research was to examine the strength characteristics of prefabricated beam-floor components constructed using composite materials that combine wood and reinforced concrete. Furthermore, the aim was to enhance these components to make them more suitable for construction purposes. There are four styles of T-beam composite materials combining wood and reinforced concrete: Style 1 is the reinforced concrete T-beam (TB-RC), Style 2 is the T-beam composite material (TB-C-N) with wood and reinforced concrete connected using nail, Style 3 is the T-beam composite material (TB-C-GN) with wood and reinforced concrete connected using nail grooving, and Style 4 is the T-beam composite material (TB-C-GR) with wood and reinforced concrete connected at the ring grooving joint. The laboratory conducted a test on T-beams to assess their bending behavior using 4-point test. The objective was to compare the results with reinforced concrete T-beams (TB-RC). The findings indicated that the moment-resistance efficiency, when compared to TB-RC, was 6.20, 31.79, and 42.47 at the $L/240$ bending distance (10 mm), and 28.87, 51.76, and 86.76 at the $L/120$ bending distance (20 mm) for TB-C-N beams, TB-C-GN, and TB-C-GR, respectively. The moment-resistance efficiencies were roughly similar between TB-C-GN and TB-C-GR but significantly higher than TB-C-N. Additionally, it was observed that the strain values across the entire depth of the beam cross-section remained linear both before and after loading at various locations.

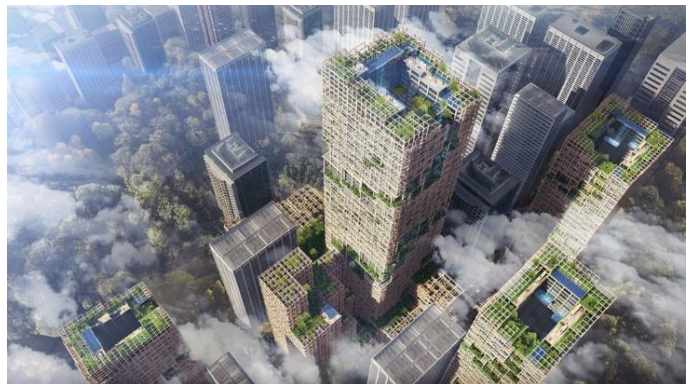
KEYWORDS: component parts, beams – floors, rubber wood, reinforced concrete and moment resistance

1. บทนำ

จากรายงานของศูนย์วิจัยกรุงศรี [1] ระบุว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างในช่วงปี พ.ศ. 2552-2562 มีมูลค่าการลงทุนก่อสร้างโดยรวมมีสัดส่วนเฉลี่ย 8.1% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ ส่วนใหญ่เป็นงานก่อสร้างในประเทศ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะผู้ว่าจ้าง ได้แก่ งานภาครัฐและเอกชน โดยมีร้อยละของสัดส่วนของมูลค่าการลงทุนอยู่ที่ 56:44 ในปี พ.ศ. 2562 หรือคิดเป็นมูลค่าเงิน 700,900 ล้านบาท : 550,700 ล้านบาท ซึ่งพบว่ามีมูลค่าค่อนข้างสูง ส่งผลให้มีการใช้บุคลากรที่อยู่ในระบบจำนวนมากในการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานของประเทศที่แสดงถึงคุณภาพชีวิตของประชาชนในประเทศ และยังแสดงออกถึงความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี

การก่อสร้างของประเทศนั้นด้วย เช่น อาคารสูง ตึกระฟ้า ศูนย์ประชุม ศูนย์กีฬา ศูนย์แสดงสินค้า อาคารสมัยใหม่ เป็นต้น

จากแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนหรือ Sustainable Development Goal, SDG ทำให้หลายประเทศมุ่งความสนใจในการพัฒนาอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืนและต่อเนื่องมากขึ้น ดังเช่นในประเทศญี่ปุ่น บริษัท Sumitomo ได้เสนอนวัตกรรมการก่อสร้างอาคารสูง 350 เมตร [2] โดยใช้โครงสร้างไม้ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งคาดว่าจะสร้างเสร็จในปี ค.ศ. 2041 สำหรับประเทศแถบยุโรป อเมริกา และออสเตรเลีย ก็ปรากฏว่ามีแนวความคิดในการนำไม้ประกอบมาใช้กับอุตสาหกรรมก่อสร้างมากขึ้น เทคโนโลยีวัสดุที่นำมาพัฒนานี้เรียกว่า Timber-Concrete Composite, TCC ดังรูปที่ 2 ซึ่งการใช้ไม้ประกอบกับอาคารส่งผลให้อาคารมีความอบอุ่น ผิวนุ่มนวล ให้ความรู้สึกใกล้ชิดกับธรรมชาติ กระบวนการผลิตมีความสะอาด ให้เสียงรบกวนน้อย เมื่อเทียบกับการก่อสร้างแบบดั้งเดิม เนื่องจากระบบการผลิตแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนำมาประกอบที่หน้างานก่อสร้างจึงใช้แรงงานคนน้อยกว่าสามารถก่อสร้างได้ในเวลารวดเร็ว ปัจจุบันการก่อสร้างในรูปแบบนี้กำลังอยู่ในขั้นการพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง โดยมีงานวิจัยที่นำเสนอตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ เช่น การนำ TCC มาประยุกต์ในงานคาน พื้น และสะพาน ในช่วงปี ค.ศ. 2008 - 2019 [3-7] และได้มีการกำหนดมาตรฐานออกแบบการใช้ TCC สำหรับกลุ่มประเทศยุโรปในปี ค.ศ. 2018 [8] เป็นต้น ทีมนักวิจัยจึงเห็นว่าจะพัฒนาเทคโนโลยีนี้เพื่อมาตอบโจทย์ในมิติต่าง ๆ ให้กับแวดวงอุตสาหกรรมก่อสร้างได้



รูปที่ 1 แผนภาพอาคารสูงระฟ้าทำด้วยไม้ประกอบของบริษัท Sumitomo [2]



รูปที่ 2 ชั้นส่วนสำเร็จรูปประกอบอาคารที่ทำด้วยไม้ประกอบ [3]

เพื่อให้การพัฒนาวัสดุในอุตสาหกรรมงานก่อสร้างเท่าเทียมกับต่างประเทศซึ่งต้องปรับตัวให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงด้านต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นต้องเร่งการพัฒนาในส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้น โดยใช้ทักษะความรู้ ความสามารถ และวัสดุที่มีในประเทศเพื่อสร้างเป็นนวัตกรรมและเทคโนโลยีที่เป็นของประเทศเองโดยไม่ต้องซื้อลิขสิทธิ์หรือเทคโนโลยีจากต่างประเทศที่นับวันจะมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการสูญเสียทรัพยากรของประเทศไปโดยเปล่าประโยชน์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาชิ้นส่วนประกอบสำเร็จรูปคาน-พื้นด้วยวัสดุผสมร่วมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังของชิ้นส่วนคานหน้าตัดตัวที่ซึ่งประกอบจากคานไม้และพื้นคอนกรีต โดยใช้ความสามารถของวัสดุที่มีในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ ไม้แปรรูปในท้องถิ่น คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุเหลือทิ้ง เป็นการพัฒนาวัสดุสำหรับงานก่อสร้างอาคารสมัยใหม่ เพื่อสร้างสรรค์วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาอย่างยั่งยืน

2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน ทราย หรือ กรวด) และน้ำโดยอาจจะมีการเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่า การไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่า คอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากผสมและยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัวโดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่ คุณสมบัติหลักของคอนกรีต คือ การรับแรงอัดสูงในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10% ของแรงอัด)

คอนกรีตในการศึกษามีกำลังรับแรงอัดประลัยอยู่ในช่วง 80-150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1201-50 ถึง มยผ.1212-50 [9] มาตรฐานการทดสอบวัสดุในงานคอนกรีตและศึกษาหาประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1501-51 ถึง 1502-51 [10]

2.2 ไม้

ไม้เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยโครงสร้างเนื้อไม้มีลักษณะเป็นเส้นซึ่งมีรูปร่างเป็นหลอดรูกลวง จำนวนมากเรียงชิดติดกันทางแนวยาว เนื้อไม้ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 60% ซึ่งเป็น ส่วนประกอบของผนังเส้นไม้ ลิกนิน (Lignin) ประมาณ 28% ทำหน้าที่เป็นตัวประสานเส้นไม้ให้เข้าด้วยกัน นอกเหนือจากนั้นเป็นส่วนประกอบของสารอื่น ๆ กำลังต้านกลสมบัติของไม้ขึ้นอยู่กับขนาดของสัดส่วนทางความหนาของผนังเส้นไม้มากกว่าสัดส่วนทางความยาวของเส้นไม้

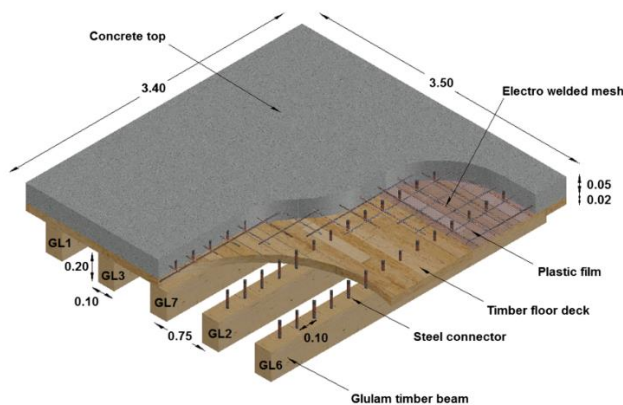
ไม้แปรรูปในการประกอบคาน คือไม้ยางนา โดยจะทำการศึกษาหาประสิทธิภาพของไม้ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1221-51 ถึง 1227-51 [11] และมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) [12] สำหรับการแบ่งประเภทของไม้ ซึ่งแบ่งชนิดไม้ไว้ 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแบ่งประเภทของไม้ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) [12]

ประเภทของไม้	หน่วยแรงดัดหรือแรงดึง ขนานเส้น (N/mm ²)	โมดูลัสความ ยืดหยุ่น (N/mm ²)	หน่วยแรงอัด		หน่วยแรง เฉือนขนาน เส้น (N/mm ²)
			ขนานเส้น (N/mm ²)	ตั้งฉากเส้น (N/mm ²)	
ไม้เนื้ออ่อนมาก	6	7,890	4.5	1.2	0.6
ไม้เนื้ออ่อน	8	9,410	6.0	1.6	0.8
ไม้เนื้อปานกลาง	10	11,230	7.5	2.2	1.0
ไม้เนื้อแข็ง	12	13,630	9.0	3.0	1.2
ไม้เนื้อแข็งมาก	15	18,900	11.0	4.0	1.5

2.3 คาน-พื้น วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีต

ระบบคานไม้-พื้นคอนกรีต หรือ Timber Concrete Composite Floor (TCC) เป็นระบบโครงสร้างพื้นชนิดหนึ่งซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้นเนื่องจากการนำความสามารถของวัสดุสองชนิดมาใช้งานร่วมกัน โดยคอนกรีตใช้รับกำลังอัดส่วนไม้ประกอบใช้รับกำลังดึง โดยระบบพื้นชนิดนี้สามารถใช้ได้ทั้งแบบผลิตที่โรงงานก่อสร้างหรือผลิตสำเร็จมาจากโรงงานแล้วขนย้ายมาติดตั้งที่โรงงานก่อสร้างก็ได้ ลักษณะของระบบพื้นชนิดนี้แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แนวคิดการออกแบบโครงสร้างประกอบคานไม้-พื้นคอนกรีต (Timber Concrete Composite Floor; TCC) [13]

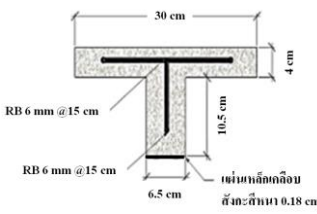
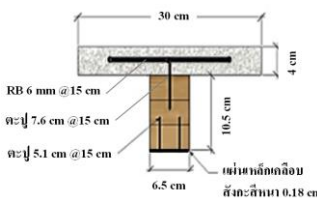
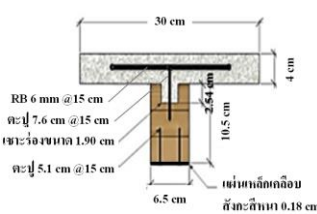
โดยระบบคานไม้-พื้นคอนกรีต ชนิดนี้ส่วนบนที่เป็นคอนกรีตจะสามารถเลือกใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดได้ตามความเหมาะสมของพื้นที่ใช้งานรวมถึงหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตได้ด้วยซึ่งจะมีความยืดหยุ่นในการปรับใช้งานที่เหมาะสมได้ ส่วนล่างซึ่งเป็นไม้ สามารถใช้เป็นคานไม้ตันหรือคานไม้ประกอบอัดทากก็ได้ หรือปรับไปใช้ตงไม้รูปตัวไอ (I-Joint) หรือเป็นคานรูปตัวทีแบบเดี่ยว ๆ หรือการใช้เป็นระบบคานคู่

3. ตัวอย่างในการวิจัย

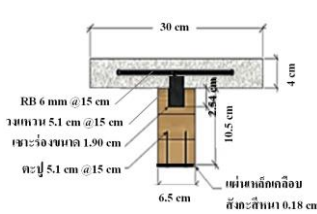
คานทดสอบมีขนาดความยาว 2.40 เมตร ความลึก 0.15 เมตร ความกว้างปีก 0.30 เมตร ส่วนล่างของคานประกอบจากชิ้นไม้ขนาดกว้าง 0.075 เมตร หนา 0.033 เมตร นำมาวางเรียงซ้อนกัน 3 ชั้นเพื่อให้ได้ความหนา 0.10 เมตร การยี่ตระหว่างไม้ชั้นไม้จะใช้กาวยางพอร์มาติไฮเป็นวัสดุยึดประสาน ด้านล่างของชิ้นไม้แผ่นล่างจะเสริมด้วยแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหนา 1.80 มิลลิเมตร เพื่อใช้เพื่อกำลังรับแรงดึง ส่วนผิวด้านบนจะเป็นพื้นคอนกรีตกว้าง 0.30 เมตร หนา 0.05 เมตร

โดยระหว่างชั้นรอยต่อของไม้และคอนกรีตพื้นจะเสริมด้วยอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวจำนวน 3 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

รูปหน้าตัดของตัวอย่าง	รายละเอียด	สัญลักษณ์
	คานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดรูปตัว T ตลอดทั้งความยาวคาน เสริมด้วยเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เชื่อมยึดแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีกับผิวคอนกรีตด้วยกาว (คานตัวที่คอนกรีตเสริมเหล็ก)	TB-RC
	คานหน้าตัดตัวที่ ส่วนปีกเป็นคอนกรีต ส่วนเอวเป็นไม้ 3 ท่อนประกอบกัน ระหว่างปีกกับเอวยึดด้วยตะปูขนาด 3 นิ้ว ระยะห่าง 15 เซนติเมตร ยึดแผ่นเหล็กสังกะสีกับท้องคานไม้ด้วยตะปูขนาด 2 นิ้ว ดอกห่างจากขอบคานระยะ 1.5 เซนติเมตร (คานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อตอกตะปู)	TB-C-N
	คานหน้าตัดตัวที่ ส่วนปีกเป็นคอนกรีต ส่วนเอวเป็นไม้ 3 ท่อนประกอบกัน ท่อนบนเจาะร่องลึก 1.9 x 2.54 เซนติเมตร ระหว่างปีกกับเอวยึดด้วยตะปูขนาด 3 นิ้ว ระยะห่าง 15 เซนติเมตร ยึดแผ่นเหล็กสังกะสีกับท้องคานไม้ด้วยตะปูขนาด 2 นิ้ว ดอกห่างจากขอบคานระยะ 1.5 เซนติเมตร (คานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อเจาะร่องตอกตะปู)	TB-C-GN

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

รูปหน้าตัดของตัวอย่าง	รายละเอียด	สัญลักษณ์
	คานหน้าตัดตัวที่ ส่วนปึกเป็นคอนกรีต ส่วนเอวเป็นไม้ 3 ท่อนประกอบกัน ท่อนบนเซาะร่องลึก 1.9 x 2.54 เซนติเมตร ระหว่างปึกกับเอวยึดด้วยวงแหวนขนาด 2 นิ้ว ระยะห่าง 15 เซนติเมตร ยึดแผ่นเหล็กสังกะสีกับท้องคานไม้ด้วยตะปูขนาด 2 นิ้ว ดอกห่างจากขอบคานระยะ 1.5 เซนติเมตร (คานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อเซาะร่องตอกวงแหวน)	TB-C-GR

4. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การทดสอบกระทำภายในห้องปฏิบัติการทดสอบโครงสร้าง สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยมีขั้นตอนหลัก ๆ ของการทดสอบและการดำเนินการอยู่ 3 ขั้นตอนด้วยกัน ดังนี้

4.1 การทดสอบวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การทดสอบวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ไม้แปรรูป คอนกรีต เหล็กเสริม และอุปกรณ์ยึดเหนี่ยว เพื่อต้องการทราบถึงสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของวัสดุก่อนการประกอบเป็นคานที่ใช้ในการศึกษา โดยเบื้องต้นได้ทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กเคลือบสังกะสี ดังรูปที่ 4 และดำเนินการหาประสิทธิภาพของไม้ยางนาตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1221-51 ถึง 1227-51 [11] โดยการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การหาค่าปริมาตรความชื้น การทดสอบแรงอัดในแนวตั้งฉากเสี้ยน แรงอัดในแนวขนานเสี้ยน การทดสอบแรงดัด และการทดสอบแรงเฉือนในแนวขนานเสี้ยน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติแรงดึงของเหล็กเคลือบสังกะสี



รูปที่ 5 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไม้ยางนาในห้องปฏิบัติการ

ในรูปที่ 5 การทดสอบ (1) แรงอัดตั้งฉากเสี้ยน (2) แรงอัดขนานเสี้ยน (3) การหาค่าความถ่วงจำเพาะและความชื้น (4) แรงเฉือนขนานเสี้ยน และ (5) การทดสอบแรงดัด

4.2 การหล่อชิ้นส่วน และประกอบคานสำเร็จรูปหน้าตัดตัวที่

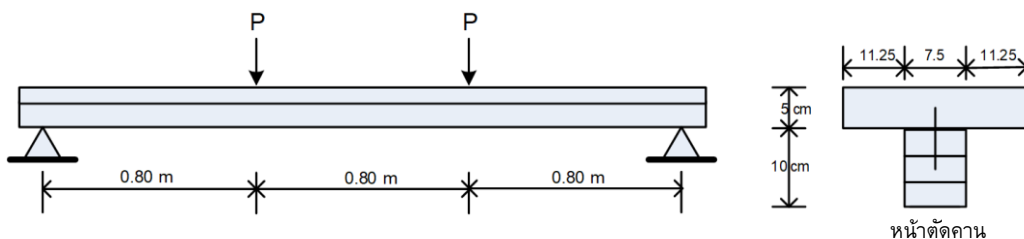
ภายหลังทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น ดังรูปที่ 4 และ 5 จะดำเนินการหล่อชิ้นส่วนคาน-พื้นสำเร็จรูปหน้าตัดรูปตัวที่ ขนาดของหน้าตัดคาน-พื้นสำเร็จรูปหน้าตัดตัวที่ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีการเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด $0.15 \times 0.15 \times 0.15$ เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัด ซึ่งคอนกรีตที่ใช้หล่อคานมีกำลังเฉลี่ย 75.51 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเป็นการเลือกใช้คอนกรีตที่มีกำลังไม่สูงมากนักเพื่อให้กำลังรับแรงทั้งในส่วนปีกซึ่งเป็นคอนกรีตและส่วนเอวซึ่งเป็นไม้ประกอบมีพฤติกรรมในการยึดหดตัวตลอดหน้าตัดที่สอดคล้องกัน การเตรียมผลิตชิ้นงานสำหรับทดสอบโดยการเทคอนกรีตในส่วนปีกของคานและการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต แสดงในรูปที่ 6



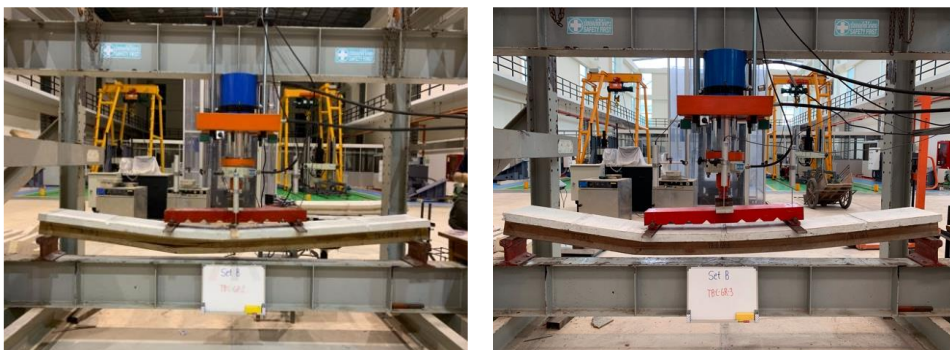
รูปที่ 6 ชั้นส่วนคาน-พื้นสำเร็จรูปสำหรับการทดสอบ

4.3 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคาน

การทดสอบทำภายในห้องปฏิบัติการ ด้วยเครื่องมือทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคานตัวอย่างด้วยการจัดวางการรับแรงกระทำแบบคานที่มีที่รองรับอย่างง่าย (Simply Supported Beam) และทำการทดสอบแบบ 4 จุด (Four Point Bending Test) ดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ตัวอย่างคานที่ถูกทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าการโก่งตัว (LVDT) และการยืดหดตัว (Strain Gauges) และคานจะถูกทำการทดสอบด้วยการเพิ่มแรงกระทำขึ้น จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ และนำผลที่บันทึกพร้อมทั้งพฤติกรรมการรับแรงกระทำของคานตัวอย่างไปวิเคราะห์ผลต่อไป โดยรูปที่ 8 แสดงการทดสอบคานในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 7 การทดสอบแบบ 4 จุด (Four Point Bending Test)

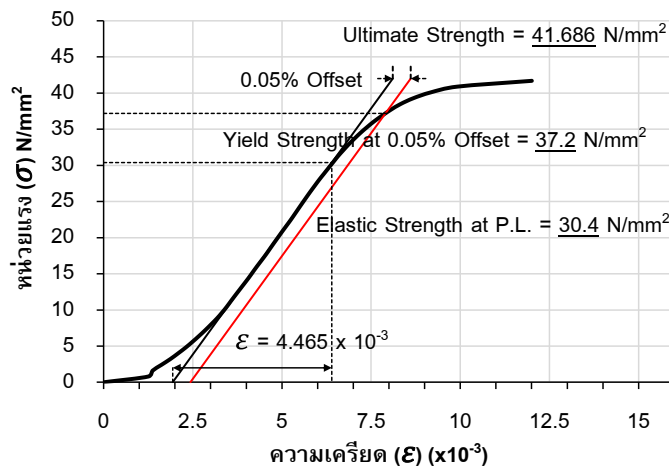


รูปที่ 8 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคานในห้องปฏิบัติการ

5. ผลการดำเนินการ และอภิปรายผล

5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของไม้ยางนา

ก่อนที่จะประกอบเป็นคาน้ำที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทดสอบ โดยคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบจะเป็นแหล่งข้อมูลในการวิเคราะห์ ซึ่งในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของไม้ยางนาได้แสดงตัวอย่างบางส่วนของความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 9 และมีรายละเอียดดังตารางที่ 3



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของไม้ยางนา

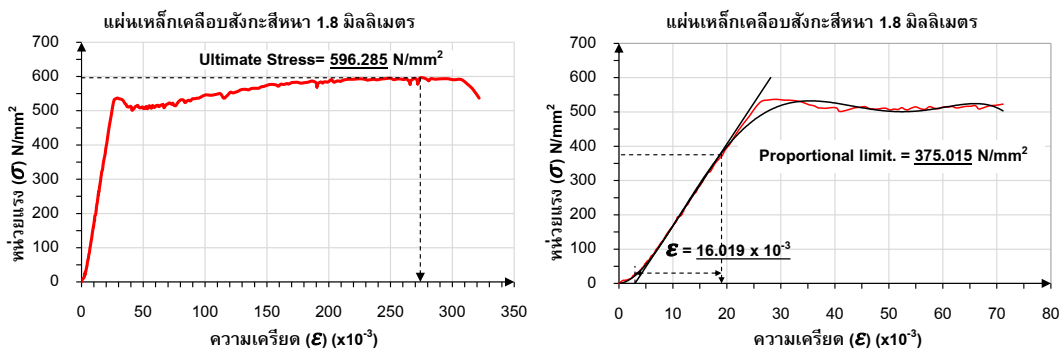
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของไม้ยางนาเทียบกับมาตรฐาน วสท. 1002-16

Description	Testing	EIT Standard [12]
Natural Specific Gravity	0.66	0.70
Unit of Weigh (kg/m^3)	664	690
Flexural or Tension Stress Perpendicular to Grain (N/mm^2)	49.7	61.2
Modulus of Elasticity (N/mm^2)	10,967	8,993
Compression Stress Parallel to Grain (N/mm^2)	28.4	31.2
Compression Stress Perpendicular to Grain (N/mm^2)	6.0	6.5
Shear Parallel to Grain (N/mm^2)	9.5	16.1

ในตารางที่ 3 เป็นผลการทดสอบคุณสมบัติไม้ยางนาตามมาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) และมีการเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของไม้ยางนาตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) พบว่า ความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยน และตั้งฉากเสี้ยนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าของหน่วยแรงดัดหรือหน่วยแรงดึงขนานเสี้ยน และหน่วยแรงเฉือนขนานเสี้ยน ที่มีค่าต่ำกว่าไม้ยางอย่างมีนัยสำคัญ โดยไม้ยางนาในมาตรฐาน วสท. ถูกจัดประเภทของไม้ตามมาตรฐาน วสท. ดังตารางที่ 1 ว่าเป็นไม้กลุ่มไม้เนื้ออ่อนมาก โดยคุณสมบัติของไม้ยางนานี้สามารถนำไปวิเคราะห์กับการทดสอบคานประกอบต่อไป

5.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

จากการทดสอบกลสมบัติของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหนา 1.80 มิลลิเมตร นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด และวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ได้แก่ Proportional Limit, Tensile Strength และ Modulus of Elasticity ดังตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 10 และผลการทดสอบในตารางที่ 4



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหนา

No.	Description	Specimen	Specimen	Specimen	Average
		NO.1	NO.2	NO.3	
1	Proportional Limit (N/mm²)	333.12	323.39	375.01	343.84
2	Tensile Strength (N/mm²)	547.49	532.52	596.28	549.77
3	Modulus of Elasticity (N/mm²)	20,850.03	21,044.77	23,410.64	21,768.48

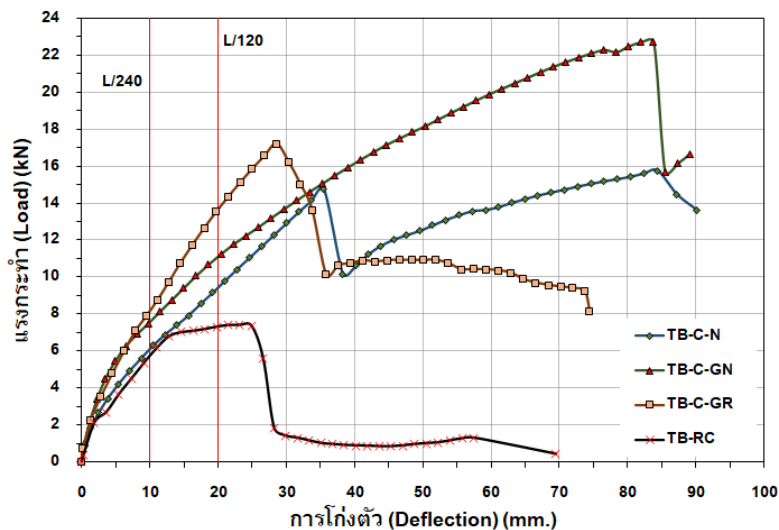
จากรูปที่ 10 แสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงกับความเครียดตั้งแต่ช่วงโมดูลัสยืดหยุ่นจนถึงจุดครากและเกิดการวิบัติซึ่งความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันนี้สามารถวิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงของชิ้นส่วนวัสดุที่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเคลือบสังกะสีดังกล่าวนี้ในแต่ละช่วงได้ และผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21,768.48 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้จะสอดคล้องกับการนำไปใช้วิเคราะห์ เนื่องจากการเสริมกำลังของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีในชิ้นส่วนคาน พฤติกรรมจะเกิดแรงดึงกับแผ่นเหล็ก ทำให้ความถูกต้องในการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับ การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีดังกล่าวนี้ร่วมด้วย

5.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคานหน้าตัดรูปตัวที

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของกอนคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้หล่อคานขนาด 2.40 เมตร พบว่าคอนกรีตที่ใช้หล่อคานมีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 75.51 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยการเลือกใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ไม่สูงมากนักเพื่อให้กำลังรับแรงทั้งในส่วนปีกซึ่งเป็นคอนกรีตและส่วนเอวซึ่งเป็นไม้ประกอบมีพฤติกรรมในการยึดหดตัวตลอดหน้าตัดที่สอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบคานประกอบแสดงตามลำดับ ดังนี้

5.3.1 แรงกระทำและการโก่งตัว

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 8 สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 11 คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (Midspan Deflection) ของคาน ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ $L/240$ และ $L/120$ (พิจารณาจากค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ตรงกึ่งกลางความยาวคาน สำหรับคานอย่างง่ายต้องไม่เกิน $L/360$ ในสัดส่วน 1.5 และ 3.0 เท่า) ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด หากพิจารณาเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักคานของแต่ละรูปแบบ จะพบว่าคานรูปแบบ TB-C-GR จะสามารถรับกำลังต้านทานโมเมนต์ได้มากกว่าหากเทียบกับรูปแบบอื่น ๆ ขณะที่คาน TB-C-GN เมื่อพิจารณาตลอดการทดสอบพบว่าสามารถรับแรงกระทำได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวิบัติสูงกว่าคานรูปแบบอื่น ๆ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว

5.3.2 กำลังต้านทานแรงดัด และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในคาน

ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในคาน โดยใช้คานทดสอบ ซึ่งมีความยาว 2.40 เมตร แสดงในตารางที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักคานในช่วงการโก่งตัวกึ่งกลางคานที่ $L/240$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และในช่วงการโก่งตัวที่ $L/120$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ของกลุ่มคานหน้าตัดตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรเปลี่ยนอุปกรณ์แรงเฉือน พบว่า คานรูปแบบ TB-C-N รับกำลังโมเมนต์ที่ $L/240$ ได้ 2,438.8 นิวตัน-เมตร และที่ $L/120$ ได้ 3,772.8 นิวตัน-เมตร และคานรูปแบบ TB-C-GN รับกำลังโมเมนต์ที่ $L/240$ ได้ 3,026.4 นิวตัน-เมตร และที่ $L/120$ ได้ 4,442.8 นิวตัน-เมตร ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $L/240$ ร้อยละ 24.09 และมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $L/120$ ร้อยละ 17.76 เมื่อเทียบกับคานรูปแบบ TB-C-N ส่วนคานรูปแบบ TB-C-GR รับกำลังโมเมนต์ที่ $L/240$ ได้ 3,271.6 นิวตัน-เมตร และที่ $L/120$ ได้ 5,467.6 นิวตัน-เมตร ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $L/240$ ร้อยละ 34.15 และมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $L/120$ ร้อยละ 44.92 เมื่อเทียบกับคานรูปแบบ TB-C-N และคานรูปแบบ TB-C-GR ยังมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $L/240$ ร้อยละ 8.1 ที่ตำแหน่ง $L/120$ ร้อยละ 44.92 เมื่อเทียบกับคานรูปแบบ TB-C-GN เมื่อพิจารณาน้ำหนักคาน พบว่าคานหน้าตัดประกอบระบบคานไม้-พื้นคอนกรีต (Timber Concrete Composite) หรือ TCC ทั้ง 3 รูปแบบ จะมีน้ำหนักประมาณอยู่ที่ 80 กิโลกรัม ขณะที่คานควบคุม (TB-RC) จะมีน้ำหนักเท่ากับ 105 กิโลกรัม ซึ่งแสดงว่าคานประกอบ TCC จะมีน้ำหนักน้อยกว่าคานควบคุมคิดเป็นร้อยละ 24

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในคาน

Specimen	Deflection at L/240 (10 mm)		Deflection at L/120 (20 mm)		At Maximum Load		Weight of Beam (kg)
	Load	Moment	Load	Moment	Load	Deflection	
	(kN)	(N-m)	(kN)	(N-m)	(kN)	(mm.)	
TB-C-N	6.097	2,438.8	9.432	3,772.8	15.757	79.053	78.790
TB-C-GN	7.566	3,026.4	11.107	4,442.8	22.724	79.951	79.040
TB-C-GR	8.179	3,271.6	13.669	5,467.6	17.202	27.776	80.720
TB-RC	5.741	2,296.4	7.319	2,927.6	7.413	21.584	105.511

สำหรับการเปรียบเทียบกำลังรับโมเมนต์ในช่วงการโก่งตัวกึ่งกลางคานที่ L/240 และ L/120 ของคานตัวที่วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กและคานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้คานตัวที่วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก (TB-RC) เป็นคานอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า คานรูปแบบ TB-RC รับกำลังโมเมนต์ที่ L/240 ได้ 2,296.4 นิวตัน-เมตร และที่ L/120 ได้ 2,927.6 นิวตัน-เมตร ซึ่งคานรูปแบบ TB-C-N มีค่าเพิ่มขึ้นที่ L/240 ร้อยละ 6.20 และมีค่าเพิ่มขึ้นที่ L/120 ร้อยละ 28.87, คานรูปแบบ TB-C-GN มีค่าเพิ่มขึ้นที่ L/240 ร้อยละ 31.79 และมีค่าเพิ่มขึ้นที่ L/120 ร้อยละ 51.76, คานรูปแบบ TB-C-GR มีค่าเพิ่มขึ้นที่ L/240 ร้อยละ 42.47 และมีค่าเพิ่มขึ้นที่ L/120 ร้อยละ 86.76 เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง TB-RC

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพกำลังต้านทานโมเมนต์ เมื่อเทียบกับคาน TB-RC

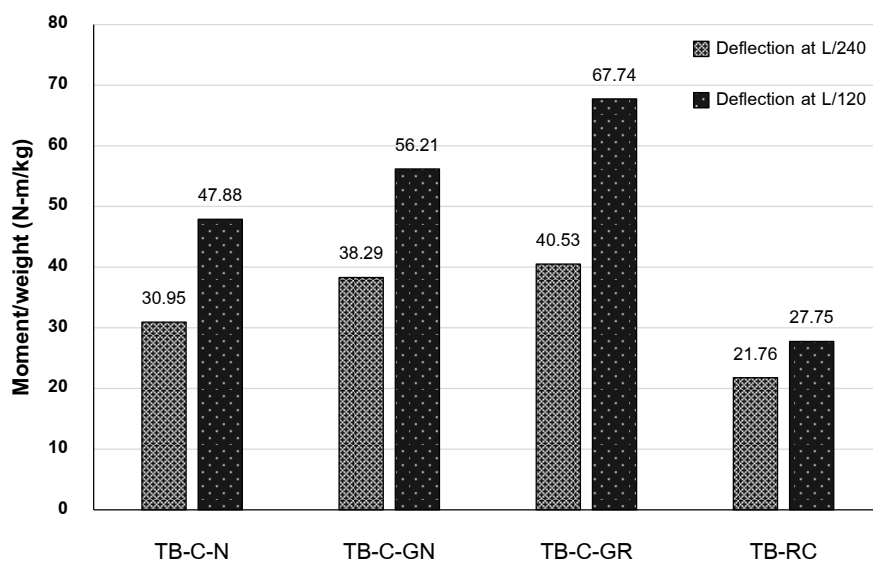
Specimen	Moment Capacity Compared with TB-RC (%)		
	Deflection at L/240 (10 mm)	Deflection at L/120 (20 mm)	At Maximum Deflection
TB-C-N	6.20	28.87	112.56
TB-C-GN	31.79	51.76	206.54
TB-C-GR	42.47	86.76	132.05

การทดสอบจะดำเนินไปจนถึงจุดวิบัติพร้อมกับค่าการโก่งตัวที่แปรเปลี่ยนไป ซึ่งจะได้ค่ากำลังรับโมเมนต์สูงสุดของคานตัวที่วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กและคานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้คานตัวที่วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นคานอ้างอิง พบว่า คานรูปแบบ

TB-RC รับกำลังโมเมนต์สูงสุด ได้ 2,965.2 นิวตัน-เมตร ซึ่งคานรูปแบบ TB-C-N มีค่ากำลังโมเมนต์สูงสุดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 112.56 คานรูปแบบ TB-C-GN มีค่ากำลังโมเมนต์สูงสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 206.54 คานรูปแบบ TB-C-GR มีค่ากำลังโมเมนต์สูงสุดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 132.05 เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง TB-RC

5.3.3 ค่าประสิทธิภาพของกำลังต้านทานโมเมนต์ต่อน้ำหนักคาน TCC ต่าง ๆ

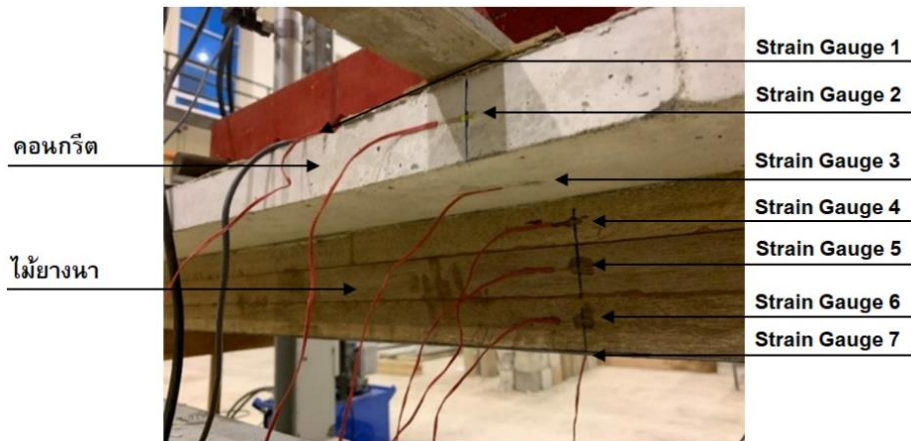
ค่าประสิทธิภาพของกำลังต้านทานโมเมนต์ต่อน้ำหนักคานที่ระยะการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน ซึ่งพิจารณาที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$ และ $L/120$ จะสังเกตได้ว่าคานรูปแบบ TB-C-GR มีประสิทธิภาพกำลังต้านทานโมเมนต์ต่อน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือ TB-C-GN TB-C-N และ TB-RC ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$ จะพบว่า TB-C-GN และ TB-C-GR จะมีค่าประสิทธิภาพของกำลังต้านทานโมเมนต์ต่อน้ำหนักคานที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 12 ซึ่งหากพิจารณาในการนำมาใช้งานคาน TB-C-GN จะใช้เทคนิคในการทำงานที่มีความยุ่งยากน้อยกว่าคาน TB-C-GR แต่เมื่อต้องพิจารณาในช่วงการแอ่นตัวที่สูงขึ้น ($L/120$) คาน TB-C-GR จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าคาน TB-C-GN เนื่องจากมีอุปกรณ์สำหรับรับแรงเฉือนโดยเฉพาะ แต่ต้องแลกมาด้วยการทำงานที่มีความยุ่งยากมากขึ้น



รูปที่ 12 ค่าประสิทธิภาพของกำลังต้านทานโมเมนต์ต่อน้ำหนักคาน TCC ต่าง ๆ ที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$ และ $L/120$

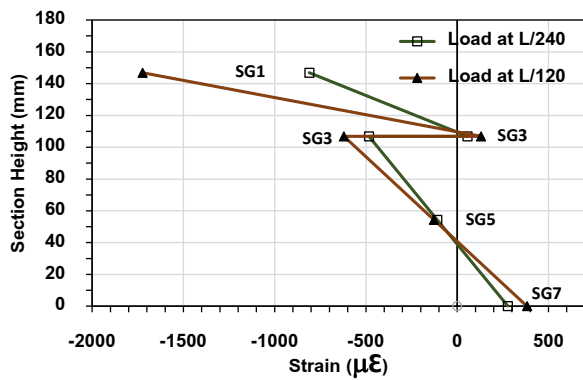
5.3.4 พฤติกรรมการวิบัติของคาน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและสังเกตพฤติกรรมเชิงลึกของความเครียดที่เกิดขึ้น ณ บริเวณต่าง ๆ ของคาน TCC ว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎีทางกลศาสตร์ที่ใช้งานในช่วงอิลาสติกมากน้อยเพียงใด โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain Gauge) ไว้กับตัวคานบริเวณกลางคาน ตำแหน่งที่ติด (Strain Gauge) กับคานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 7 ตำแหน่ง คือ ที่ระยะนับจากท้องคาน 0 มิลลิเมตร 19.3 มิลลิเมตร 54.3 มิลลิเมตร 89.3 มิลลิเมตร 106.8 มิลลิเมตร 126.8 มิลลิเมตร และ 146.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 13 (โดยที่ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 7 จะแสดงค่าเป็นสองตำแหน่งเนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain Gauge ระหว่างการทดสอบและการอ่านค่ามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย)



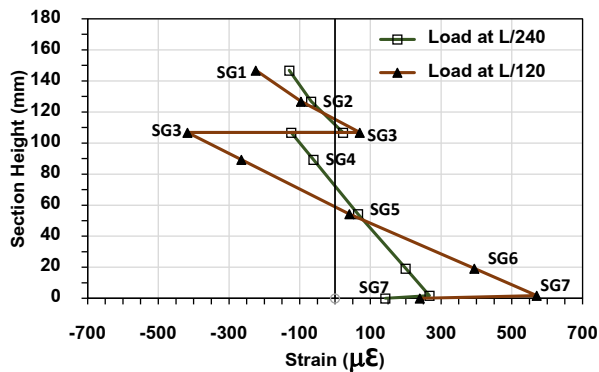
รูปที่ 13 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauge) บนคานทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานส่วนบนจะเป็นการรับแรงอัดและส่วนล่างจะเป็นการรับแรงดึง การทดสอบคานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรเปลี่ยนอุปกรณ์รับแรงเฉือน จากผลทดสอบพบว่าคานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อแบบเซาะร่องตอกวงแหวนมีค่ากำลังต้านทานแรงดัดได้สูง เพราะว่า วงแหวนมีพื้นที่รับแรงมากกว่าจุดต่อรูปแบบตอกตะปูและรูปแบบเซาะร่องตอกตะปู ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบ กำลังต้านทานแรงเฉือนของไม้อยางนาและคอนกรีตร่วมกับตอกตะปู เซาะร่องตอกตะปู และเซาะร่องตอกวงแหวน บางครั้งการสังเกตด้วยตาเปล่าอาจจะไม่เห็นชัดเท่ากับการวัดละเอียดด้วย Strain Gauges โดยผลการอ่านค่าจาก Strain Gauges แสดงในรูปที่ 14 ถึงรูปที่ 17



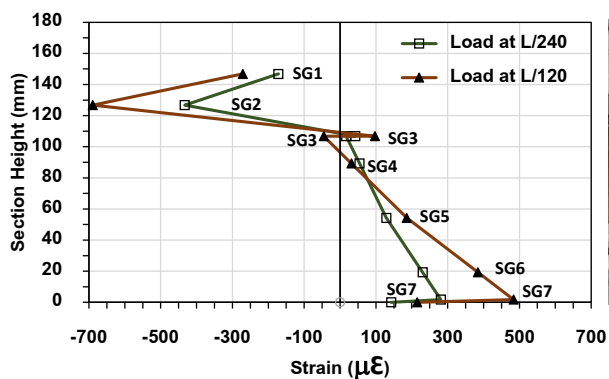
TB-RC

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นหน้าตัดและความเคียวการบิดของ TB-RC



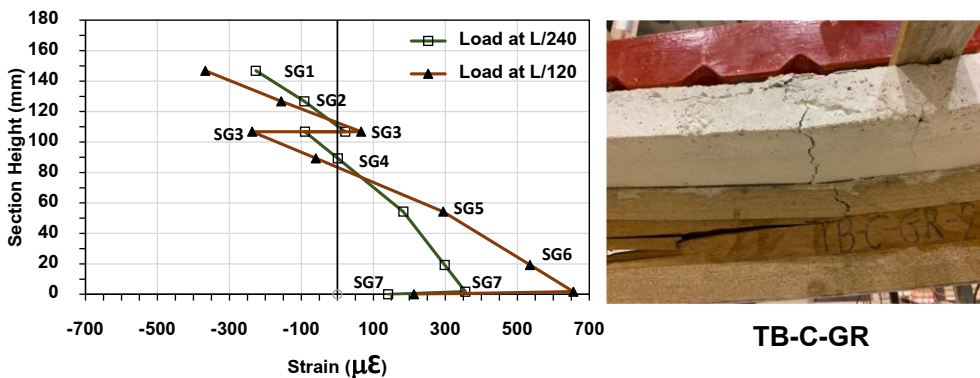
TB-C-N

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นหน้าตัดและความเคียวการบิดของ TB-C-N



TB-C-GN

รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นหน้าตัดและความเคียวการบิดของ TB-C-GN



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นหน้าตัดและความเครียดการบิดของ TB-C-GR

จากรูปที่ 14 ถึงรูปที่ 17 พบว่าการเคลื่อนตำแหน่งของจุดต่าง ๆ บนคาน TCC มีความสอดคล้องกับทฤษฎีทางกลศาสตร์ที่ให้ความสัมพันธ์ของความเครียดของหน้าตัดตลอดความลึกเป็นลักษณะของเส้นตรงทั้งในส่วนของพื้นคอนกรีตและในส่วนของคานไม้ประกอบ และที่บริเวณของรอยต่อระหว่างไม้และคอนกรีตพบว่าในหลายตัวอย่างมีการเคลื่อนตัวที่แยกห่างออกจากกันระหว่างบริเวณที่เป็นไม้และคอนกรีต (จะพบในตัวอย่างที่มีการเซาะร่องเนื้อไม้สำหรับการยึดต่อ) ลักษณะของรอยแตกกว้างจะอยู่ในแนวที่ต่างกัน กล่าวคือการแตกกว้างจากด้านบนส่วนของคอนกรีตจะมีแนวที่ไม่ตรงกับแนวที่เกิดขึ้นกับส่วนที่เป็นไม้ อาจเนื่องมาจากการประสานระหว่างวัสดุทั้งสองประเภทยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการบิดและแตกกว้างในแนวเดียวกัน แต่มีบางตัวอย่างที่ภายหลังจากการบิดแล้ว บริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตและไม้นานายังมีลักษณะของผิวรอยต่อที่แนบสนิทอยู่ ดังเช่นในรูปที่ 15 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีอุปกรณ์ตะปูเป็นตัวยึดเหนี่ยว อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเครียด (Strain) กับความลึกของคานตัวอย่างพบว่ายังคงมีความชันอยู่ในแนวเดียวกัน สำหรับการบิดของคาน TB-RC เป็นแบบ Flexural Failure ดังแสดงในรูป 14 โดยช่วงเริ่มต้นระหว่างการเพิ่มแรงกระทำ คอนกรีตที่ผิวล่างบริเวณกึ่งกลางคานจะเกิดรอยร้าวในแนวดิ่ง (Flexural Crack) จากนั้นรอยร้าวดังกล่าวจะค่อย ๆ เพิ่มจำนวนและขยายตัวสูงขึ้นตามขนาดของแรงกระทำ ขณะที่ระยะแฉกตัวของคานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งคานเกิดการบิด และการบิดของคาน TB-C-N (คานตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กจุดต่อตอกตะปูเป็นตัวรับแรงเฉือน), คาน TB-C-CN (มีการเซาะร่องเนื้อไม้และอุปกรณ์ตะปูเป็นตัวยึดเหนี่ยว) และคาน TB-C-GN (ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวที่ดีกว่าตะปู แต่ด้อยกว่าการใช้ตะปูพร้อมกับการเซาะร่องเล็กน้อย) ในรูปที่ 15, 16 และ 17 ตามลำดับพบว่า จะมีการบิดส่วนของวัสดุไม้เป็นรอยแตกเนื่องจากแรงดึง (Simple Tension) อย่างชัดเจน ส่วนปีกวัสดุคอนกรีตที่ผิวล่างจะเกิดรอยร้าวในแนวดิ่งเนื่องจากการดัด (Flexural Crack)

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังของชิ้นส่วนประกอบสำเร็จรูปคาน-พื้นด้วยวัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

1) คานหน้าตัดตัวที่วัสดุผสมระหว่างไม้และคอนกรีตเสริมเหล็กมีน้ำหนักที่น้อยกว่าคานหน้าตัดรูปตัวทีที่ทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีขนาดหน้าตัดเท่ากัน คิดเป็นร้อยละ 24

2) ประสิทธิภาพกำลังต้านทานโมเมนต์ เมื่อเทียบกับคาน TB-RC พบว่าที่ระยะการแอ่นตัวที่ $L/240$ (10 มิลลิเมตร) มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.20 31.79 และ 42.47 และที่ระยะการแอ่นตัวที่ $L/120$ (20 มิลลิเมตร) มีค่าเท่ากับ 28.87 51.76 และ 86.76 สำหรับคาน TB-C-N TB-C-GN และ TB-C-GR ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้อุปกรณ์ยึดแบบเซาะร่องตอกตะปูและการเซาะร่องตอกวงแหวนให้ผลที่ใกล้เคียงกันและทั้งสองแบบให้ค่าที่มากกว่าการใช้ตะปูเพียงอย่างเดียวหลายเท่าตัว แต่เมื่อพิจารณาถึงเทคนิคในการทำงาน การใช้แบบเซาะร่องตอกตะปูจะมีความยุ่งยากในการติดตั้งน้อยกว่าแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพที่ลดน้อยกว่าแบบเซาะร่องตอกวงแหวนเล็กน้อย จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า

3) ประสิทธิภาพของกำลังต้านทานโมเมนต์ต่อน้ำหนักคานที่ระยะการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน ซึ่งพิจารณาที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$ (10 มิลลิเมตร) และ $L/120$ (20 มิลลิเมตร) มีค่าเท่ากับ 30.95 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม และ 47.88 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม สำหรับคาน TB-C-N มีค่าเท่ากับ 38.29 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม และ 56.21 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม สำหรับคาน TB-C-GN มีค่าเท่ากับ 40.53 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม และ 67.47 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม สำหรับคาน TB-C-GR และมีค่าเท่ากับ 21.76 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม และ 27.75 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม สำหรับคาน TB-RC ตามลำดับ

4) ประสิทธิภาพของกำลังต้านทานโมเมนต์ต่อน้ำหนักคาน เมื่อเทียบกับคาน TB-RC (พิจารณาจากรูปที่ 12) พบว่าที่ระยะการแอ่นตัวที่ $L/240$ (10 มิลลิเมตร) มีค่าเท่ากับ 42.22 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม 75.97 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม และ 86.26 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม และที่ระยะการแอ่นตัวที่ $L/120$ (20 มิลลิเมตร) มีค่าเท่ากับ 72.54 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม 102.56 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม และ 144.11 นิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม สำหรับคาน TB-C-N TB-C-GN และ TB-C-GR ตามลำดับ

5) การใช้อุปกรณ์วัดค่าความเครียดของบริเวณจุดต่าง ๆ ตลอดหน้าตัด ให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีทางกลศาสตร์ที่ให้ความสัมพันธ์ของความเครียดตลอดความลึกของหน้าตัดยังคงเป็นเส้นตรงทั้งก่อนและหลังการรับแรงทั้งในส่วนของพื้นคอนกรีตและในส่วนของคานไม้ประกอบ นอกจากนี้ยังสามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวของรอยต่อระหว่างไม้และคอนกรีตที่ใช้อุปกรณ์การยึดที่แตกต่างกัน ซึ่งบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์การยึดแต่ละชนิดได้เป็นอย่างดี เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบได้ต่อไป

References

- [1] Krungsri Research. Industry Outlook 2021-2023: Construction Contractor [Internet]. 2021 Feb 08 [cited 2021 Dec 16]. Available from: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/construction-construction-materials/construction-contractors/io/io-construction-contractor-21> (In Thai)
- [2] Ravenscroft T. World's tallest timber tower proposed for Tokyo. Dezeen [Internet]. 2018 Feb 19 [cited 2021 Dec 18]. Available from: <https://www.dezeen.com/2018/02/19/sumitomo-forestry-w350-worlds-tallest-wooden-skyscraper-conceptual-architecture-tokyo-japan/>
- [3] Yeoh DEC, Fragiaco M, Buchanan A, Crews K, Haskell J, Deam B. Development of semi-prefabricated timber-concrete composite floors in Australasia. 10 th World Conference on Timber Engineering; 2008 June 2-5; Miyazaki, Japan.
- [4] Tannert T, Ebadi MM, Gerber A. Serviceability performance of timber concrete composite floors. Proceedings of the 2019 Modular and Offsite Construction (MOC) Summit; 2019 May 21-24; Alberta, Canada. Alberta, Canada: University of Alberta Library; 2019. p. 206-12.
- [5] Manojlovic D, Kocetov T. Parametric study of design parameters in timber concrete composite beams. Macedonian Association of Structural Engineers (MASE) 2019:911-20.
- [6] Lyu Z, Chuquitaype CM, Ruiz Teran AM. Design of timber concrete composite (TCC) bridges with under deck stay cables. Engineering Structures 2019; 189:589-604.
- [7] Yuan Sh, He GJ, Yi J. Analysis of mechanical properties and a design method of reinforced timber concrete composite beams. Mechanics of Composite Materials 2019; 55(5):687-98.
- [8] COST Action FP1402 / WG. Design of timber-concrete composite structures. European Cooperation in Science and Technology (COST). 2018.
- [9] Department of Public Works and Town & Country Planning. Material testing standard in concrete. DPT 1201-50 – DPT 1212-50. Ministry of Interior. Thailand; 2007. (In Thai)
- [10] Department of Public Works and Town & Country Planning. Standard for inspection of reinforced concrete structures by nondestructive testing methods. DPT 1501-51 – DPT 1507-51. Ministry of Interior. Thailand; 2008. (In Thai)
- [11] Department of Public Works and Town & Country Planning. Wood testing standard. DPT 1221-51 – DPT 1227-51. Ministry of Interior. Thailand; 2008. (In Thai)

- [12] The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage (EIT). Specification on Standard of Material for Timber Building. EIT 1002-16. Thailand; 1973. (In Thai)
- [13] Santos P, Martins C, Skinner J, Harris R, Dias A, Godinho L. Model frequencies of a reinforced timber concrete composite floor: testing and model. Journal of Structural Engineering 2015;141(11):04015029. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001275.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ.ดร.นันทชัย ชุตติย์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยทางด้านวัสดุพอลิโพรพิลีน ซีเมนต์ และคอนกรีต โครงสร้างวัสดุผสม อีเมล nuntachai.c@rmutsv.ac.th โทรศัพท์ 0-7431-7162



พงศ์ศักดิ์ สุขมณี อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา และอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยทางการทดสอบและวัสดุวิศวกรรม อีเมล pongsak.s@rmutsv.ac.th โทรศัพท์ 0-7431-7162



ถาวร เกื้อสกุล อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยทางการทดสอบและวัสดุวิศวกรรม การนำกากของเสียมาใช้ในการงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดชัน อีเมล tavorn.k@rmutsv.ac.th โทรศัพท์ 0-7431-7162

Article History:

Received: January 26, 2023

Revised: July 4, 2023

Accepted: July 7, 2023

การพยากรณ์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวแปรในการเชื่อม TIG
ต่อสมบัติเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
THE PREDICTION OF OPTIMAL PARAMETERS IN THE TIG WELDING OF
AISI 304 STAINLESS STEEL USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

กิตติ วิโรจรัตนภาพิศาล¹ อุทฤษฎ์ ธนทรัพย์ทวี² ชิวพล นิตยัณรา³ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร⁴
และ พันทิวา พวงสาสิทธิ์⁵

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก, 41 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000,

¹kitti_w@rmutl.ac.th, ²t.ukrit@edu.rmutl.ac.th,

³อาจารย์, สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ
กรุงเทพฯ 10800, chiwapon.n@cit.kmutnb.ac.th

⁴อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000, jittiwat.ni@rmuti.ac.th

⁵นักวิจัย, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
แห่งชาติ, อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย 114 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง
อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120, nuttorakung@hotmail.com

Kitti Wirotrattanaphaphisan¹, Ukrit Thanasuptawee², Chiwapon Nithara³

Jittiwat Nithikarnjanatharn⁴ and Puntiva Phuangsalee⁵

^{1,2}Lecturer, Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
Tak, 41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang, Tak 63000, Thailand,

¹kitti_w@rmutl.ac.th, ²t.ukrit@edu.rmutl.ac.th,

³Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial
Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharat I,
Bangsue, Bangkok 10800, Thailand, chiwapon.n@cit.kmutnb.ac.th

⁴Lecturer, Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology
Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand, jittiwat.ni@rmuti.ac.th

⁵Researcher, National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, 114 Thailand Science Park, Phahonyothin Road, Klong Nueng, Klong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand, nuttorakung@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพยากรณ์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวแปรในการเชื่อม TIG ต่อสมบัติเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการดำเนินโครงการได้นำกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดเชื่อม โดยใช้แท่งทังสเตน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร และขึ้นทดสอบใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด 50 x 150 x 2 มิลลิเมตร ประกอบกันเป็นรอยต่อชนและเชื่อมในตำแหน่งท่าราบ โดยใช้กระแสไฟเชื่อม 3 ระดับคือ 75, 95 และ 115 แอมแปร์ อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม 3 ระดับคือ 10, 12 และ 14 ลิตรต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับคือ 8, 10 และ 12 นิ้วต่อนาที ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k ในการออกแบบการทดลอง และทำนายค่าความเค้นแรงดึงด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม จากผลการดำเนินโครงการนี้พบว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงดีที่สุด คือ กระแสไฟเชื่อมที่ 115 แอมแปร์ อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม 12 ลิตรต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 10 นิ้วต่อนาที ได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงที่สุด คือ 573.472 N/mm² และจากการพยากรณ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของค่าความเค้นแรงดึง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.99636 มีค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง (MSE) เท่ากับ 0.2485

คำสำคัญ: การเชื่อมทิก, ความเค้นแรงดึง, แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ABSTRACT

This project aims to the prediction of optimal parameters in the TIG welding of AISI 304 Stainless steel using an artificial neural network. In the implementation of the project, the TIG welding process was used without filling wire. Tungsten electrodes diameter 1.6 mm and base material of 50 x 150 x 2 AISI 304 stainless steel plate were used in this experiment. The workpieces were formed as butt joint which were welded in flat position. The TIG welding process used 3 levels of welding current at 75, 95 and 115 amperes and 3 levels of welding gas at 10, 12 and 14 liters per minute as well as 3 levels of welding speed at 8, 10 and 12 inches per minute. The experiment was carried out on 3^k factorial design and predicted tensile stress values by neural network techniques. According to the results of this research, it was found that the maximum of tensile stress value was obtained with 115 amperes of welding

current, 12 liters per minute of welding cover gas and 10 inches per minute of welding speed. Which, the maximum of tensile stress value was 573.472 N/mm². From the experimental results, it was found that the tensile stress values could be predicted by neural network prediction with decision coefficient that 0.99636 It has a mean squared error (MSE) of 0.2485

KEYWORDS: Tig Welding, Tensile Stress, Neural Network Model

1. บทนำ

ปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีลักษณะพิเศษที่แตกต่างไปจากวัสดุอื่น ๆ เช่น มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความแข็งแรง เหนียวและทนต่ออุณหภูมิสูง มีลักษณะผิวที่สวยงาม ส่วนผสมของธาตุหลักจะประกอบไปด้วย เหล็ก โครเมียม และนิกเกิล มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 1.2 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมจะเป็นส่วนผสมหลักหลักมีประมาณ 10.5 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่านั้น สมบัติเหล็กกล้าไร้สนิมยากต่อการขึ้นสนิมเมื่อเทียบกับโลหะง่ายต่อการเชื่อม จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

กระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas : TIG) เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกรรมวิธีการใช้คุณภาพของแนวเชื่อมสูงและสะอาด จึงส่งผลให้เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมการผลิตได้หลากหลายเช่น การเชื่อมท่อ การเชื่อมเหล็กแผ่น โดยที่ชิ้นงานหลอมละลายด้วยความร้อนที่เกิดจากการอาร์คระหว่างปลายแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนกับชิ้นงานในขณะที่อาร์คจะมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมเปลวอาร์คและบ่อหลอมละลายเพื่อป้องกันไม่ให้ ออกซิเจน ไนโตรเจน นำความชื้นในอากาศเข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย โดยที่แก๊สที่ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อมมี แก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียม [1-4]

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติเป็นการออกแบบเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการและเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อมาอธิบายในความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพสามารถศึกษาผลของหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกัน มีนักวิจัยจำนวนมากที่นำหลักการออกแบบการทดลองเชิงสถิติมาใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมทิก เช่น Kumar and Sundarrajan [1] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมทิกสำหรับวัสดุ Al-Mg-Si alloy Joseph and Muthukumaran [2] ทำการศึกษาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมทิกเพื่อปรับปรุงแนวเชื่อมสำหรับวัสดุ AISI 4135 Reddy and VenkataRamana [5] ได้ทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมทิกด้วยหุ่นยนต์สำหรับวัสดุ AISI 3041 และ AISI 430 Yosefieh et al [6] ได้ทำการศึกษาค่าที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าชนิดพัลส์ในกระบวนการเชื่อมทิกสำหรับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมชุบเปอร์ดูเพล็กซ์ Mathew and Velmurugan [7] ได้ทำการศึกษา

พารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมทิกสำหรับวัสดุ SS304 Manikandan et al [8] ได้ทำการศึกษาค่าที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าชนิดพัลในกระบวนการเชื่อมทิกสำหรับวัสดุ alloy C-276 ด้วยวิธีการทากูชิ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการพยากรณ์ค่าที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อม ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบเพื่อเลียนแบบการประมวลผลข้อมูลของเครือข่ายเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์ เช่น Pashazadeh et al [9] ประยุกต์ใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมสปอตวัสดุ AISI 1008

งานวิจัยนี้จึงได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k และการพยากรณ์โดยโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและการพยากรณ์ค่าความต้านทานความเค้นแรงดึงของแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมทิกสำหรับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

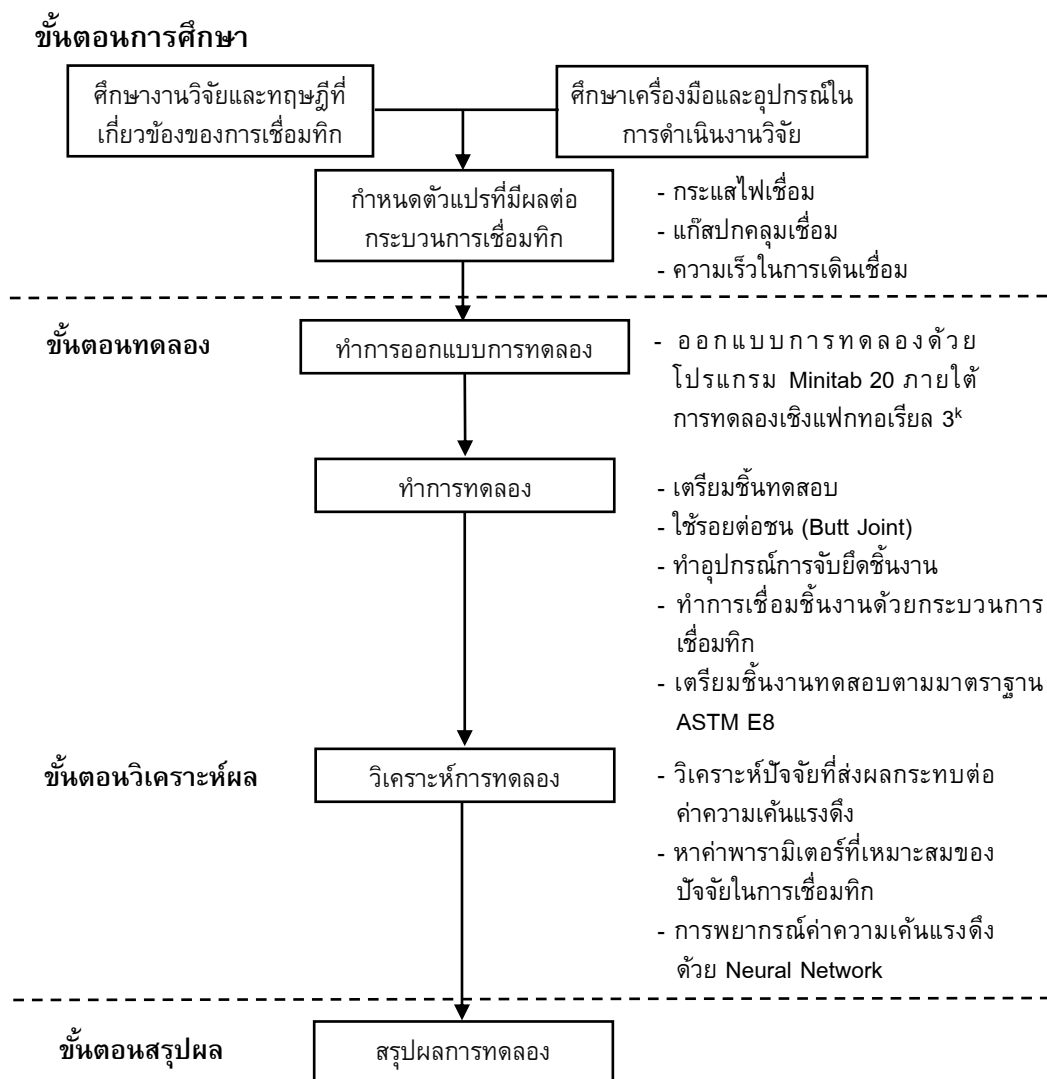
2. วิธีการดำเนินงานโครงการ

การดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง จากนั้นได้ทำการกำหนดปัจจัยและได้ทำการทดลองเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยวิธีการเชื่อมทิกตามหลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k เมื่อทำการทดลองเสร็จได้ทำการทดสอบแรงดึง โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [1, 2, 4, 7, 10-13] ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความเค้นแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E8 จากนั้นใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 20 มาทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงที่มากที่สุด จากนั้นผู้ดำเนินงานวิจัยได้นำการประยุกต์ใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์ด้วย Neural Network ในการพยากรณ์และเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพของแบบจำลองและการทดลอง ซึ่งแผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก โดยนำชิ้นงานที่ตัดแล้วมาเชื่อมยึดหัวท้ายให้เป็นรอยต่อชน (Butt Joint) ดังรูปที่ 2 ในกระบวนการเชื่อมทิกใช้ทั้งสแตนขนาด 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งกำหนดให้ปลายลวดทั้งสแตนออกจากหัว Nozzle ระยะเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทั้งสแตน และทำมุม 60 องศากับชิ้นงาน โดยเชื่อมชิ้นงานที่ถูกจับยึดกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานตามแนวยาว ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ผู้วิจัยได้กำหนดพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมทิกโดยกำหนดจากค่ามาตรฐานแนะนำจากหนังสือกระบวนการเชื่อม [14] จากนั้นทำออกแบบการทดลองทางสถิติโดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อม 75, 95 และ 115 แอมแปร์ ใช้อัตรา

การไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ และความเร็วในการเดินเชื่อม 8, 10 และ 12 นิ้ว/นาที่ ดังตารางที่ 1 และได้ทำการทดลองภายใต้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 ระดับ (3^K) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับศึกษาถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมจากพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อผลตอบทางสถิติ รวมถึงยังสามารถใช้สำหรับหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการ ซึ่งพารามิเตอร์ในการเชื่อมทิก และผลการทดลองของแต่ละพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 2 นอกจากนี้รูปของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแสดงได้ดังรูปที่ 5 และชิ้นงานทดสอบที่ถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8 รวมถึงการทดสอบความเค้นแรงดึง แสดงดังรูปที่ 6 – 8



รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย



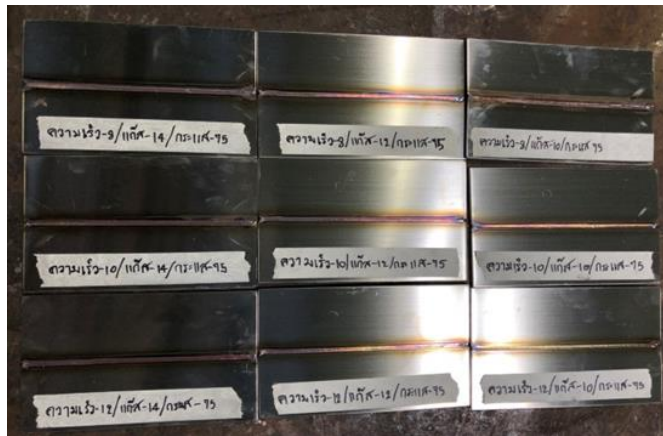
รูปที่ 2 รอยต่อของชิ้นงานหลังการเชื่อมยึด



รูปที่ 3 แสดงการตั้งมุมหัวเชื่อม 60 องศา



รูปที่ 4 เชื่อมชิ้นงานทดสอบ



(ก)

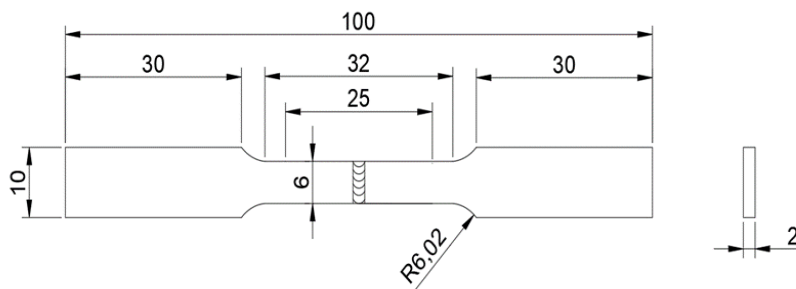


(ข)

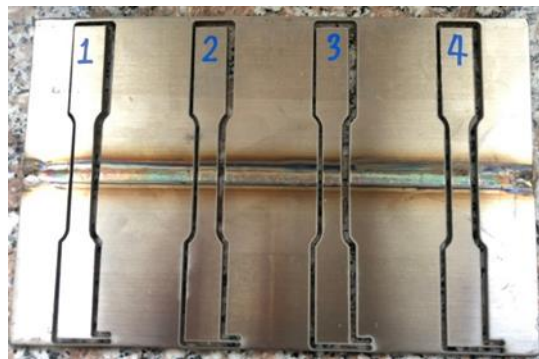


(ค)

รูปที่ 5 ชิ้นงานทดลองผ่านกระบวนการเชื่อมทิก (ก) ใช้กระแสไฟเชื่อม 75 แอมแปร์ (ข) ใช้กระแสไฟเชื่อม 95 แอมแปร์ (ค) ใช้กระแสไฟเชื่อม 115 แอมแปร์



รูปที่ 6 แบบชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8



รูปที่ 7 ชิ้นทดสอบหลังตัดด้วย wire cut



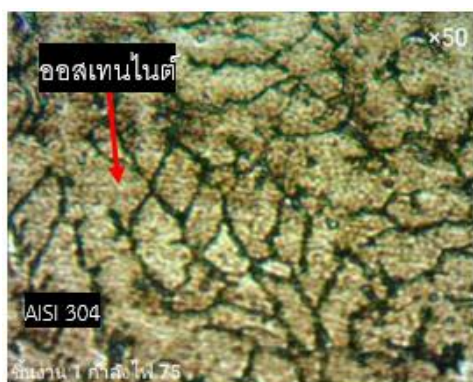
(ก)



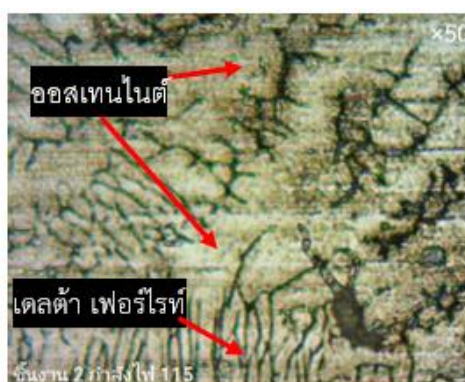
(ข)

รูปที่ 8 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) (ก) ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน (ข) ลักษณะชิ้นงานหลังการทดสอบ

โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม Tig ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการกัดกรดไปส่องดูโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ พร้อมถ่ายภาพที่กำลังขยาย 50X ดังแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยผลหลังการทดสอบที่ใช้กระแสที่ 75 แอมแปร์ โครงสร้างที่ได้คือออสเทนไนต์ ดังรูปที่ 9 ก ในขณะที่เดียวกันที่กระแสไฟ 115 แอมแปร์ โครงสร้างที่ได้คือออสเทนไนต์ และเดลต้าเฟอร์ไรท์ จากกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสที่สูง ดังรูปที่ 9 ข



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (ก) การเชื่อมโดยกระแสไฟเชื่อมที่ 75 แอมแปร์ กำลังขยาย 50 เท่า (ข) การเชื่อมโดยกระแสไฟเชื่อมที่ 115 แอมแปร์ กำลังขยาย 50 เท่า

ตารางที่ 1 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง	หน่วย
กระแสไฟเชื่อม	75	95	115	แอมแปร์
อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม	10	12	14	ลิตร/นาที
ความเร็วเดินเชื่อม	8	10	12	นิ้ว/นาที

ตารางที่ 2 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

ลำดับ	กระแสไฟเชื่อม	อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม	ความเร็วเดินเชื่อม	ค่าความเค้นแรงดึง (N/mm ²)	
				ซ้ำ 1	ซ้ำ 2
1,28	75	10	8	182.639	174.444
2,29	75	10	10	210.000	213.889
3,30	75	10	12	215.000	214.028
4,31	75	12	8	203.889	200.278
5,32	75	12	10	210.417	187.361
6,33	75	12	12	212.639	216.528
7,34	75	14	8	285.111	205.833

ตารางที่ 2 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	กระแสไฟ เชื่อม	อัตราการไหล แก๊สปกคลุมเชื่อม	ความเร็ว เดินเชื่อม	ค่าความเค้นแรงดึง (N/mm ²)	
				ซ้ำ 1	ซ้ำ 2
8,35	75	14	10	222.972	219.167
9,36	75	14	12	211.528	290.833
10,37	95	10	8	296.528	377.222
11,38	95	10	10	310.278	288.750
12,39	95	10	12	273.056	265.694
13,40	95	12	8	254.444	307.917
14,41	95	12	10	357.778	287.083
15,42	95	12	12	277.222	264.306
16,43	95	14	8	254.861	235.694
17,44	95	14	10	225.139	215.972
18,45	95	14	12	245.694	258.750
19,46	115	10	8	525.417	553.889
20,47	115	10	10	560.139	563.194
21,48	115	10	12	524.583	542.083
22,49	115	12	8	543.056	573.194
23,50	115	12	10	557.472	573.472
24,51	115	12	12	533.889	560.278
25,52	115	14	8	413.750	396.389
26,53	115	14	10	531.806	553.472
27,54	115	14	12	369.722	373.056

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักและปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม

จากผลการทดลองจึงได้นำข้อมูลในตารางที่ 2 มาทำการวิเคราะห์ผลความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความเค้นแรงดึงแสดงให้เห็นถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดสอบความเค้นแรงดึง พบว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของปัจจัยที่มี

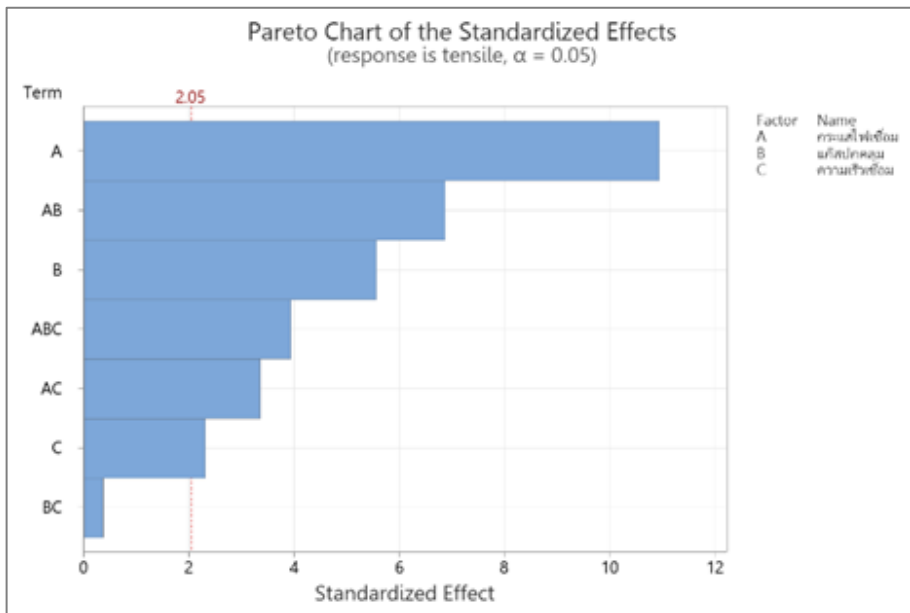
อิทธิพลต่อค่าความเค้นแรงดึงคือ กระแสไฟเชื่อม อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม โดยที่ค่า P-Value ทั้งหมดของปัจจัยหลักมีค่าน้อยกว่า 0.05 และเมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมของปัจจัย พบว่าผลกระทบร่วมระหว่างกระแสไฟเชื่อมและอัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม กระแสไฟเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองมีความเชื่อถือ 96.86 % ดังตารางที่ 3 นอกจากนี้ยังพบว่าค่า R-square (adj) มีค่าเท่ากับ 91.76 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความความสัมพันธ์พอเพียงในการฟิตข้อมูล

นอกจากนี้รูปที่ 10 ได้แสดงถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึง พบว่ากระแสไฟเชื่อมมีอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงมากที่สุดรวมไปถึงอัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมเป็นผลกระทบหลักของปัจจัย ในขณะที่ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยพบว่ากระแสไฟเชื่อมและอัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม รวมไปถึงกระแสไฟเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึง รูปที่ 11 พบว่าเมื่อใช้กระแสไฟเชื่อม 115 แอมแปร์ เกิดค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด และเมื่อกระแสไฟเชื่อมลดลงที่ 95 แอมแปร์ และ 75 แอมแปร์ ค่าความเค้นแรงดึงจะลดลงตามลำดับ และพบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อมที่ 10 และ 12 ลิตร/นาที่ จะทำให้ค่าความเค้นแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่เมื่อใช้อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อมที่ 14 ลิตร/นาที่ จากผลการทดลองพบว่าผลของค่าความเค้นแรงดึงลดลง ซึ่งผลจากการที่ใช้อัตราการไหลแก๊สปกคลุมมากเกินไป นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วในการเดินเชื่อม 8 และ 12 นิ้ว/นาที่ จะมีค่าความเค้นแรงดึงใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 10 นิ้ว/นาที่ จะมีค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสมของการทดลองมีผลทำให้แนวเชื่อมแข็งแรง ในขณะที่รูปที่ 12 พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อมที่ 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ ใช้กระแสไฟเชื่อม 75, 95 และ 115 แอมแปร์ จะส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้น เป็นผลจากที่กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสมมีผลโดยตรงกับต่อความแข็งแรง ในขณะที่ผลกระทบร่วมระหว่างกระแสไฟเชื่อมและความเร็ว พบว่าเมื่อใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่ 8, 10 และ 12 นิ้ว/นาที่ จะได้ค่าความเค้นแรงดึงที่เพิ่มขึ้น เมื่อปรับใช้กระแสไฟเชื่อม 75, 95 และ 115 แอมแปร์ตามลำดับ และผลกระทบร่วมระหว่างอัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมจะส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึง พบว่าเมื่อใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่ 8, 10 และ 12 นิ้ว/นาที่ และปรับใช้อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อมที่ 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ จะได้ค่าความเค้นแรงดึงที่น้อยลงตามลำดับ ซึ่งความแข็งแรงดึงที่ต่ำโดยใช้กระแสไฟที่ต่ำ เกิดการหลอมละลายลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete Penetration) และการเกิดโดยกระแสไฟเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่ไม่เหมาะสมส่งผลต่อความร้อนเข้า (Heat Input) เกิดรอยเชื่อมสันนูน (Weld Bead) ของขนาดและรูปร่างของรอยเชื่อมส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมได้ อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่แตกต่างกันมีผลต่อรูปร่างของแนวเชื่อมและ

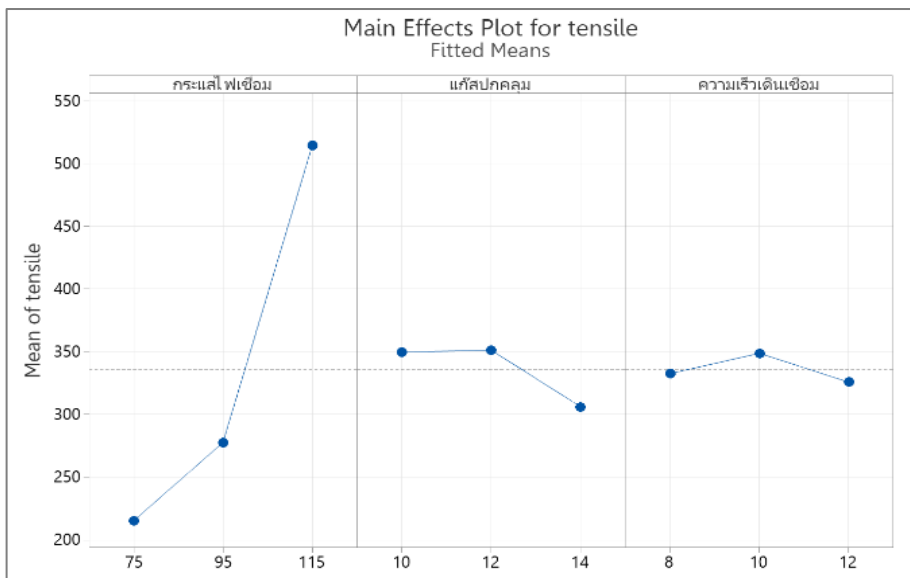
คุณสมบัติทางกลเช่นกัน ในการทดลองได้กำหนดเงื่อนไขในการดำเนินงานในห้องปฏิบัติการแบบเปิดในสภาวะแวดล้อมเดียวกันทุกชิ้นงาน

ตารางที่ 3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความเค้นแรงดึง

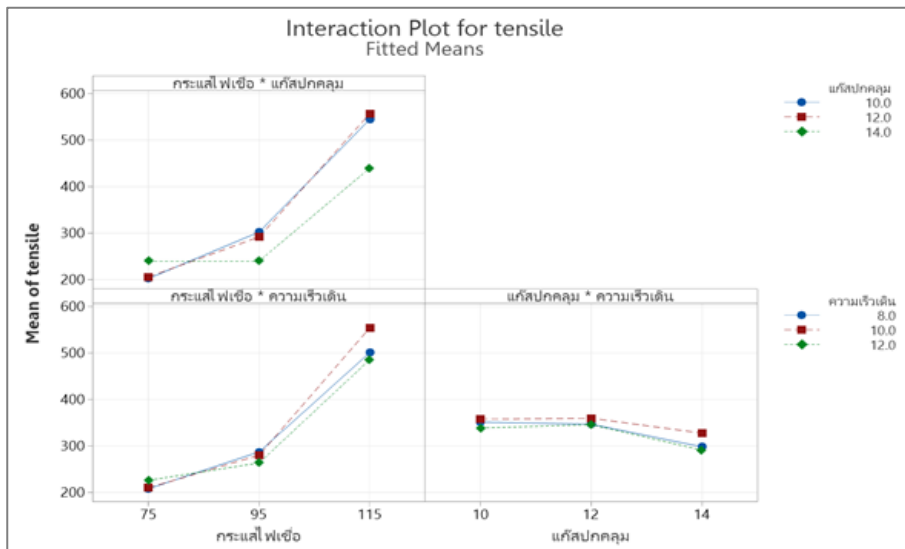
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	1006835	38724	63.98	0.000
Linear	6	921705	153517	253.81	0.000
กระแสไฟเชื่อม	2	892578	446289	737.36	0.000
อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม	2	23509	11755	19.42	0.000
ความเร็วเดินเชื่อม	2	5617	2809	4.64	0.019
2-Way Interactions	12	60750	5063	8.36	0.000
กระแสไฟเชื่อม*แก๊สปกคลุม	4	45023	11256	18.60	0.000
กระแสไฟเชื่อม*ความเร็วเดินเชื่อม	4	14636	3659	6.05	0.002
อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม*ความเร็วเดินเชื่อม	4	1092	273	0.45	0.771
3-Way Interactions	8	24380	3048	5.04	0.001
กระแสไฟเชื่อม*อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม*ความเร็วเดินเชื่อม	8	24380	3048	5.04	0.001
Error	27	16646	605		
Total	53	1023177			
R-sq = 98.40% R-sq(adj) = 96.86% R-sq(pred) = 93.61%					



รูปที่ 10 แผนภูมิพาเรโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึง



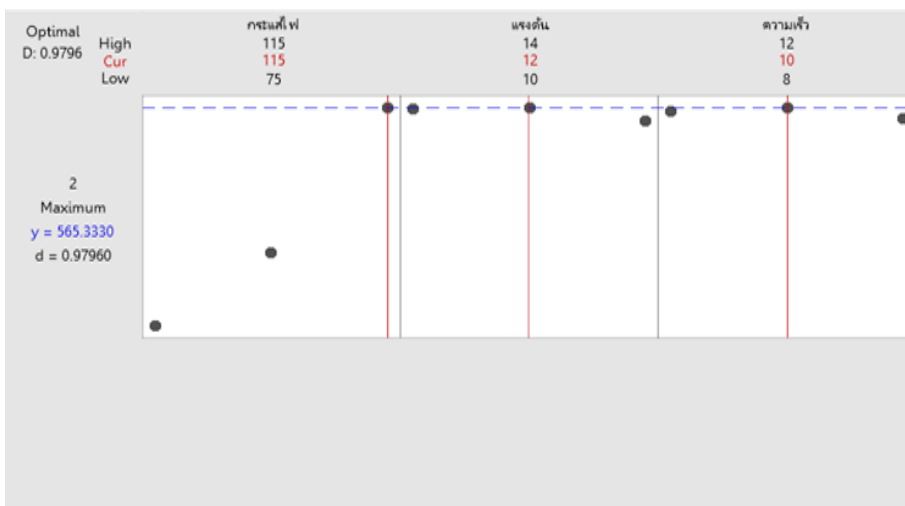
รูปที่ 11 กราฟของอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัย



รูปที่ 12 ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความเค้นแรงดึง

4.2 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

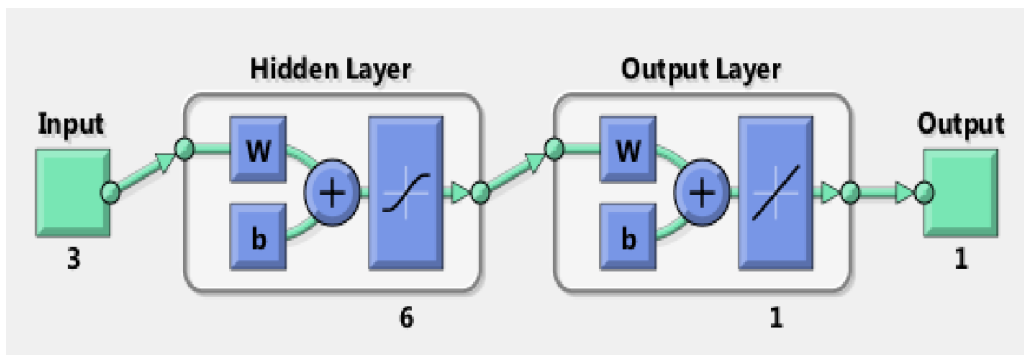
การทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความเค้นแรงดึง โดยกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบได้แก่ กระแสไฟเชื่อม อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม จากการทดลองใช้ Response Optimizer โปรแกรม Minitab 20 ในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า กระแสไฟเชื่อมที่ 115 แอมแปร์ อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม 12 ลิตร/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 10 นิ้ว/นาที ได้ค่าความเค้นแรงดึงที่ดีที่สุดประมาณ 565.333 N/mm^2 ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงที่สุด

4.3 การพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึง

การพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) โดยใช้ Neural Network เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลข้อมูลด้วยการเชื่อมต่อการคำนวณและระบบการทำแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Mapping System) ในการจำลองนี้จะใช้ Neural Network 3 ชั้น ให้การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) ด้วยอัลกอริทึม Levenberg-Marquardt ดังรูปที่ 14

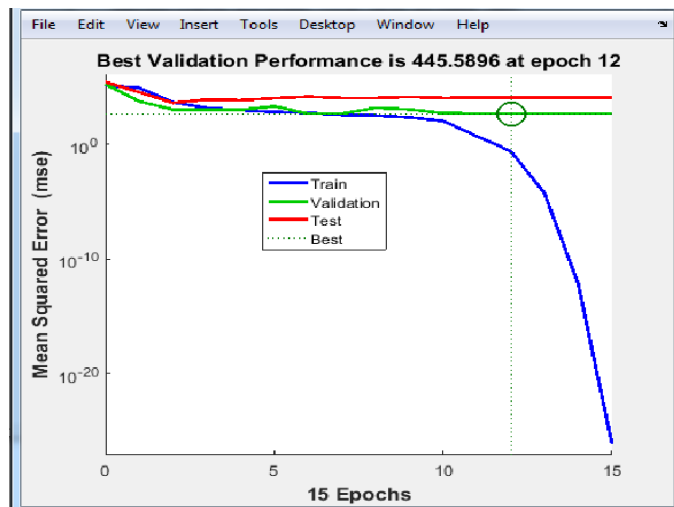


รูปที่ 14 แบบจำลอง Neural Network

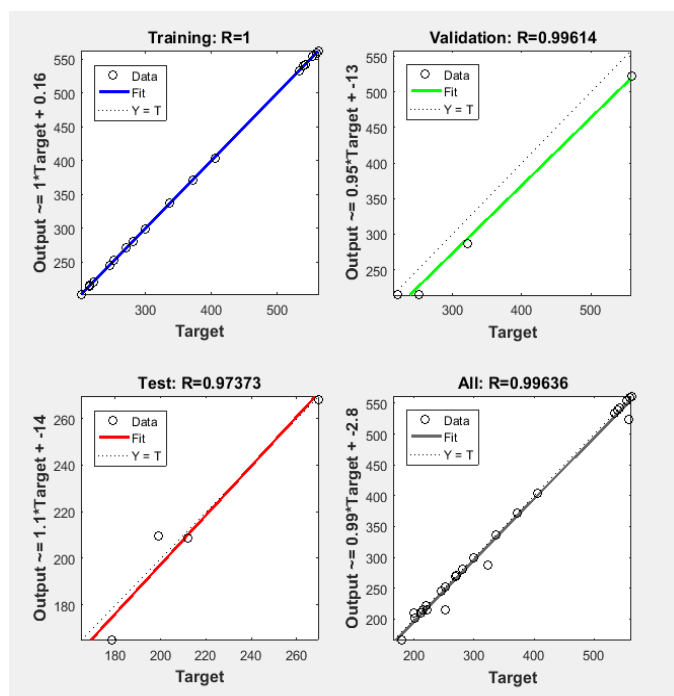
การเลือก Neural Network ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง (MSE) ของชุดการทดลอง พบว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) จะประกอบด้วยชั้นของข้อมูลอินพุต (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นผลลัพธ์ (Output-Layer) ชั้นซ่อนอยู่ประกอบด้วย 6 เซลล์ประสาท (Neurons) และชั้น Output ประกอบด้วยหนึ่งเซลล์ประสาท (Neurons) จากค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) โดยจะมีการเรียนรู้ของโปรแกรมโมเดลนี้จะมี 3 ชั้น ตัวแปร Input ที่ซ่อนคือค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่าที่ใช้ในการทดลอง ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) คือตัวแปร Output ที่ซ่อนอยู่ กราฟประสิทธิภาพการเรียนรู้ของ Neural Network เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาด สามขั้นตอน คือ การฝึกสอน (Train) การตรวจสอบ (Validation) และทดสอบ (Test) ประสิทธิภาพการตรวจสอบที่ดีที่สุด (Best) เกิดขึ้นที่รอบในการวนซ้ำ (Epoch) ที่ 15 ดังรูปที่ 15

กราฟการถดถอยที่พยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) ทั้ง 27 การทดลอง ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม แบบจำลองจาก Neural Network มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทดสอบ (Training) ที่ 1 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการตรวจสอบ (Validation) ที่ 0.99614 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการ

ทดสอบ (Test) ที่ 0.97373 และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจรวมของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ 0.99636 โดยมีความชันเท่ากับ 0.99 และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ 0.248560 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด รูปที่ 16



รูปที่ 15 กราฟประสิทธิภาพ Neural Network

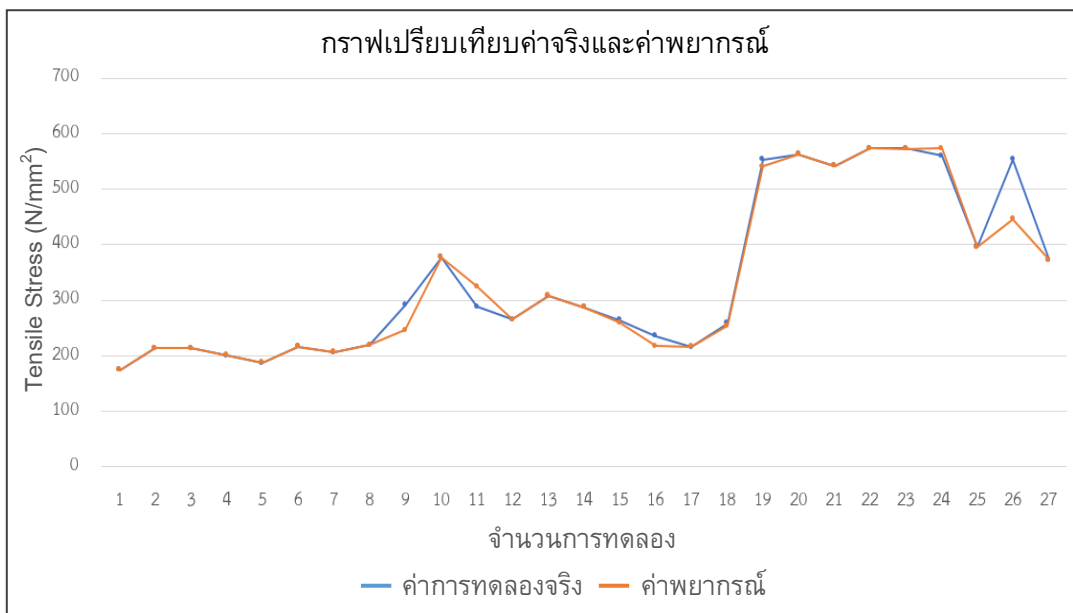


รูปที่ 16 กราฟการถดถอย Neural Network

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์

ลำดับ	ค่าการทดลองจริง	ค่าการพยากรณ์	Percent Error
1	174.444	174.4518	0.004
2	213.889	213.5281	0.169
3	214.028	213.5994	0.201
4	200.278	201.2482	0.482
5	187.361	188.1971	0.444
6	216.528	217.0755	0.252
7	205.833	206.5408	0.343
8	219.167	219.6514	0.221
9	290.833	246.5109	17.980
10	377.222	377.1569	0.017
11	288.75	324.3250	10.969
12	265.694	265.7326	0.015
13	307.917	308.1189	0.066
14	287.083	287.3015	0.076
15	264.306	259.8471	1.716
16	235.694	217.5406	8.345
17	215.972	216.6458	0.311
18	258.75	253.6263	2.020
19	553.889	541.2017	2.344
20	563.194	563.1646	0.005
21	542.083	542.0604	0.004
22	573.472	573.5715	0.017
23	573.194	572.8307	0.063
24	560.278	573.1687	2.249
25	396.389	395.3516	0.262
26	553.472	445.9284	24.117
27	373.056	372.7439	0.084

จากตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของค่าการทดลองจริงกับข้อมูลที่พยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) อธิบายได้ว่าจาก 27 ค่าการทดลองแสดงความแตกต่างของข้อมูลตามลำดับ รูปที่ 17 แสดงกราฟจากตารางเพื่อเปรียบเทียบผลของการพยากรณ์ที่ได้จากโปรแกรม Matlab ในฟังก์ชัน Neural Net Fitting พบว่ากราฟมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่สอดคล้องกันค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากจุดที่อยู่บนกราฟ (Line With Markers) จะมีความห่างระหว่างจุดของกราฟแต่ละเส้น ซึ่งค่อนข้างจะมีทิศทางไปในทางเดียวกันแต่จะมีอยู่ 1 จุดที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเพราะ Percent Error เท่ากับ 24.117% ความสูงของจุดในแนวแกน Y จะแทนเป็นค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) และความห่างระหว่างจุด ในแนวแกน X จะแทนจำนวนการทดลองตามลำดับ



รูปที่ 17 กราฟเปรียบเทียบค่าการทดลองจริงและค่าการพยากรณ์

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเชิงเส้นแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง โดยโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแก้ปัญหาการเกิดแบบจำลองจดจำรูปแบบของข้อมูลเทรนยังมีจำนวนมาก จะทำให้จะทำนายข้อมูลแม่นยำมากขึ้น ถึงแม้ว่ามีการแบ่งข้อมูลในการเทรน แต่ทุกข้อมูลสามารถได้รับการเทรนทั้งหมดดังนั้นข้อมูลจำนวน 27 การทดลอง จึงมีความเพียงพอในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ

5. สรุปผลการทดลอง

5.1) จากการดำเนินโครงการทดสอบคุณสมบัติทางกลความทนทานต่อแรงดึง ค่าความเค้นแรงดึงต่ำที่สุดเกิดจากใช้กระแสไฟเชื่อม 75 แอมแปร์ อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม 10 ลิตร/นาที่ และความเร็วเดินเชื่อม 8 นิ้ว/นาที่ ได้ค่าความเค้นแรงดึง เท่ากับ 174.444 N/mm^2 ซึ่งมีการขาดของชิ้นงานตรงแนวเชื่อมเนื่องจากกระแสไฟเชื่อมน้อยจะทำให้ไม่เกิดการซึมลึก จึงเป็นเหตุทำให้ได้ค่าความเค้นแรงดึงที่ต่ำ ในทางกลับกันเมื่อใช้กระแสไฟเชื่อมที่ 115 แอมแปร์ อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม 12 ลิตร/นาที่ และความเร็วเดินเชื่อม 10 นิ้ว/นาที่ ได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 573.472 N/mm^2 เนื่องจากตัวแปรกระแสไฟในการเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การหลอมละลายรวมตัวกันของชิ้นงานทั้งสองชิ้นสมบูรณ์ และยังส่งผลต่อความเค้นแรงดึงที่สูงขึ้นตามลำดับ จากการดำเนินการทดลองไม่ได้มีการคลุมปิดบริเวณที่ทำการเชื่อม มีผลให้มีการเกิด Oxidation ในการทดลองซึ่งเป็นข้อจำกัดในระหว่างดำเนินการทดลอง

5.2) จากการทดลองภายใต้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากการแนะนำทางสถิติ คือค่ากระแสไฟเชื่อมที่ 115 แอมแปร์ อัตราการไหลแก๊สปกคลุมเชื่อม 12 ลิตร/นาที่ และความเร็วเดินเชื่อม 8 นิ้ว/นาที่ ได้ค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ 565.333 N/mm^2

5.3) ผลจากการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ Neural Network มาพยากรณ์ โดยใช้โปรแกรม Matlab ที่มีประสิทธิภาพในการทำหาค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เพื่อช่วยในการทำนายผลในการหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับออกแบบการทดลอง โดยผลจากการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ จะประกอบไปด้วยจำนวนนิวรอน ในชั้น Input 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนที่ซ่อนอยู่ในชั้นที่ 1 มีจำนวน 6 นิวรอน และนิวรอนที่แสดงอยู่ในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-6-1) โดยจะเอามาเปรียบเทียบกับค่าทดลองจริงกับค่าการพยากรณ์ของ Neural Network โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.99636 มีค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง (MSE) เท่ากับ 0.248560 และความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการทดลองจริงและค่าที่พยากรณ์ จะพบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ช่วง 0.004.- 24.117 เปอร์เซ็นต์

6. ข้อเสนอแนะ

อุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงาน อาจจะสะสมความร้อนในการเชื่อมควรรอให้เย็นตัวก่อนจึงทำการเชื่อมชิ้นงานต่อไป ทำการศึกษาปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ ในโครงสร้างโลหะบริเวณแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กับปัจจัยการเชื่อมที่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึง

References

- [1] Kumar A, Sundarrajan S. Effect of welding parameters on mechanical properties and optimization of pulsed TIG welding of Al-Mg-Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009; 42:118-125
- [2] Joseph J, Muthukumaran S. Optimization of activated TIG welding parameters for improving weld joint strength of AISI 4135 PM steel by genetic algorithm and simulated annealing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017;93:23-34
- [3] Singh AK, Dey V, Rai RN. Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review). *Materials Today: Proceedings* 2017;4(2):1252-9.
- [4] Shrivastava S, Vaidya SK, Khandelwal AK, Vishvakarma AK. Investigation of TIG welding parameters to improve strength. *10th International Conference of Materials Processing and Characterization. Materials Today: Proceedings* 2020;26:1897-902.
- [5] Reddy GN, VenkataRamana M. Optimization of process parameters in welding of dissimilar steels using robot TIG welding. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 2018;330:012096.
- [6] Yosefieh M, Shamanian M, Saatchi A. Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel welds using the Taguchi method. *Journal of Alloy and Compounds* 2011;509(3):782-8.
- [7] Mathewa BK, Velmurugan C. Evaluation of TIG welding parameters using statistical methods to optimize the mechanical properties of stainless steel – SS304. *AIP Conference Proceedings* 2022;2446(1):16006.
- [8] Manikandan M, Nageswara RM, Ramanujam R, Ramkumar D, Arivazhagan N, Reddy GM. Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding process parameters for alloy C-276 using the taguchi method. *Procedia Engineering* 2014;97:767-74.
- [9] Pashazadeh H, Gheisari Y, Hamed M. Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2016;27(3):549-59
- [10] Ampaiboon A, Lasunon O, Bubphachot B. Optimization and prediction of ultimate tensile strength in metal active gas welding. *The Scientific World Journal* 2015;2015: 831912.

- [11] Naik AB, Reddy AC. Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA). Thermal Science and Engineering Progress 2018;8:327-39.
- [12] Sridhara SNS, Allada SCS, Sai PVS, Banala S, Subbiah R, Marichamy S. Tensile strength performance and optimization of Al 7068 using TIG welding process. Materials Today: Proceedings 2021;45(Pt 2):2017-21.
- [13] Khantongkum S, Thanasuptawee U, Promdan W, Siwadamrongpong S. Mechanical properties of weld joint by friction stir welding on aluminum alloy 5083. Proceedings of 10th International Conference on Mechatronics and Control Engineering (ICMCE 2021); 2021 Jul 26-28; Lisbon, Portugal. Singapore: Springer; 2023. p. 37-42.
- [14] Teng-Hongcharoen S, Promkochasut C. Welding process. Bangkok: Academic Support Center; 2013. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิศวกรรม
อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก โทรศัพท์ 086-9270478 E-mail: Kitti_w@rmutl.ac.th



อุกฤษฏ์ รัตนพัฑฒ์ อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิศวกรรม
อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: t.ukrit@edu.rmutl.ac.th



ชีวพล นิตยัณรา อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาเทคโนโลยี
วิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โทรศัพท์ 087-9208564 E-mail:
chiwapon.n@cit.kmutnb.ac.th



จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิศวกรรม
อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลอีสาน โทรศัพท์ 081-5470993 E-mail: jittiwat.ni@rmuti.ac.th



พันทิwa พวงสาลี นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์
ประเทศไทย โทรศัพท์ 083-2555517 E-mail: nuttorakung@hotmail.com

Article History:

Received: February 28, 2023

Revised: July 12, 2023

Accepted: July 13, 2023

การศึกษาการเชื่อมโยงน้ำและความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการผลิต
น้ำประปาของเมืองพัทยาในประเทศไทย

THE STUDY OF WATER-ENERGY NEXUS WITH WATER SUPPLY
SYSTEM OF PATTAYA CITY IN THAILAND

สุรศักดิ์ จันทน์นาย¹ สุภราชชัย วรรัตน์^{2*} และ อำนาจ ผดุงศิลป์³

¹นักศึกษา บัณฑิตศึกษากิจการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถนนประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
surasak_69@yahoo.com

^{2*}อาจารย์ บัณฑิตศึกษากิจการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถนนประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
vorarat@dpu.ac.th

³อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาธิปไตย เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140,
aumnad.phdu@kmutt.ac.th

Surasak Janchai¹, Suparatchai Vorarat^{2*} and Aumnad Phdungsilp³

¹Ph.D. student, Graduate Program in Engineering Management, College of Innovative
Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road,
Laksi, Bangkok 10210, Thailand, surasak_69@yahoo.com

^{2*}Lecturer, Graduate Program in Engineering Management, College of Innovative
Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road,
Laksi, Bangkok 10210, Thailand, vorarat@dpu.ac.th

³Lecturer, Energy Management Technology Program, School of Energy, Environment and
Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Road,
Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand, aumnad.phdu@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เมืองท่องเที่ยวใช้ทรัพยากรน้ำและพลังงานต่าง ๆ มากกว่าเมืองประเภทอื่น ๆ ดังนั้นการเชื่อมต่อ
ทรัพยากรน้ำ พลังงาน และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นเรื่องที่ต้องได้รับการ
จัดการอย่างเร่งด่วน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเชื่อมโยงระหว่างระบบ

จ่ายน้ำประปาและการใช้พลังงาน โดยการปรับปรุงระบบจ่ายน้ำประปาเพื่อลดการผลิตน้ำประปา และประเมินการลดการปลดปล่อย CO₂ ในระบบผลิตน้ำประปาจากการใช้ไฟฟ้าที่ลดลง ในการปรับปรุงระบบจ่ายน้ำประปาได้ทำการติดตั้งวาล์วควบคุมการจ่ายน้ำประปาชนิดวาล์วควบคุมไฟฟ้า ที่สถานีจ่ายน้ำประปา 5 สถานีในพื้นที่กรณีศึกษา (เมืองพัทยา) ระบบจ่ายน้ำประปาได้รับการออกแบบในแบบจำลอง EPANET เพื่อจำลองและตรวจสอบความสามารถในการจ่ายน้ำในท่อบริการสถานีจ่ายน้ำ 5 สถานี ซึ่งมีอัตราการไหลระหว่าง 500-1,300 m³/hour และแรงดันระหว่าง 20-45 m ระบบจ่ายน้ำถูกจำลองและวิเคราะห์ เพื่อหาอัตราการไหลและแรงดันที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการจ่ายน้ำต่ำสุดที่สถานีจ่ายน้ำแต่ละแห่ง ผลการวิจัยพบว่า การลดปริมาณการจ่ายน้ำประปาทำให้ปริมาณการผลิตน้ำประปาลดลง จากเดิมผลิตรวม 115,200 m³/day คงเหลือการผลิต 78,480 m³/day ปริมาณการใช้ไฟฟ้าอยู่ที่ 12,856 kWh/day และการปลดปล่อย CO₂ ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอยู่ที่ 7,483 kgCO₂eq/day การปรับวาล์วควบคุมแต่ละสถานีทั้งหมด 5 สถานี ยิ่งไปกว่านั้นพบว่า สถานีมาบประชันของเดิมมีการปลดปล่อย CO₂ มากถึง 1,247 kgCO₂eq/day หลังปรับวาล์วลดลงเหลือ 873 kgCO₂eq/day สถานีบางละมุงเดิมมีการปลดปล่อย 2,027 kgCO₂eq/day หลังปรับวาล์วลดลงเหลือ 1,294 kgCO₂eq/day สถานีชากนอกเดิมมีการปลดปล่อย 779 kgCO₂eq/day หลังปรับวาล์วลดลงเหลือ 390 kgCO₂eq/day สถานีนาจอมเทียนเดิมปลดปล่อยมากถึง 1,715 kgCO₂eq/day หลังปรับวาล์วลดลงเหลือ 1,590 kgCO₂eq/day สถานีชัยพรวิถีดเดิมปลดปล่อยมากถึง 1,715 kgCO₂eq/day หลังปรับวาล์วลดลงเหลือ 951 kgCO₂eq/day และสามารถควบคุมอัตราการไหลตามความต้องการน้ำประปา ส่งผลให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อวันอยู่ที่ 8,759 kWh/day ปริมาณการใช้ไฟฟ้าและการปลดปล่อย CO₂ ลดลง 1,495,400 MWh/year และ 870,530 tCO₂eq/year ตามลำดับ

คำสำคัญ: การประหยัดพลังงาน, การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน, การเชื่อมโยงน้ำและพลังงาน, การจัดการน้ำ

ABSTRACT

Tourism cities use more water and energy resources than other city types. Therefore, the water-energy nexus and CO₂ emissions are urgent issues to manage. This paper studies the nexus between water distribution systems and energy usage. It studies the improvements of the water distribution system to reduce water production and estimates energy-related CO₂ emission reductions in water supply systems. The water supply systems are improved by installing electric control valves in a case study (Pattaya city) at five water supply stations. Moreover, it was found that the original Mabprachan station emitted CO₂ as much as

1,247 kgCO₂eq/day after adjusting the valves to 873 kgCO₂eq/day. The original Bang Lamung station emitted 2,027 kgCO₂eq/day after adjusting the valves to 1,294 kgCO₂eq/day. The original wreck station was liberated 779 kgCO₂eq/day after valve adjustment was reduced to 390 kgCO₂eq/day, former Na Jomtien station emitted up to 1,715 kgCO₂eq/day after valve adjusted down to 1,590 kgCO₂eq/day, old Chaiyaphon Way station emitted up to 1,715 kgCO₂eq/day after valve adjustment reduced to 951 kgCO₂eq/day. The water supply systems are designed in the EPANET model to simulate and investigate the water supply capability in the service pipes of five water supply stations with flow rates between 800-1,300 m³/hour and pressures between 20-45 m. Results are shown that the water supply reductions decreased the amounts of water production from the original production of 115,200 m³/day to 78,480 m³/day. The electricity consumption is 12,856 kWh/day, and the energy-related CO₂ emissions are 7,483 kgCO₂eq/day. Adjusting electric control values at the five stations regulates the flow rate and follows the water supply demand. Consequently, the electricity consumption is 8,759 kWh/day. Total electricity consumption and CO₂ emissions are reduced by 1,495,400 MWh/year and 870,530 tCO₂eq/year, respectively.

KEYWORDS: Energy-Savings, Carbon Emissions, Water-Energy Nexus, Water Management

1. บทนำ

พลังงานและน้ำเป็นทรัพยากรที่มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ อย่างไรก็ตามบางภูมิภาคอาจประสบปัญหาการขาดแคลนแหล่งพลังงานและน้ำที่จำเป็นต่อการพัฒนาประเทศ จากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอย่างไม่เคยมีการวางแผนมาก่อน และเมื่อมีการเติบโตทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราความต้องการการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) นั้นสูงขึ้นอย่างเป็นนัยสำคัญและเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) [1] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจากการเพิ่มขึ้นของนักท่องเที่ยว โรงแรม และอาคารที่อยู่อาศัย (Residential Building) ขนาดใหญ่ของเมืองท่องเที่ยวในประเทศไทย เช่น พัทยาและภูเก็ต เป็นต้น ตลอดจนการเพิ่มขึ้นของประชากรที่ย้ายถิ่นฐานเพื่อมาประกอบอาชีพและอยู่อาศัย ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านความยั่งยืนของทรัพยากร สิ่งแวดล้อม และสังคม

ท่ามกลางปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้มีผู้ให้ความสนใจศึกษาในเรื่องการเชื่อมโยงของทรัพยากรน้ำและพลังงานมากขึ้น เพื่อจัดการการใช้พลังงานให้เหมาะสมกับความต้องการพลังงานและการจัดการน้ำประปาที่ใช้ในเมือง โดยพบความเชื่อมโยงว่าหากได้รับ

การพัฒนาเพื่อส่งเสริมการใช้น้ำอย่างคุ้มค่า จะนำมาสู่การลดการใช้พลังงานและลดการปลดปล่อย CO₂ จากระบบน้ำอย่างมีนัยสำคัญ [2] ดังนั้นเพื่อรองรับการขยายตัวของภาคบริการ ภาคการท่องเที่ยวและการขยายตัวของเขตเมือง ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความต้องการการใช้น้ำเพื่ออุปโภค-บริโภค ทรัพยากรน้ำจึงมีอิทธิพลอย่างมากในระดับภูมิภาคและระดับชาติ [3] ทำให้การพัฒนาแหล่งน้ำและการใช้น้ำในเมืองอย่างยั่งยืนกลายเป็นปัญหาระดับโลก สิ่งสำคัญคือต้องปกป้องความปลอดภัยของน้ำดื่มและลดความกังวลด้านทรัพยากรน้ำที่มีอยู่ บริหารการจ่ายน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการการใช้น้ำของประชาชน รวมถึงการปรับตัวเข้ากับสภาพภูมิอากาศ [4]

ดังนั้นการจัดการนโยบายแบบบูรณาการ การจัดการควบคุมประสิทธิภาพการจ่ายน้ำและลดพลังงานไฟฟ้า ต้องได้รับการศึกษาเพื่อพัฒนาส่งเสริมให้มีการใช้น้ำและพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการพัฒนาความยั่งยืนของเมืองท่องเที่ยว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมโยงของการใช้น้ำและพลังงานเพื่อให้บริการในเมืองท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน การศึกษานี้ใช้เมืองพัทยาเป็นกรณีศึกษา เพื่อทำการวิเคราะห์การเชื่อมโยงน้ำ พลังงาน และส่งเสริมความยั่งยืนของทรัพยากรน้ำและพลังงานในระยะยาว เนื่องจากเมืองท่องเที่ยวมีการใช้ทรัพยากรน้ำและพลังงานเพื่อให้บริการเมืองมากกว่าเมืองประเภทอื่น ๆ ดังนั้นระบบการจัดการน้ำและพลังงานจึงมีความสำคัญต่อการตอบสนองความต้องการระยะยาวสำหรับบริการในเมืองท่องเที่ยว

2. ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาทบทวนวรรณกรรม เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยรวมถึงกรอบแนวคิดระเบียบวิธีการวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเชื่อมโยงของพลังงานและน้ำในเขตเมือง จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมพบว่า การใช้พลังงานในการสูบ-ส่งจ่ายน้ำประปาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับเครือข่ายการจ่ายน้ำประชาชนขนาดใหญ่ เนื่องจากโครงข่ายการส่งน้ำประปาเป็นระบบโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่ต้องใช้พลังงานในการจ่ายน้ำให้มีปริมาณและแรงดันน้ำที่เพียงพอต่อความต้องการ โดยการประเมินการใช้พลังงานในระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำประปานั้น สามารถแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบจ่ายน้ำประปาโดยการศึกษาการสมดุลพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบสามประการ 1) พลังงานจากการสูบ-ส่งน้ำประปาที่จ่ายให้กับระบบ 2) พลังงานออกจากระบบผ่านทาง การสูญเสียจากการรั่วซึมของท่อส่งน้ำประปา และ 3) พลังงานที่สูญเสียไปจากแรงเสียดทานในท่อจ่ายน้ำประปา ซึ่งสิ่งสำคัญที่สุดคือประสิทธิภาพการใช้พลังงานของแต่ละองค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อวางแผนจัดการ และเลือกวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงท่อจ่ายน้ำประปา เช่น การลดการสูญเสียของน้ำประปาในระบบท่อส่งและท่อจ่าย หรือการปรับปรุงความสามารถในการสูบ-ส่งน้ำประปาโดยการเพิ่มขนาดท่อส่งน้ำประปาให้ใหญ่ขึ้น [5] โดยผลลัพธ์

ของการสมมูลพลังงาน จะสามารถสรุปสิ่งที่วิเคราะห์ได้ว่าควรดำเนินการซ่อมแซมรอยรั่ว หรือ เปลี่ยนขนาดท่อสูบ-ส่งน้ำประปา ก่อนหรือหลัง

การใช้พลังงานในการจัดการทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อมให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการการใช้น้ำ การควบคุมอัตราการไหลและแรงดันน้ำในท่อจ่ายน้ำ และการใช้พลังงานให้เหมาะสมในการสูบ-ส่งน้ำให้กับความต้องการการใช้น้ำ โดยในงานวิจัยของ Ramos et al [6] ได้พัฒนากรอบแนวความคิดและวิธีการดำเนินการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจ่ายน้ำ ประกอบไปด้วยสามวิธีการหลัก ๆ ดังนี้ 1) การใช้ระบบควบคุมแรงดันในท่อส่งน้ำที่มีระบบแรงดันสูงเกินความจำเป็นเพื่อลดแรงดันน้ำในเส้นท่อ 2) บริหารการจ่ายน้ำให้เหมาะสมกับช่วงเวลาการใช้น้ำและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และ 3) ใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่นเพื่อทดแทนพลังงานที่ใช้จากไฟฟ้า เป็นหลักที่จ่ายไฟฟ้าให้กับสถานีสูบน้ำ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังพบว่า การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์สมมูลพลังงานและประสิทธิภาพการจ่ายน้ำเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมและให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ งานวิจัยของ Aly et al [7] ได้พัฒนาแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม EPANET วิเคราะห์และเปรียบเทียบในแต่ละ WDN (Water Distribution Network) เดิมที่มีอยู่กับการสร้างแบบจำลอง WDN รูปแบบใหม่ 2 กรณี เพื่อใช้เปรียบเทียบการจ่ายน้ำของ WDN ว่ารูปแบบใดมีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานได้สูงสุดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการลด CO₂ ได้ในอนาคต โดยในการออกแบบ WDN ใหม่ได้คำนวณหาค่าการลงทุนตลอดทั้งวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost) และการปลดปล่อย CO₂ ตลอดทั้งวัฏจักรชีวิต (Life Cycle CO₂ Emissions) เพื่อใช้ในการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับลงทุนและการปลดปล่อย CO₂

สำหรับการศึกษาการเชื่อมโยงพลังงานและน้ำในเขตเมืองขนาดใหญ่ที่มีความต้องการการใช้น้ำเป็นปริมาณมาก ทำให้รูปแบบจ่ายน้ำนั้นมีโครงข่ายเป็นจำนวนมาก มีความซับซ้อนของโครงข่ายและทำให้เกิดน้ำสูญเสียระหว่างโครงข่ายการจ่ายน้ำได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องบริหารจัดการการจ่ายน้ำในเมืองและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยเมืองมิลาน ประเทศอิตาลี ได้ใช้วิธีการลดการใช้พลังงานในระบบจ่ายน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสูบน้ำให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำจ่าย โดยระบบจ่ายน้ำของเมืองมิลานเป็นระบบจ่ายน้ำประปาขนาดใหญ่ ประกอบไปด้วยสถานีสูบน้ำและส่งน้ำจำนวน 26 แห่ง จ่ายน้ำประปาเพื่อบริการประชากรถึง 1.3 ล้านคน และมีเครื่องสูบน้ำและส่งน้ำที่ทำงานเฉพาะในเวลากลางวัน 103 เครื่อง โดยการจ่ายน้ำประปาที่ผ่านมาของเมือง มิลานนั้นเป็นการจ่ายน้ำตลอดทั้งวัน โดยไม่ได้พิจารณาช่วงเวลาการจ่ายน้ำที่เหมาะสมกับความต้องการการใช้น้ำของประชากร ในการวิจัยได้ใช้แบบจำลอง EPANET ทำการวิเคราะห์เครือข่ายจ่ายน้ำ (WDN) ให้มีความสมบูรณ์ โดยได้ทำการวางแผนกำหนดเวลาจ่ายน้ำและหยุดจ่ายน้ำของเครื่องสูบน้ำบางเครื่อง เพื่อลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำลดลง

และเพื่อควบคุมแรงดันน้ำในเส้นท่อให้เหมาะสม เพื่อให้จ่ายน้ำได้เพียงพอต่อความต้องการของประชาชน [8]

ในงานวิจัยของ Engström et al [9] ได้นำกรอบแนวคิดการเชื่อมโยงพลังงานและน้ำมาใช้ในการวิจัยในมหานครนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อทำการประเมินความต้องการการใช้พลังงานและน้ำในภาคที่อยู่อาศัยครอบคลุมตั้งแต่สุขภัณฑ์ห้องน้ำแบบประหยัดน้ำรวมถึงการติดตั้งหลังคาเขียว (Green Roof) ให้เพิ่มมากขึ้น โดยทำการศึกษาการลดปริมาณการจ่ายน้ำจากการใช้สุขภัณฑ์ประหยัดน้ำและศึกษาการลดใช้พลังงานไฟฟ้าโดยการติดตั้ง Green Roof เพิ่มขึ้นเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร จากนั้นนำพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงมาคำนวณหาค่าการปลดปล่อย CO₂ และสร้างผังความสัมพันธ์การเข้า-ออกของน้ำและพลังงาน โดยผลลัพธ์สามารถลดการใช้พลังงานและช่วยลด CO₂ ได้เป็นอย่างมาก รวมถึงลดการปลดปล่อยมลพิษอื่น ๆ ได้อีกด้วย ในทำนองเดียวกันการนำเสนอมาตรการใหม่ ๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะสามารถลดปริมาณการใช้น้ำในมหานครนิวยอร์กได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามมาตรการต่าง ๆ ที่ทำให้การใช้พลังงานนั้นลดลงไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นการลดการใช้น้ำให้ได้มากที่สุด การกำหนดมาตรการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรผ่านการตัดสินใจแบบบูรณาการนั้นเป็นส่วนสำคัญในการเชื่อมโยงพลังงานต่าง ๆ ให้สัมพันธ์กันซึ่งทำให้เกิดประสิทธิภาพได้สูงสุดเช่นกัน

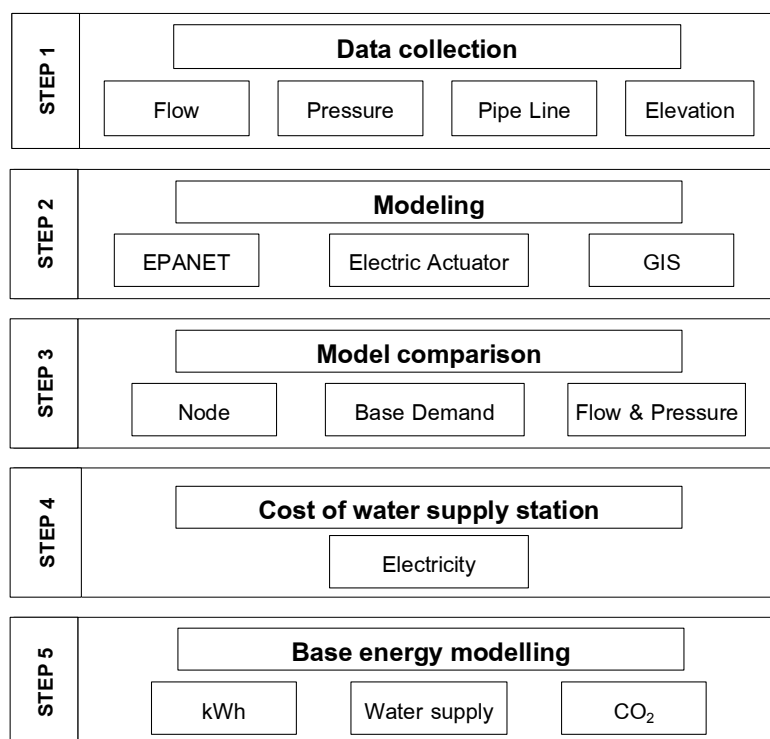
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การจัดการการจ่ายน้ำประปาให้เหมาะสมกับความต้องการใช้น้ำ และการลดการใช้พลังงานของการสูบและส่งน้ำในระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการจัดการพลังงานและน้ำในเขตเมือง โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคและแนวคิดในการลดการใช้พลังงานในระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำมาใช้ในการออกแบบ WDN โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง EPANET ถูกคิดค้นโดย Lewis ในปี 2000 [10] ซึ่งมีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้าน Hydraulic และ Water Quality กับโครงข่ายเส้นท่อภายใต้แรงดัน โครงข่ายประกอบด้วย ท่อ Node เครื่องสูบน้ำ วาล์ว และถังเก็บน้ำ หรืออ่างเก็บน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่านั้นแบบจำลอง EPANET สามารถหาอัตราการไหลในแต่ละเส้นท่อแรงดันในแต่ละจุด ตลอดจนได้รับการออกแบบให้เป็นเครื่องมือวิจัยสำหรับการเพิ่มองค์ความรู้ในการเคลื่อนที่ของน้ำ และจุดสิ้นสุดของน้ำในระบบจ่ายน้ำ ตัวอย่างเช่น ออกแบบโปรแกรมสุ่มตัวอย่าง เปรียบเทียบแบบจำลอง Hydraulic วิเคราะห์ Residual Chlorine เป็นต้น

ในการวิเคราะห์ระบบจ่ายน้ำในพื้นที่กรณีศึกษา (พัทยา) เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในระดับประเทศและระดับนานาชาติ โดยทำการจำลองผ่าน EPANET เพื่อทำการวิเคราะห์หาความสามารถในการจ่ายน้ำให้กับเขตเมืองกรณีศึกษา โดยใช้วาล์วควบคุมไฟฟ้าปรับปริมาณการไหลของน้ำในแต่ละ WDN ให้เพียงพอต่อความต้องการการใช้น้ำขั้นต่ำสุดทำการคำนวณหาปริมาณน้ำจ่ายที่ลดลงซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตและการสูบและส่งน้ำประปา รวมถึงการคำนวณค่าการปลดปล่อย CO₂ ที่เกิดขึ้น

3. วิธีการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการทำวิจัย

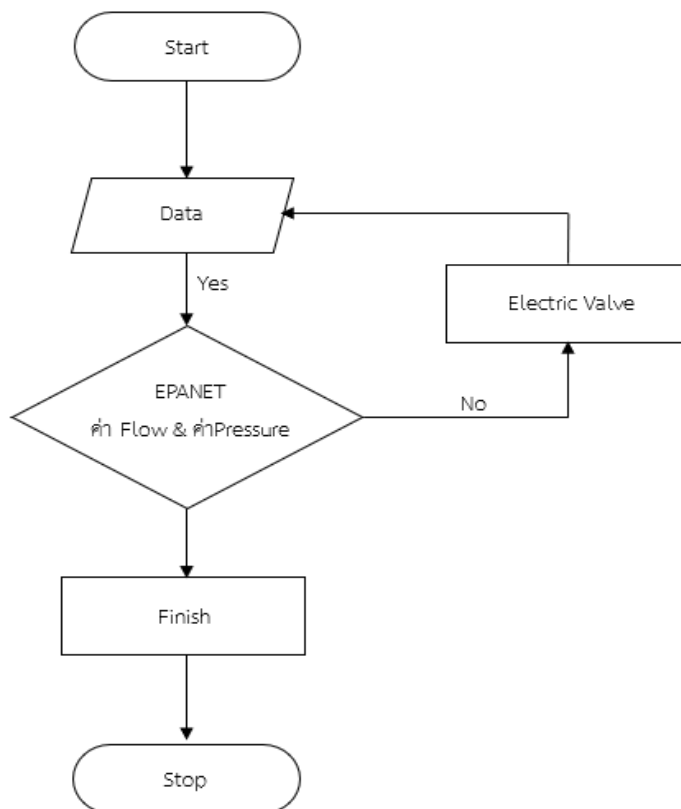
การวิจัยนี้สามารถแยกขั้นตอนการทำวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอนด้วยกัน (ดังแสดงในรูปที่ 1) คือ ขั้นตอนที่ 1 ทำการเก็บข้อมูล ความยาวท่อประปา ระดับความสูงในพื้นที่จ่ายน้ำ ความต้องการใช้น้ำ และแรงดันในเส้นท่อจ่ายน้ำไม่ให้สูงเกินความสามารถรับแรงดันของคุณสมบัติท่อจ่ายน้ำและไม่ให้ต่ำกว่าค่าแรงดันต่ำสุดของการประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) ในพื้นที่วิจัย ขั้นตอนที่ 2 แยก WDN 5 สถานีจ่ายน้ำออกจากกัน ทำการปรับวาล์วควบคุมไฟฟ้าทุกสถานีจ่ายน้ำ เริ่มต้นจาก 100% ลดลงถึงจุดที่แรงดันต่ำสุดที่ กปภ. ยอมรับและคำนวณปริมาณต่ำสุดของการปรับวาล์ว โดยใช้แบบจำลอง EPANET เป็นเครื่องมือวิเคราะห์แรงดันในเส้นท่อประปา ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาปริมาณจ่ายน้ำประปาจากน้ำประปาที่ไหลผ่านวาล์วที่ปรับลดของแต่ละสถานีจ่ายน้ำ 5 สถานี โดยแยกตรวจสอบปริมาณจ่ายน้ำประปาของแต่ละสถานีออกจากกัน ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่าไฟฟ้าที่ลดลงจากต้นทุนการผลิตน้ำประปา (ค่าไฟฟ้าต่อลูกบาศก์เมตร) และนำมาเปรียบเทียบกับน้ำประปาที่ผลิตก่อนมีขั้นตอนปรับลดปริมาณจ่ายน้ำประปา และขั้นตอนที่ 5 นำปริมาณไฟฟ้าที่ลดลงจากการผลิตน้ำประปามาคำนวณหาปริมาณการปลดปล่อย CO₂ ที่ลดลง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.2 การจำลองระบบจ่ายน้ำประปา

ในการจำลองระบบจ่ายน้ำประปาเริ่มต้นจากใส่ข้อมูลทางด้านปริมาณการจ่ายน้ำประปา ความยาวท่อ ขนาดท่อ ระดับความสูงต่ำของพื้นที่จ่ายน้ำประปา แยก WDN จากแผนที่ GIS เริ่มทำการปรับวาล์วจ่ายน้ำประปาที่สถานีจ่ายน้ำแยกแต่ละสถานี ลดปริมาณการจ่ายน้ำประปาโดยใช้ EPANET ทำการวิเคราะห์เพื่อหาแรงดันในเส้นท่อจุดใดจุดหนึ่งต่ำสุดที่ กปภ. ยอมรับและทำการหาปริมาณการจ่ายน้ำประปาที่ลดลง รูปที่ 2 แสดงการจำลองระบบจ่ายน้ำประปาในการศึกษานี้



รูปที่ 2 การจำลองระบบประปาใน EPANET

EPANET เป็นซอฟต์แวร์ที่จำลองพฤติกรรมของเครือข่ายท่อน้ำภายใต้แรงกดดันระหว่างการขยายตัว เครือข่ายประกอบด้วยท่อนอด (Node) หรือท่อสองท่อขึ้นไปมาบรรจบกัน เครื่องสูบน้ำ วาล์ว และถังเก็บน้ำหรืออ่างเก็บน้ำ อัตราการไหลของท่อแต่ละท่อสามารถกำหนดได้ผ่าน EPANET นอกจากนี้ยังสามารถวัดแรงดันน้ำและระดับน้ำในถังแต่ละ Node โดย EPANET มีความสามารถในการใช้งานการวิเคราะห์ที่หลากหลาย เช่น ระบบการจ่ายน้ำ EPANET สามารถช่วยในการวิเคราะห์ทางเลือกต่างๆ สำหรับกลยุทธ์การจัดการคุณภาพน้ำเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วทั้งระบบ รวมถึง

การเปลี่ยนแหล่งน้ำ การปรับเปลี่ยนตารางเวลาของเครื่องสูบน้ำ การเติมน้ำในถัง และการกำหนดท่อที่ต้องทำความสะอาด เป็นต้น EPANET จัดเตรียมสภาพแวดล้อมสำหรับการปรับเปลี่ยนอินพุตของเครือข่าย ดำเนินการจำลองคุณภาพน้ำในระบบไฮดรอลิก และแสดงข้อมูลในรูปแบบต่างๆ รวมถึงแผนที่ เครือข่ายมีรหัสสีและมาพร้อมกับตารางข้อมูลและแผนภูมิอนุกรมเวลา [11]

3.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

สมการทางกลศาสตร์ของการไหลในท่อเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน คือ สมดุลของมวล พลังงาน และสมมูลโมเมนตัม การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางท่อแสดงในสมการ (1)

$$Q = AV \quad (1)$$

โดยที่ Q = Quantitative flow rate (m^3/s)

A = Cross-sectional area of the flow (m^2)

V = Average velocity of flow (m/s)

สมการการสูญเสียหลักที่เกิดจากแรงเสียดทานในเส้นท่อนำคำนวณโดยใช้สูตรของ Hazen-Williams แสดงได้ในสมการ (2)

$$h_f = \frac{10.66Q^{1.85}}{C^{1.85}D^{4.87}} \times L \quad (2)$$

โดยที่ h_f = Friction loss (m)

L = Length of pipe (m)

Q = Quantitative flow rate (m^3/s)

C = Quantitative flow rate (m^3/s)

D = Inside diameter (m)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (C) ของสูตร Hazen-Williams สำหรับท่อประเภทต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสำหรับท่อประเภทต่าง ๆ

Pipe material	C
Welded steel pipe	140
Steel pipe (long service life)	100
New cast iron pipe	130
Cast iron pipe lasts	100
Cement	140
Asphalt paving	140
Asbestos cement pipe	130
Plastic pipe	150

การสูญเสียรอง (Secondary loss) คำนวณโดยใช้สูตรของ Hazen-Williams ดังแสดงในสมการที่ (3) การสูญเสียทั้งหมดที่น้ำไหลผ่านเส้นท่อ แสดงในสมการที่ (4)

$$h_m = \frac{kv^2}{2g} \quad (3)$$

โดยที่ h_m = Secondary loss (m)

k = Coefficient of loss

v = Flow velocity (m/s)

g = Acceleration due to gravity (m/s²)

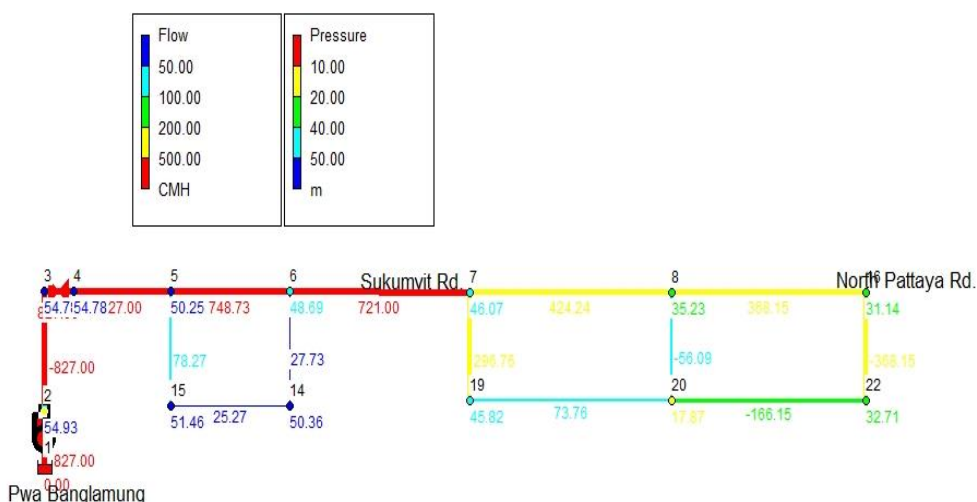
$$\text{Total head loss} = h_f + h_m \quad (4)$$

การคำนวณปริมาณการปลดปล่อย CO₂ ที่เกิดขึ้นจากการใช้ไฟฟ้า [12] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\text{GHG}_{(\text{CO}_2 \text{ eq})} = A \times EF \quad (5)$$

โดยที่ $\text{GHG}_{(\text{CO}_2 \text{ eq})}$ = ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อย (CO₂eq)

A = ข้อมูลกิจกรรมจากการใช้ไฟฟ้า (kWh)



รูปที่ 4 สถานีจ่ายน้ำบางละมุง

สถานีจ่ายน้ำบางละมุง (รูปที่ 4) เป็นสถานีจ่ายน้ำที่ใช้ระบบจ่ายน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำแรงดันสูง อัตราการจ่ายน้ำเส้นสีแดง Node 5 แรงดัน 50.25 m อัตราการไหล 748.73 m³/hour ผ่าน Node 6 ที่แรงดัน 46.07 m จ่ายผ่านถึง Node 7 ด้วยอัตราการจ่ายน้ำ 721m³/hour ที่แรงดัน 70.39 m สถานีจ่ายน้ำนี้ ครอบคลุมพื้นที่ชุมชนบ้านบางละมุง ชุมชนนาเกลือ และบริเวณชายหาดพัทยาเหนือ พื้นที่ที่รับน้ำจากสถานีจ่ายน้ำบางละมุงนั้นส่วนใหญ่นั้นเป็นพื้นที่ติดชายหาดทำให้มีโรงแรมและคอนโดมิเนียมเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเพื่อรองรับนักท่องเที่ยวที่เข้ามาพักอาศัย ส่งผลให้มีอัตราความต้องการการใช้น้ำสูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีอัตราการน้ำจ่ายเข้าพื้นที่ 800 m³/hour จำนวนผู้ใช้น้ำที่รับผิดชอบในพื้นที่จำนวน 8.500 ราย

จากการศึกษาการจ่ายน้ำพื้นที่จ่ายน้ำเมืองพัทยาทั้ง 5 สถานี ซึ่งมีผู้ใช้น้ำรวมเป็นจำนวน 43,700 ราย มีปริมาณการจ่ายน้ำ 3,850 m³/hour จากข้อมูลพบว่าจำนวนผู้ใช้น้ำไม่สัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับปริมาณการจ่ายน้ำ เช่น สถานีจ่ายน้ำมาบประชัน อัตราน้ำจ่ายเข้าพื้นที่ 600 m³/hour มีจำนวนผู้ใช้น้ำจำนวน 15,000 ราย เปรียบเทียบกับ สถานีจ่ายน้ำบางละมุง อัตราน้ำจ่ายเข้าพื้นที่ 800 m³/hour จำนวนผู้ใช้น้ำจำนวน 8,500 ราย เนื่องจากสถานีจ่ายน้ำบางละมุงจ่ายน้ำให้ผู้ใช้รายใหญ่เช่นโรงแรมและคอนโดมิเนียม

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาระบบการจ่ายน้ำทั้ง 5 สถานี ก่อนทำการติดตั้งวาล์วควบคุมการจ่ายน้ำเปรียบเทียบกับหลังการติดตั้งวาล์วควบคุมการจ่ายน้ำ พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลในเครือข่ายการจ่ายน้ำประปาและแรงดันแสดงไว้ในตารางที่ 2 รวมถึงปริมาณการปลดปล่อย CO₂

ในสถานีจ่ายน้ำประปาแต่ละแห่ง เนื่องจากแรงดันที่ปลายท่อต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันมาตรฐานที่ กปภ. กำหนดไว้ (แรงดันน้ำต่ำสุดคือ 5 m และแรงดันน้ำสูงสุดคือ 65 m) หลักการและเงื่อนไขปรับ วาล์วควบคุมใช้วิธีเปิดวาล์ว 100% และปิดวาล์วตามระบบควบคุมวาล์วที่กำหนด โดยผู้ผลิตวาล์ว กำหนดปริมาณน้ำไหลผ่านวาล์ว มีความสัมพันธ์ระหว่างการปิดบานวาล์วและ %น้ำไหลผ่านวาล์ว และใช้ข้อกำหนดแรงดัน (แรงดันน้ำต่ำสุดคือ 5 m และแรงดันน้ำสูงสุดคือ 65 m) เพื่อควบคุม แรงดันน้ำทุก Node ของแต่ละสถานีจ่ายน้ำ ด้วยข้อกำหนดดังกล่าวการจำลองโดยใช้ EPANET ทำให้สามารถระบุพื้นที่จุดเชื่อมต่อแต่ละจุดและเปรียบเทียบแรงดันและอัตราการไหลของแต่ละ จุดเชื่อมต่ออื่น ๆ ได้ สามารถช่วยให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมีข้อมูลช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้รูปแบบ ที่เหมาะสมต่อปริมาณความต้องการการใช้น้ำของแต่ละพื้นที่ได้

ตารางที่ 2 สรุปการจ่ายน้ำของ 5 สถานี

	Model	Flow in (m ³ /hr)	Pressure (m)	Water (m ³ /day)	Electricity (kWh/day)	Open valve (%)	CO ₂ emissions (kgCO ₂ eq/day)
มาบประชัน							
Existing system	Q800H30	800	30	19,200	2,143	100	1,247
FCV Q560	Q560H30	560	30	13,440	1,500	70	873
บางละมุง							
Existing system	Q1300H45	1300	45	31,200	3,482	100	2,027
FCV Q830	Q830H45	830	45	19,920	2,223	64	1,294
ชากนอก							
Existing system	Q500H45	500	45	12,000	1,339	100	779
FCV Q250	Q250H45	250	45	6,000	670	50	390
นาจอมเทียน							
Existing system	Q1100H20	1100	20	26,400	2,946	100	1,715
FCV Q1020	Q1020H45	1020	20	24,480	2,732	93	1,590
ชัยพรวิถิ							
Existing system	Q1100H40	1100	40	26,400	2,946	100	1,715
FCV Q610	Q610H40	610	40	14,640	1,634	56	951

หมายเหตุ: ค่าพลังงานไฟฟ้าข้อมูลจากการคำนวณการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยน้ำ 1 m³ ของการประปาส่วนภูมิภาค

โดยจากผลการศึกษาพบว่า ก่อนการปรับวาล์วการจ่ายน้ำเข้าพื้นที่สถานีมาบประชัน สถานีบางละมุง สถานีชากนอก สถานีนาจอมเทียน และสถานีชัยพรวิทย์ มีการจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ที่มีปริมาณการใช้น้ำเท่ากับ 19,200 m³/day 31,200 m³/day 12,000 m³/day 26,400 m³/day และ 26,400 m³/day ตามลำดับ จากนั้นเมื่อทำการปรับวาล์วการจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ให้เหมาะสมกับความต้องการการใช้น้ำพบว่า มีปริมาณน้ำที่เข้าพื้นที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีปริมาณ 13,440 m³/day 19,920 m³/day 6,000 m³/day 24,480 m³/day และ 14,640 m³/day ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณการจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ลดลงอย่างชัดเจนถึง 30-40% จากระบบจ่ายน้ำแบบเดิม ยกเว้นสถานีจ่ายน้ำนาจอมเทียนเพราะบริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ราบติดชายทะเล และมีระดับความสูงที่สูงกว่าพื้นที่รับน้ำทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบน้ำและส่งน้ำแรงดันสูง ซึ่งเมื่อมีการปรับวาล์วการจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ก่อนและหลังจากรับน้ำปลายสายที่ไกลที่สุดจึงไม่มีผลต่อแรงดันขั้นต่ำในการใช้งาน

นอกจากนั้นแล้วผลการศึกษาาระหว่างระบบเดิม (Existing System) กับระบบที่ปรับวาล์วจ่ายน้ำยังพบว่า (1) สถานีมาบประชันมีปริมาณน้ำประปาลดลง 5,760 m³/day การปลดปล่อย CO₂ ลดลง 374 kgCO₂eq (2) สถานีบางละมุงมีปริมาณน้ำประปาลดลงจาก 31,200 m³/day เหลือ 19,920 m³/day ในขณะที่การปลดปล่อย CO₂ ลดลงจาก 2,027 kgCO₂eq เหลือ 1,294 kgCO₂eq (3) น้ำประปาของสถานีชากนอกลดลง 6,000 m³/day ในขณะที่การปลดปล่อย CO₂ ลดลง 389 kg CO₂eq (4) น้ำประปาของสถานีนาจอมเทียนลดลงจาก 26,400 m³/day เหลือ 24,480 m³/day ขณะที่การปลดปล่อย CO₂ ลดลงจาก 1,715 kgCO₂eq เหลือ 1,590 kgCO₂eq และ (5) การประปาของสถานีชัยพรวิทย์ลดลง 11,760 m³/day ในขณะที่การปลดปล่อย CO₂ ลดลง 764 kgCO₂eq จากการวิเคราะห์รวมทั้ง 5 สถานีพบว่าช่วยลดปริมาณการจ่ายน้ำ 36,720 m³/day ส่งผลให้ลดการใช้ไฟฟ้า 4,097 kWh/day และลดการปลดปล่อย CO₂ จำนวน 2,385 kgCO₂eq/day และยังเชื่อมโยงถึงการใช้น้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปาลดลงไม่น้อยกว่า 13,402,800 m³/year

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาวិเคราะห์การเชื่อมโยงพลังงานและน้ำโดยวิธีการควบคุมระบบจ่ายน้ำประปา โดยวิธีการปรับวาล์วจ่ายน้ำนั้นส่งผลต่อการลดปริมาณการผลิตน้ำประปา และลดการใช้น้ำดิบจากแหล่งกักเก็บน้ำบนผิวดินในเขตพื้นที่เมืองพัทยา อีกทั้งยังทำให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการปลดปล่อย CO₂ ที่ลดลง และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้นต่อการใช้น้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาลดลง จากการศึกษาพบว่าหากสามารถควบคุมการจ่ายน้ำจากโครงข่ายระบบจ่ายน้ำของเมืองพัทยาได้โดยการปรับวาล์วควบคุมการจ่ายน้ำของทั้ง 5 สถานีในแบบจำลองทำให้สามารถลดปริมาณจ่ายน้ำประปาทำให้ปริมาณการผลิตน้ำประปาลดลง จากเดิมผลิตเพื่อจ่ายน้ำรวม 5 สถานีจำนวน 115,200 m³/day คงเหลือการผลิต

78,480 m³/day ปริมาณการใช้ไฟฟ้าอยู่ที่ 12,856 kWh/day และการปลดปล่อย CO₂ ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอยู่ที่ 7,483 kg CO₂eq/day ผลการวิจัยพบว่าการปรับวาล์วที่แต่ละสถานีจาก 5 สถานี จะควบคุมอัตราการไหลตามความต้องการน้ำประปาส่งผลให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อวันอยู่ที่ 8,759 kWh/day และการปลดปล่อย CO₂ ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอยู่ที่ 5,098 kgCO₂eq/day จากการศึกษาทำให้สามารถเลือกมาตรการด้านพลังงานในระบบจ่ายน้ำประปาทั้ง 5 สถานีในเขตพื้นที่เมืองพัทยาและสามารถใช้เป็นต้นแบบของความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ ในการบริหารจัดการพลังงานในระบบจ่ายน้ำประปาใช้วิธีควบคุมระบบจ่ายน้ำประปาด้วยการปรับวาล์วจ่ายน้ำ โดยควบคุมแรงดันน้ำประปาในแต่ละ Node โดยใช้ค่าเกณฑ์มาตรฐานการประปาในการควบคุม (แรงดันน้ำต่ำสุดคือ 5 m และแรงดันน้ำสูงสุดคือ 65 m) ค่าแรงดันต่ำสุดสามารถจ่ายน้ำได้สูงจากระดับท่อจ่ายไม่เกิน 5 เมตร และดันสูงสุดไม่เกิน 65 เมตรจากระดับท่อจ่ายน้ำกำหนดจากผนังท่อรับแรงดันได้สูงสุด ส่งผลต่อการลดปริมาณการจ่ายน้ำประปาและส่งผลต่อการลดปริมาณการผลิตน้ำประปา อีกทั้งยังเป็นแนวทางให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหรือหน่วยงานท้องถิ่นนำหลักการวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลอง WDN ในระบบจ่ายน้ำประปานำไปใช้เป็นประโยชน์ต่อนโยบายทางด้านพลังงานได้ในอนาคต เพื่อเปลี่ยนผ่านสังคมไปสู่สังคมคาร์บอนต่ำและมีความยั่งยืนในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดความยั่งยืนในเมืองท่องเที่ยวขนาดใหญ่ตามไปด้วย

References

- [1] Cao T, Wang S, Chen B. The energy-water nexus in interregional economic trade from both consumption and production perspectives. Energy Procedia 2018;152:281-6.
- [2] Jin P, Fang D, Chen B. Water-energy nexus based on modified multiregional input-output model within China. Energy Procedia 2019;158:4092-8.
- [3] Xu W, Xie Y, Cai Y, Ji L, Wang B, Yang Z. Environmentally-extended input-output and ecological network analysis for Energy-Water-CO₂ metabolic system in China. Science of the Total Environment 2021;758:143931.
- [4] Ramos HM, Vieira F, Covas DI. Energy efficiency in a water supply system: Energy consumption and CO₂ emission. Water Science Engineering 2010;3(3):331-40.
- [5] Phetsasithorn A, editors. Software development for energy assessments in water networks. Proceedings of the 26th National Convention on Civil Engineering; 2021 Jun 23-25; Phitsanulok, Thailand. Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang; 2021.

- [6] Ramos HM, Morillo JG, Rodríguez Diaz JA, Carravetta A, McNabola A. Sustainable water-energy nexus towards developing countries' water sector efficiency. *Energies* 2021;14(12):3525.
- [7] Aly SM, Awad ME, Mousa MA. Design of flexible and sustainable water networks. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)* 2021;12(13): 6499-506.
- [8] Castro-Gama M, Pan Q, Lanfranchi EA, Jonoski A, Solomatine DP. Pump scheduling for a Large Water Distribution Network. Milan, Italy. *Procedia Engineering* 2017;186:436-43.
- [9] Engström RE, Howells M, Destouni G, Bhatt V, Bazilian M, Rogner HH. Connecting the resource nexus to basic urban service provision – with a focus on water-energy interactions in New York City. *Sustainable Cities and Society* 2017;31:83-94.
- [10] EPANET. EPANET 2.2 User's Manuals [Internet]. 2020 [cited 2020 Aug 12]. Available from: <https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/>.
- [11] Abdy Sayyed MAH, Gupta R, Tanyimboh TT. Modelling pressure deficient water distribution networks in EPANET. *Procedia Engineering* 2014;89:626-31.
- [12] Thailand Greenhouse Gas Management Organization. Calculation for emission factor of electricity generation and electricity consumption [Internet]. 2017 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/tver-method/tver-tool/energy/item/483-calculation-for-emission-factor-of-electricity-generation-and-electricity-consumption.html>. (In Thai)
- [13] Report of PCY [Internet]. Translation of Pattaya City yearly report 2019. 2019 [cited 2020 Jan 22]; [138 about screen]. Available from: <https://tinyurl.com/8bhk2cea>

ประวัติผู้เขียนบทความ



สุรศักดิ์ จันทรฉาย นักศึกษาระดับปริญญาเอก วิทยาลัยนวัตกรรมเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ สาขาการจัดการด้านวิศวกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ ที่อยู่ 110/1-4 ถนนประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

E-mail: surasak_69@yahoo.com

งานวิจัยที่สนใจ: การวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองระบบพลังงาน การปลดปล่อยคาร์บอน และเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์ ผู้อำนวยการหลักสูตรปริญญา
ดุุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมการ
เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4
ถนนประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

E-mail: vorarat@dpu.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต และการบำรุงรักษา
ทางวิศวกรรม



รองศาสตราจารย์ ดร. อำนาจ ผดุงศิลป์ อาจารย์ประจำหลักสูตร
เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อยู่ 126 ถนนประชาอุทิศ
แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

E-mail: aumnad.phdu@kmutt.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: การวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองระบบพลังงาน
ประสิทธิภาพของสภาพอากาศภายในอาคาร และการปลดปล่อยคาร์บอน

Article History:

Received: March 29, 2023

Revised: July 30, 2023

Accepted: August 9, 2023

แนวทางการออกแบบพื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลา DESIGN GUIDELINES PUBLIC SPACE IN SONGKHLA MUNICIPALITY

ณัฐนีภรณ์ น้อยเสียงม¹ และ ชลัท ทิพาการเกียรติ²

¹อาจารย์, สาขาวิชาสถาปัตยกรรมและผังเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2/6 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, nattaneeporn.n@rmutsv.ac.th

²อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, chalat.t@rmutsv.ac.th

Nattaneeporn Noisangiam ¹ and Chalat Tipakornkiat²

¹Lecturer, Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Architecture, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2/6 Ratchadamnoennok Rd., Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand, nattaneeporn.n@rmutsv.ac.th

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2/4 Ratchadamnoennok Rd., Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand, chalat.t@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวคิดการออกแบบพื้นที่สาธารณะ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาพื้นที่ว่างสาธารณะให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อประชาชนในเทศบาลนครสงขลา ดำเนินการวิจัยด้วยการสำรวจกายภาพร่วมกับแผนที่ Google Earth ทำการสอบถามผู้ใช้พื้นที่สาธารณะแบบบังเอิญ (Accidental Sampling) จำนวน 240 คน เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พื้นที่สาธารณะของผู้ใช้ทุกช่วงอายุ ด้านการระบุความเหมาะสมของพื้นที่ใช้แบบสอบถามให้ค่าระดับความพึงพอใจตามมาตรวัดของลิเคิร์ท ผลการศึกษาพบว่า สถานการณ์การแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-2019 ทำให้มีการกระจายพื้นที่กิจกรรม โดยพื้นที่สะพานดาวมีศักยภาพที่จะนำมาพัฒนาและปรับปรุง แนวคิดการออกแบบที่เหมาะสมคำนึงถึงการเว้นระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) รูปแบบกิจกรรมที่เหมาะสมสำหรับผู้คนทุกวัย และความกลมกลืนกับสภาพแวดล้อมธรรมชาติเดิม ประเด็นสำคัญของข้อค้นพบในการวิจัย คือ ควรนำกระบวนการมีส่วนร่วมเป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนร่วมกันระหว่างผู้วิจัย ภาครัฐ และภาคีเครือข่ายภาคประชาชนในทุกขั้นตอนผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามความต้องการของประชาชน

คำสำคัญ: พื้นที่กิจกรรมสาธารณะ, แนวทางการออกแบบ, สงขลา

ABSTRACT

The aim of the research was to present the concept of public space design guidelines for the development of public spaces for the benefit of the people in Songkhla Municipality. The research method was to conduct research through physical surveys together with Google Earth Mapping to questionnaires 240 public space users by accident (Accidental Sampling) to analyze the public space usage behavior of users of all ages. In terms of determining the suitability of the area, the questionnaire was used to give the level of satisfaction according to the Likert scale. The study found that the situation of the epidemic situation of COVID-2019 virus causes the distribution of activity areas. The Saphan Dao area has the potential to be developed and improved. Proper design concepts consider physical distancing, and appropriate activity patterns for people of all ages. The harmony with the original natural environment. The key point of findings in research is that the participatory process should be used as the main mechanism for joint driving among researchers. Government network partners and the people's sector network in every step, the results will create the greatest benefit according to the needs of the people.

KEYWORDS: Public Space, Design Guidelines, Songkhla

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงของสังคมโลกทางด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี ตลอดจนการสื่อสารที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้อย่างง่ายดายขึ้น เป็นปัจจัยสำคัญที่เข้ามาแทนที่การพบปะและทำกิจกรรมร่วมกันในพื้นที่กิจกรรมสาธารณะเมืองโดยตรง มีผลทำให้บทบาทด้านความสัมพันธ์ระหว่างผู้คนในสังคมลดลง ประกอบกับในช่วงที่ผ่านมาสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-2019 ได้ส่งผลกระทบกับการดำเนินชีวิตประจำวันและความเป็นอยู่ของชุมชน โดยพื้นที่การแพร่ระบาดส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นในบริเวณที่ประชากรมีความหนาแน่นสูง ดังนั้น ในการรับมือกับการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-2019 อย่างมีประสิทธิภาพหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้กำหนดเงื่อนไขและมาตรการทางสาธารณสุขมาเป็นกลไกในการบริหารจัดการพื้นที่สาธารณะและรูปแบบการดำเนินกิจกรรมที่มีความจำเป็นต้องมีการเว้นระยะห่างทางกายภาพ (Physical distancing) เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์การแพร่ระบาดที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ จากมาตรการทางสาธารณสุขและสถานการณ์

การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-2019 มีความจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ที่เพียงพอให้ประชาชนสามารถรักษาระยะห่างทางกายภาพในพื้นที่ขณะดำเนินกิจกรรม

เทศบาลนครสงขลามีความโดดเด่นทางภูมิศาสตร์ที่ตั้งระหว่างทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย โดยร้อยละ 90 ของพื้นที่เมืองตามแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ ทางด้านตะวันตก มีการใช้ประโยชน์ที่ดินสำหรับรองรับสิ่งก่อสร้างและการตั้งชุมชน ขณะที่ร้อยละ 10 ของพื้นที่เมืองตามแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ ทางด้านตะวันออกเป็นพื้นที่ดินประเภทที่โล่งและพื้นที่สาธารณะสีเขียวเพื่อนันทนาการและรักษาสภาพแวดล้อมของเมือง [1] จากมาตรการทางสาธารณสุขและการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-2019 การพัฒนาพื้นที่สาธารณะจึงเป็นการเตรียมความพร้อมในการรับมือกับสถานการณ์การแพร่ระบาดที่เกิดขึ้น

ที่ผ่านมาประชาชนเทศบาลนครสงขลาใช้พื้นที่สาธารณะภายในสนามกีฬาติณสูลานนท์ซึ่งเป็นพื้นที่ปิดดำเนินกิจกรรมในชีวิตประจำวัน แต่จากการแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-2019 และมาตรการทางสาธารณสุขที่กำหนดให้มีการเว้นระยะห่างทางกายภาพของผู้คนระหว่างทำกิจกรรม มีผลให้เกิดปรากฏการณ์ประชาชนเคลื่อนย้ายพื้นที่ทำกิจกรรม จากสนามกีฬาติณสูลานนท์ขยายไปสู่พื้นที่สาธารณะที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นพื้นที่เปิดโล่งเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่เปิดโล่งในเทศบาลนครสงขลาล้วนแต่มีลักษณะเป็นพื้นที่เปิดโล่งตามธรรมชาติที่ยังไม่มีการปรับปรุงและพัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่จำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์การพัฒนาที่เหมาะสมและเพียงพอที่จะช่วยเสริมสร้างการดำเนินกิจกรรมได้อย่างถูกสุขลักษณะ และรองรับการใช้งานอย่างเต็มศักยภาพและเพียงพอต่อความต้องการของประชาชน ดังนั้น แนวทางการออกแบบพื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลา จึงเป็นการค้นหาศักยภาพของพื้นที่เปิดโล่งเพื่อนำไปสู่การหาแนวทางการวางผังและรูปแบบที่เหมาะสมตามความต้องการของประชาชน โดยการศึกษาได้นำ ข้อมูลสถิติและการระบุระดับความพึงพอใจของลิเคิร์ต (Likert scale) [2] จากแบบสอบถามผู้ใช้พื้นที่ จำนวน 240 คน และเป็นการค้นหารูปแบบกิจกรรมที่เหมาะสม ผลการออกแบบนำไปสู่รูปแบบการปรับปรุงพื้นที่และเกิดประโยชน์อย่างสูงสุดอย่างแท้จริง

จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้น ผู้วิจัยมุ่งเน้นทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลรูปแบบกิจกรรมเพื่อหาแนวทางการออกแบบพื้นที่สาธารณะที่มีความสอดคล้องกับสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-2019 ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อค้นหารูปแบบการพัฒนาพื้นที่สาธารณะที่เหมาะสม และนำไปออกแบบเป็นแนวทางการปรับปรุงพื้นที่กิจกรรมสาธารณะเทศบาลนครสงขลา

3. การทบทวนวรรณกรรม

พื้นที่สาธารณะมีความสำคัญในฐานะที่เป็นพื้นที่ทางธรรมชาติที่ก่อให้เกิดปฏิสัมพันธ์ของคนในสังคม ดังนั้น การออกแบบเพื่อพัฒนาพื้นที่จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อพัฒนาพื้นที่สำหรับรองรับกิจกรรมของประชาชนในสถานการณ์การแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-19 จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า แนวคิดที่เกี่ยวข้องในการออกแบบพัฒนาพื้นที่สาธารณะ ประกอบด้วย 1) พื้นที่กิจกรรมสาธารณะ 2) แนวคิดการเว้นระยะห่างทางสังคม และ 3) แผนและนโยบายการพัฒนาท้องถิ่น 4) แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

3.1 พื้นที่กิจกรรมสาธารณะ

พื้นที่กิจกรรมสาธารณะมีความสำคัญในฐานะเป็นพื้นที่รองรับกิจกรรมของกลุ่มคนในสังคมที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ตามการใช้งาน จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า แนวคิดสำคัญที่ใช้ในการอธิบายแนวทางการออกแบบพื้นที่สาธารณะ เช่น แนวคิดความสำคัญของพื้นที่สาธารณะที่ Jacobs [3] ได้อธิบายความสำคัญว่า เป็นพื้นที่ส่งเสริมให้เมืองมีความงดงามและมีชีวิตชีวาจากการใช้พื้นที่เมืองทำกิจกรรมที่หลากหลาย ทั้งนี้ ในปี พ.ศ. 2561 lamtrakul [4] กล่าวถึง ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่สาธารณะว่าไม่มีการจำกัดรูปแบบ เช่น ถนน ทางเดินเท้า สวนสาธารณะ สนามพื้นที่ใต้ทางด่วน ลานวัดหรือบริเวณใดก็ได้ ซึ่งจะต้องมีคุณลักษณะที่สำคัญทางกายภาพ และทางเศรษฐกิจ-สังคม โดยสอดคล้องกับ Sennett อ้างถึงใน Kongpunpin and lamtrakul [5] ที่ว่าพื้นที่สาธารณะควรเป็นพื้นที่ส่งเสริมให้เกิดมูลค่าทางเศรษฐกิจและช่วยส่งเสริมให้เกิดกิจกรรมทางสังคมในชุมชน โดยที่ในปี ค.ศ. 1989 Francis [6] ได้สะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สาธารณะและการจัดการพื้นที่ ซึ่งรูปแบบชีวิตที่เปลี่ยนไปย่อมมีผลต่อพัฒนาการของการออกแบบ และการจัดการพื้นที่สาธารณะ ดังนั้น การสร้างพื้นที่เปิดโล่งทางกายภาพที่ก่อให้เกิดความสัมพันธ์ กับลักษณะการใช้ที่เป็นสาธารณะ ย่อมเป็นการสร้างปฏิสัมพันธ์ที่ดีให้กับผู้คนในเมือง

ทั้งนี้ในปี ค.ศ. 2021 Project for Public Spaces [7] ได้ระบุเกณฑ์การออกแบบพัฒนาพื้นที่สาธารณะที่ดี ได้แก่ 1) การเข้าถึงและการเชื่อมต่อ (Access and Linkages) 2) สิ่งอำนวยความสะดวก (Comfort and Image) 3) การใช้ประโยชน์ และกิจกรรม (Uses and Activities) 4) ความคุ้นเคย (Sociability) โดยที่มีปัจจัยย่อย 8 ปัจจัย ในการนำมากำหนดเป็นตัวชี้วัดการเลือกพื้นที่ ประกอบด้วย 1) เข้าถึงสะดวก 2) มองเห็นกิจกรรมทั่วถึง 3) มีการเชื่อมต่อไปพื้นที่ภายนอก 4) ความปลอดภัย 5) สะดวกสบาย 6) การใช้ประโยชน์ 7) พื้นที่มีปฏิสัมพันธ์ทางสังคม และ 8) มีที่นั่งและร่มรื่น

นอกจากเกณฑ์การพัฒนาพื้นที่เป็นข้อคำนึงในการนำมาออกแบบจัดวางผังการแล้ว ประเด็นการจัดวางจังหวะของกิจกรรมที่มีการมองเห็นอย่างต่อเนื่อง เป็นจุดดึงดูดทำให้เกิดการรับรู้ด้วยการ

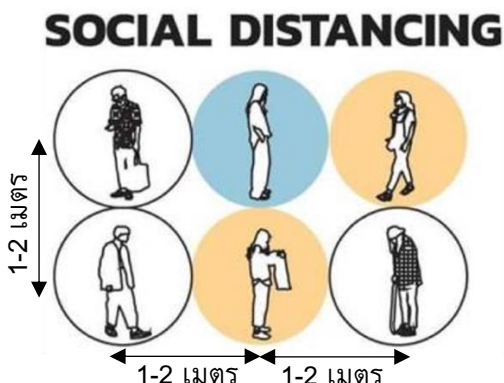
มองเห็นและนำไปสู่ความน่าสนใจในการเข้าใช้พื้นที่ทำกิจกรรม [8] การวิจัยนี้ได้้นำแนวคิดทั้งสองประเด็นมาเป็นแนวทางในการพิจารณาทางเลือกการออกแบบพื้นที่ให้สอดคล้องกับผู้ใช้งาน

ดังนั้น ในการพัฒนาพื้นที่สาธารณะไม่เพียงแต่เป็นการพัฒนาพื้นที่ทางกายภาพ หากแต่จะต้องคำนึงถึงการใช้อย่างไรที่เอื้อให้ผู้คนที่เข้ามาใช้พื้นที่สร้างปฏิสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการเข้ามาทำกิจกรรมในพื้นที่ต่อไป

3.2 แนวคิดการเว้นระยะห่างทางสังคม

สถานการณ์การแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-2019 ที่ได้แพร่กระจายได้ส่งผลกระทบไปทั่วโลกทั้งในภาคเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิตของประชาชนที่ทำให้มีการจ้างงานลดลง ทั้งนี้การปรับตัวเพื่อเตรียมความพร้อมต่อการดำรงอยู่ในวิถีชีวิตใหม่ (New Normal) [9] โดยโครงการตั้งถิ่นฐานมนุษย์แห่งสหประชาชาติ (UN-Habitat) ได้กำหนดมาตรการจัดสรรพื้นที่สาธารณะหรือพื้นที่เปิดโล่งเพื่อให้ประชาชนได้ใช้เป็นพื้นที่ดำเนินกิจกรรมเพื่อสุขภาพ เพื่อการพักผ่อน และดำเนินกิจกรรมอื่น ๆ ตามปกติในชีวิตประจำวันทีเพียงพอสำหรับประชาชนทุกคนภายใต้มาตรการการรักษาระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) [10] ซึ่งสอดคล้องกับการกำหนดมาตรการการเว้นระยะห่างทางสังคม (Social Distancing) ที่ปลอดภัยอย่างน้อย 1-2 เมตรของ WHO [11] (รูปที่ 1)

จากที่กล่าวข้างต้น ประเด็นการพัฒนาพื้นที่สาธารณะเป็นการเตรียมความพร้อมในการรับมือกับการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-2019 ทำให้สามารถนำมาปรับใช้กับสถานการณ์ปัจจุบันได้ ดังนั้น การออกแบบพื้นที่สาธารณะที่ดีและมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องคำนึงถึงการเตรียมรับมือกับสถานการณ์การแพร่ระบาดที่จะเกิดขึ้นใหม่ในอนาคตที่ส่งผ่านรูปแบบด้านกายภาพที่กลมกลืนกับสภาพแวดล้อมและรูปแบบการใช้งาน



รูปที่ 1 ระยะห่างทางสังคม (Social distancing) [12]

ประเด็นมาตรการรักษาระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) มีความสอดคล้องกับการกำหนดระยะห่างระหว่างบุคคล โดยระยะห่างที่เหมาะสมจะสัมพันธ์กับประเภทกิจกรรม [13] ดังนั้น การวิจัยนี้ได้นำแนวคิดการเว้นระยะห่างทางกายภาพมาเป็นข้อพิจารณาระยะห่างในการติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมแต่ละประเภท

3.3 แผนและนโยบายการพัฒนาท้องถิ่น

แผนและนโยบายเป็นเครื่องมือสำคัญในการกำหนดแนวทางปฏิบัติ พื้นที่ศึกษาอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของเทศบาลนครสงขลา จังหวัดสงขลา ได้มีการจัดทำแผนพัฒนาท้องถิ่นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาพื้นที่และสอดคล้องกับศักยภาพและแนวทางการพัฒนาประเทศในทุกระดับ และสามารถนำไปสู่การแก้ปัญหาและตอบสนองความต้องการของประชาชนในท้องถิ่นทุกมิติ การพัฒนาเชิงพื้นที่ [1]

ด้านแผนการพัฒนาท้องถิ่น เทศบาลนครสงขลาได้กำหนดนโยบายและแผนพัฒนาพื้นที่ โดยมีเป้าหมายสู่การพัฒนาและยกระดับคุณภาพชีวิตประชาชน ตามกรอบยุทธศาสตร์การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 13 ประเด็นการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเมือง เพื่อรองรับการเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยุทธศาสตร์การพัฒนาภาค เมือง และพื้นที่เศรษฐกิจ ด้านการพัฒนาสภาพแวดล้อม เมืองศูนย์กลางของจังหวัดให้เป็นเมืองน่าอยู่ ที่เอื้อต่อการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคม [1] และสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาระดับจังหวัด ด้านการพัฒนาสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนและภูมิทัศน์ใหม่เพื่อขยายผลไปสู่การปฏิบัติ ภายใต้ยุทธศาสตร์การพัฒนาเศรษฐกิจใหม่ที่มีแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงภูมิทัศน์เมืองภายในเขตเทศบาลให้มีมาตรฐานและยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานใหม่ด้วยการพัฒนาการใช้ที่ดิน โดยกำหนดงบประมาณการพัฒนาภายใต้โครงการปรับปรุงภูมิทัศน์และปรับปรุงผิวจราจรรอบสระบัว โครงการติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่าง และโครงการปรับปรุงภูมิทัศน์สายไฟฟ้าลงดิน [14]

จากแผนและนโยบายพัฒนาข้างต้น พบว่า แผนการพัฒนาท้องถิ่นมีความสอดคล้องกับแผนพัฒนาระดับประเทศ ระดับภูมิภาค และระดับจังหวัด ภายใต้โครงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้วยการตั้งงบประมาณขับเคลื่อนให้บรรลุผลเป็นรูปธรรม อย่างไรก็ตาม ถึงแม้แผนและนโยบายพัฒนาระดับท้องถิ่นจะมีความสอดคล้องและครอบคลุมแผนพัฒนาในทุกระดับ หากแต่เทศบาลนครสงขลาได้ระบุแผนการพัฒนาท้องถิ่นด้านยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานใหม่ควบคู่กับยุทธศาสตร์การพัฒนาด้านสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนและภูมิทัศน์ใหม่ ดังนั้นแผนและนโยบายการพัฒนาท้องถิ่นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสอดคล้องกับนโยบายและแผนการพัฒนาประเทศ และขยายผลให้เป็นรูปธรรมด้วยการจัดสรรงบประมาณภายใต้การจัดทำโครงการพัฒนาพื้นที่และพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน

3.4 แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal design)

แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน เป็นแนวคิดที่เน้นการพิจารณาการออกแบบพื้นที่นอกจากประเด็นความงามแล้วยังต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์และเหมาะสมกับการใช้งานของกลุ่มเป้าหมายทุกช่วงอายุ แนวคิดดังกล่าวผู้วิจัยได้นำมาเป็นแนวทางในการพิจารณาออกแบบในส่วนของการวางแผนการใช้งานในพื้นที่ร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์การออกกำลังกาย โดย Jaruthat [15] ได้ให้ความหมายของแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) ว่าหมายถึง การออกแบบผลิตภัณฑ์และสภาพแวดล้อมที่ปราศจากการออกแบบหรือดัดแปลงเป็นพิเศษ เป็นการออกแบบที่ทุกคนสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางเท่าที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยไม่มีข้อจำกัดด้านอายุและสภาพร่างกาย ซึ่งจะต้องประกอบด้วย หลัก 7 ประการของการออกแบบเพื่อทุกคนตามแนวคิดสากลที่องค์การสหประชาชาติได้พยายามเผยแพร่และส่งเสริม เพื่อให้คนพิการได้รับสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตในอาคารและสิ่งสิ่งแวดล้อมตามโครงการ Promotion of Non-Handicapping Physical Environment for Disabled Persons และได้มีการพัฒนาตามลำดับเป็น Accessible Design, Adaptable Design, Barrier Free Design, Design for all และ Inclusive Design ซึ่งประกอบด้วย หลัก 7 ประการ ได้แก่ 1) ทุกคนใช้ได้อย่างเท่าเทียมกัน (Equitable Use) 2) มีความยืดหยุ่น ปรับเปลี่ยนการใช้ได้ (Flexible Use) 3) ใช้งานง่าย (Simple and Intuitive Use) 4) การสื่อความหมายที่เข้าใจง่าย (Perceptible Information) 5) การออกแบบที่เผื่อการใช้งานที่ผิดพลาดได้ (Tolerance for Error) 6) ใช้แรงน้อย (Low Physical Effort) 7) มีขนาดและพื้นที่ที่เหมาะสมกับการเข้าถึงและใช้งานได้ (Size and Space for Approach and Use)

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยแบบประยุกต์ (Applied Research) โดยใช้วิธีการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Method) เพื่อให้ได้ข้อมูลครบถ้วน เริ่มต้นด้วยการทำความเข้าใจลักษณะทางกายภาพและสภาพแวดล้อมพื้นที่ศึกษาด้วยแผนที่จาก Google Earth และดำเนินการเก็บข้อมูลประกอบด้วย 1) ตำแหน่งและสภาพภูมิศาสตร์ที่ตั้ง เพื่อทำความเข้าใจบริบทของพื้นที่และสภาพแวดล้อม 2) รูปแบบและช่วงเวลาการดำเนินกิจกรรม เพื่อทราบข้อมูลรูปแบบและช่วงเวลาการดำเนินกิจกรรมของพื้นที่ 3) กลุ่มประชาชนผู้ใช้พื้นที่ดำเนินกิจกรรม เพื่อทราบกลุ่มประชาชนผู้ใช้พื้นที่ ข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์สถิติด้วยโปรแกรม SPSS และสังเคราะห์เพื่อหารูปแบบกิจกรรมที่เหมาะสมกับพื้นที่และกลุ่มประชาชน ร่วมกับการเก็บข้อมูลด้วยการสำรวจถ่ายภาพ สัมภาษณ์แบบไม่มีโครงสร้าง การสังเกตแบบไม่มีส่วนร่วม โดยการใช้พื้นที่สาธารณะที่มีความแตกต่างของช่วงอายุ รูปแบบกิจกรรม เพื่อค้นหาพื้นที่ที่มีศักยภาพด้วยแบบสอบถามค่าระดับความพึงพอใจตามมาตรวัดของลิเคิร์ท (Likert scale) [2] ในการเก็บข้อมูลแบบบังเอิญ

(Accidental Sampling) จำนวน 240 ตัวอย่าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลรูปแบบกิจกรรมตามช่วงเวลาและพื้นที่การใช้งาน

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยสร้างเครื่องมือจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลและเนื้อหาประกอบด้วย

ส่วนที่ 1 แบบสำรวจกายภาพพื้นที่ เป็นการรวบรวมข้อมูลด้านตำแหน่ง ที่ตั้ง รูปแบบและช่วงเวลา รวมถึงสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ปัจจัยความเหมาะสมของพื้นที่

ส่วนที่ 2 แบบสำรวจพฤติกรรมและความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างพร้อมข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ส่วนที่ 3 แบบสำรวจความต้องการ เป็นการรวบรวมข้อมูลความต้องการใช้พื้นที่ สิ่งอำนวยความสะดวก และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ข้อมูลที่ได้ทั้ง 3 ส่วน นำมาวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับการสังเกต และสำรวจ ประกอบด้วย

1) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ ใช้การวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) โดยใช้การจำแนกข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ สังเคราะห์พร้อมสรุปผล เพื่อนำไปสู่การระบุพื้นที่ที่เหมาะสมและจัดทำแนวทางการออกแบบพื้นที่

2) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ ใช้วิเคราะห์แบบสอบถาม ค่าเฉลี่ยสถิติ ค่าร้อยละ ในการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้ ข้อมูลที่ได้นำไปแปรผลในรูปแบบการบรรยาย ตาราง และกราฟ

4.2 บริบทพื้นที่ศึกษา

ภูมิศาสตร์พื้นที่เทศบาลนครสงขลา ตั้งอยู่ระหว่างทะเลสาบสงขลาทางด้านตะวันตก และทะเลอ่าวไทยทางด้านตะวันออก มีรูปร่างเป็นหาดแคบยาวตามแนวทิศใต้สู่ทิศเหนือลงสู่ทะเล [16] พื้นที่ส่วนใหญ่ในเขตเทศบาลมีการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นที่ตั้งส่วนราชการและมีการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อพักอาศัยที่มีรูปแบบการตั้งชุมชนด้านทิศตะวันตกตามแนวทิศเหนือ - ทิศใต้ ขณะที่ด้านทิศตะวันออกตามแนวทิศเหนือ - ทิศใต้ มีลักษณะเป็นพื้นที่โล่งชายฝั่งทะเลตามธรรมชาติ ดังนั้นลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่เป็นแหลมแคบยาวมีผลให้เกิดรูปแบบการสร้างที่อยู่อาศัยในลักษณะชุมชนแออัดที่มีการขยายตัวกระจายลงไปตามด้านทิศใต้ ตามข้อจำกัดของพื้นที่ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 ภูมิศาสตร์ที่ตั้งพื้นที่เทศบาลนครสงขลา

4.3 การเก็บข้อมูลด้านกายภาพ

การวิจัยเริ่มต้นด้วยการลงพื้นที่สำรวจข้อมูลทางกายภาพและสภาพแวดล้อมพื้นที่ศึกษา ร่วมกับแผนที่จาก Google Earth เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะทางกายภาพพื้นที่สาธารณะในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา ร่วมกับการตรวจสอบพื้นที่ตามแนวคิดเกณฑ์ และปัจจัยความสำเร็จของพื้นที่สาธารณะ ประกอบด้วย 1) การเข้าถึงและการเชื่อมต่อ (Access and Linkages) เพื่อเข้าใจตำแหน่งที่ตั้งที่มีการเชื่อมโยงเครือข่ายการเข้าถึงทั้งการจราจร และการเดินเท้าระหว่างพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ภายนอกได้สะดวก 2) สิ่งอำนวยความสะดวก (Comfort and Image) ตรวจสอบสิ่งอำนวยความสะดวกที่มีในพื้นที่ เช่น ห้องน้ำ ที่จอดรถ อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับคนทุกช่วงวัย 3) การใช้ประโยชน์และกิจกรรม (Uses and Activities) มีการใช้พื้นที่ดำเนินกิจกรรมประโยชน์หรือพื้นที่มีลักษณะปล่อยทิ้งร้าง และ 4) ความคุ้นเคย (Sociability) เป็นการสำรวจพื้นที่ด้านความรู้สึกของประชาชนทั่วไปที่มีความคุ้นเคยหรือรู้จักพื้นที่ [6] ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ สังเคราะห์ร่วมกับแผนที่จาก Google Earth เพื่อให้ได้พื้นที่ที่มีความเหมาะสมนำไปออกแบบต่อไป

4.4 การร่างรูปแบบแนวทางการพัฒนาพื้นที่กิจกรรมสาธารณะ

ขั้นตอนนี้เป็น การนำข้อมูลและข้อเสนอแนะจากการสำรวจด้านกายภาพและสภาพแวดล้อม การสัมภาษณ์ และแบบสอบถามมาประมวลร่วมกัน รวมถึงแนวคิดเกณฑ์และปัจจัยความสำเร็จของพื้นที่สาธารณะ [6] ร่วมกับแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน [15] เป็นแนวคิดเริ่มต้นในขั้นตอน

การออกแบบพื้นที่ โดยคำนึงถึง 1) ความสอดคล้องกับภูมิทัศน์ธรรมชาติและสภาพแวดล้อมโดยนำเส้นโค้งแบบอิสระจากคลื่นทะเลมาเป็นแนวคิดในการออกแบบการใช้พื้นที่ ได้แก่ การจัดวางเส้นทางเดิน ลวดลายบนพื้นทางเดิน อุปกรณ์เครื่องออกกำลังกาย ที่นั่ง 2) การเลือกวัสดุ สีสัตว์ส่วน และลวดลาย ที่มีความน่าสนใจและสดใส เพื่อเชิญชวนให้ผู้ใช้พื้นที่ที่มีความตื่นตัวตลอดเวลา 3) รูปแบบกิจกรรม ภายใต้แนวคิด “Learning and Playing” มาเป็นแนวคิดในการออกแบบพื้นที่และอุปกรณ์การทำการกิจกรรมที่มีความยืดหยุ่นสำหรับกลุ่มผู้ใช้งานทุกช่วงวัย

5. ผลการศึกษา

การศึกษาแนวทางการออกแบบพื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลาครั้งนี้ นำข้อมูลจากการสำรวจและข้อมูลแบบสอบถามเป็นเครื่องมือหลักในการหาพื้นที่สาธารณะที่มีศักยภาพ และนำมาวางแผนและออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมกับบริบทพื้นที่และผู้ใช้งาน แบ่งเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ 1) ด้านกายภาพและสภาพแวดล้อม 2) ด้านการระบุความเหมาะสมของพื้นที่ 3) ด้านรูปแบบแนวทางการพัฒนาพื้นที่กิจกรรมสาธารณะ สามารถสรุปรายละเอียดข้อค้นพบจากการศึกษาประกอบด้วย

5.1 ด้านกายภาพและสภาพแวดล้อมพื้นที่สาธารณะ

จากการสำรวจข้อมูลด้านกายภาพและสภาพแวดล้อมด้านภูมิศาสตร์ที่ตั้งพื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลาพร้อมกับแผนที่จาก Google Earth และข้อมูลแบบสอบถามจากผู้ใช้งาน พบว่ารูปแบบการใช้พื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลา แบ่งได้ 3 รูปแบบ ได้แก่

5.1.1 พื้นที่กิจกรรมสาธารณะระดับเมือง

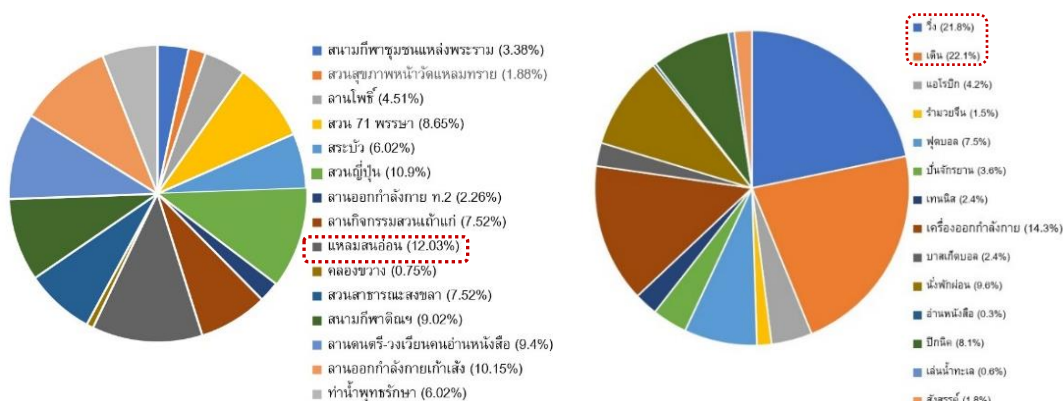
เป็นพื้นที่สาธารณะมีตำแหน่งที่ตั้งบริเวณด้านทิศตะวันออกตามแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ มีลักษณะเป็นพื้นที่โล่งตามธรรมชาติ ภูมิทัศน์มีความสวยงามตามธรรมชาติเป็นสถานที่ดึงดูดให้ประชาชนและนักท่องเที่ยวเข้ามาใช้พื้นที่ทำการกิจกรรม ได้แก่ หาดชลาทัศน์ หาดสมิหลา เขาน้อย เขาตังกวน สวนเสรี สระบัว ลานว้าว แหลมสนอ่อน (รูปที่ 3) ปัจจุบันพื้นที่สาธารณะเหล่านี้มีรูปแบบทางกายภาพเป็นพื้นที่เปิดโล่งตามธรรมชาติที่ยังไม่มีการพัฒนา ประกอบกับสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-2019 และมาตรการทางสาธารณสุขที่จะต้องมีการรักษาระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) ทำให้มีผู้ใช้งานต้องการพื้นที่สาธารณะเปิดโล่งขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น ผลที่เกิดตามมาคือพื้นที่การพัฒนาที่เหมาะสม ไม่มีอุปกรณ์และสิ่งก่อสร้างที่อำนวยความสะดวกที่เหมาะสมรองรับและดึงดูดให้มีผู้เข้ามาใช้งาน หากมีการพัฒนาพื้นที่สาธารณะควบคู่กับ

การใช้งานจะช่วยส่งเสริมภูมิทัศน์ของเมือง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Jacobs [3] ที่อธิบายถึง
ความสำคัญของพื้นที่สาธารณะช่วยส่งเสริมให้เมืองมีความงาม



รูปที่ 3 พื้นที่สาธารณะระดับเมืองและรูปแบบกิจกรรม

กิจกรรมที่เกิดขึ้นในพื้นที่สาธารณะ พบว่า ประชาชนใช้พื้นที่ประกอบกิจกรรมเพื่อการพักผ่อน นั่งเล่น นั่งพูดคุย และออกกำลังกายประเภทการเดินในสวนสาธารณะ วิ่ง ปั่นจักรยาน เต้นแอโรบิค และออกกำลังกายโดยใช้อุปกรณ์ในช่วงเวลาเช้าและเย็น บริเวณแหลมสมิหลาและริมหาดชลาทัศน์ (ลานดนตรี วงเวียนคนอ่านหนังสือ) (21.43%) สวนเสรี/สวนญี่ปุ่น (10.9%) และพื้นที่อื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ปัจจุบันจำนวนผู้ใช้พื้นที่โล่งสาธารณะทำกิจกรรมมีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-19 และมาตรการทางสาธารณสุขที่จะต้องมีการรักษาระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) ดังนั้น พื้นที่โล่งสาธารณะจึงมีความจำเป็นต่อผู้ที่ต้องการใช้พื้นที่สาธารณะทำกิจกรรม



รูปที่ 4 การใช้พื้นที่ (ซ้าย) และรูปแบบกิจกรรม (ขวา) ระดับเมือง ช่วงการแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-2019

จากข้อมูลการใช้พื้นที่กิจกรรมสาธารณะระดับเมือง สรุปได้ว่า สถานการณ์การแพร่ระบาดจากการติดเชื้อไวรัสโควิด-2019 เป็นเหตุผลหลักให้มีการกระจายการใช้พื้นที่กิจกรรมและมีความต้องการใช้พื้นที่ลักษณะเปิดโล่งมากขึ้น โดยการใช้พื้นที่สาธารณะระดับเมืองมีการกระจายตัวไปยังบริเวณแหลมสนอ่อน มีลักษณะกายภาพเป็นที่โล่งเปิดขนาดใหญ่ที่ยังไม่มีการพัฒนารูปแบบกิจกรรมที่หลากหลายแต่เชื่อมโยงพื้นที่โล่งใกล้เคียง ได้แก่ พื้นที่โล่งสระบัว พื้นที่โล่งสะพานดาว และพื้นที่โล่งลานว้าว โดยลักษณะกิจกรรมการใช้พื้นที่ในรูปแบบการออกกำลังกายด้วยการเดินและวิ่ง อย่างไรก็ตามพื้นที่กิจกรรมสาธารณะระดับเมืองส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เปิดโล่งตามธรรมชาติที่ยังไม่มีการพัฒนาให้มีรูปแบบกิจกรรมที่หลากหลาย ดังนั้น การพัฒนาพื้นที่เพื่อรองรับการใช้บริการที่สอดคล้องกับกลุ่มเป้าหมายจึงเป็นการนำพื้นที่มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์แก่เมืองและเป็นการส่งเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชนอีกด้วย

5.1.2 พื้นที่กิจกรรมสาธารณะระดับชุมชน

จากการทบทวนวรรณกรรมและการสังเกตจากการลงพื้นที่สำรวจลักษณะกายภาพพื้นที่สาธารณะในชุมชน พบว่า เทศบาลนครสงขลามีนรูปแบบการตั้งถิ่นฐานของชุมชนอยู่ทางด้านทิศตะวันตกตามแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ มีผลให้รูปแบบการตั้งชุมชนในลักษณะชุมชนแออัด (รูปที่ 2) โดยมีที่ว่างสาธารณะทำกิจกรรมสำหรับชุมชนในรูปแบบของพื้นที่ว่างระหว่างอาคาร ที่ว่างโครงข่ายถนนและทางสัญจร พื้นที่ว่างหน้าบ้าน การขาดแคลนพื้นที่กิจกรรมในชุมชนส่งผลให้ส่วนใหญ่ผู้ใช้งานจะใช้พื้นที่นอกชุมชนทำกิจกรรม เช่น สนามกีฬาดินสุลลันนท์ หาดสมิหลา หาดชลาทัศน์ ลานสระบัว ลานสะพานดาว และลานว้าว สำหรับชุมชนที่ตั้งอยู่ใกล้วัดจะใช้พื้นที่ลานโล่งในวัดเป็นพื้นที่พักผ่อนและทำกิจกรรม จากข้อมูลพื้นที่สาธารณะเพื่อทำกิจกรรมของชุมชนพบว่าผู้อาศัยในชุมชน จำนวน 162 คน คิดเป็นร้อยละ 67.5% มีความต้องการพื้นที่กิจกรรม เนื่องจากลักษณะชุมชนค่อนข้างแออัด ปัจจุบันเด็กและผู้สูงอายุใช้พื้นที่ว่างหน้าบ้านหรือถนนในชุมชนทำกิจกรรม (รูปที่ 5) หากมีการจัดทำพื้นที่กิจกรรมในชุมชนควรคำนึงถึงความปลอดภัยและสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้ใช้งานทุกช่วงอายุโดยเฉพาะเด็กและผู้สูงอายุ ขณะที่จำนวน 78 คน คิดเป็นร้อยละ 32.5% ไม่ต้องการพื้นที่กิจกรรมเนื่องจากในชุมชนค่อนข้างแออัดทำให้ไม่มีพื้นที่ว่างกิจกรรมเพียงพอ ดังรายละเอียด (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ความคิดเห็นต่อพื้นที่กิจกรรมสาธารณะในชุมชน

ต้องการพื้นที่สาธารณะ (67.5%)	ไม่ต้องการพื้นที่สาธารณะ (32.5%)	ข้อเสนอแนะ เพิ่มเติม
-ต้องการพื้นที่สาธารณะเพื่อรองรับกิจกรรมและจำนวนผู้ใช้งานในชุมชน -เดินทางไปใช้พื้นที่นอกชุมชนไม่สะดวกเนื่องจากไม่มีรถส่วนตัวต้องเสียค่ารถรับจ้างหากออกไปใช้พื้นที่นอกชุมชน -ผู้สูงอายุต้องรอสมาชิกในครอบครัวไปส่งหากต้องใช้พื้นที่งานพื้นที่นอกชุมชน	-ปกติใช้พื้นที่กิจกรรมนอกชุมชนอยู่แล้ว เนื่องจากไม่คับแคบและมีอุปกรณ์ออกกำลังกาย -ได้พบปะพูดคุยกับเพื่อน -ภายในชุมชนบ้านเรือนค่อนข้างแออัดทำให้ไม่มีพื้นที่ว่างทำกิจกรรม	-ความปลอดภัยในการใช้พื้นที่ อุปกรณ์และเครื่องออกกำลังกายสำหรับ เด็ก และ ผู้สูงอายุ -เพิ่มสิ่งอำนวยความสะดวก เช่น เก้าอี้สำหรับนั่งพัก แสงสว่าง



รูปที่ 5 พื้นที่สาธารณะระดับชุมชนและรูปแบบกิจกรรม

5.1.3 พื้นที่โล่งที่ไม่มีการใช้ประโยชน์

มีลักษณะเป็นพื้นที่รกร้างที่ไม่มีการใช้ประโยชน์ หน่วยงานท้องถิ่นทำการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องออกกำลังกายโดยมีประชาชนใช้พื้นที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากที่ตั้งค่อนข้างไกลจากชุมชนทำให้ขาดความสะดวกในการเข้าถึงพื้นที่ เพื่อทำกิจกรรมสำหรับกลุ่มประชาชนที่ไม่มียานพาหนะ นอกจากนี้พื้นที่ส่วนใหญ่ไม่มีการติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่าง ทำให้ประชาชนมีความกังวลเรื่องความปลอดภัย

จากรูปแบบการใช้พื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลาทั้ง 3 รูปแบบ ผู้วิจัยได้นำเกณฑ์ [7] มาพิจารณาจากรูปพื้นที่สาธารณะในเทศบาลนครสงขลาที่เหมาะสมตามเกณฑ์ Project for Public Spaces [7] แล้วพบว่า พื้นที่กิจกรรมสาธารณะระดับเมือง เป็นพื้นที่ที่เหมาะสมที่จะนำมาหาศักยภาพเพื่อนำไปสู่การพัฒนาพื้นที่มากที่สุด เนื่องจากพื้นที่มีลักษณะเปิดโล่งตามธรรมชาติขนาดใหญ่เพียงพอในการรองรับจำนวนผู้ใช้งาน และสามารถนำมาปรับปรุงพื้นที่ให้เหมาะสมในการเว้นระยะห่างตามมาตรการสาธารณสุขในสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-19 ขณะที่ พื้นที่กิจกรรมสาธารณะระดับชุมชน มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ว่างสำหรับทำกิจกรรมซึ่งเป็นผลมาจากรูปแบบการตั้งชุมชนในลักษณะชุมชนแออัด สำหรับพื้นที่โล่งที่ไม่มีมีการใช้ประโยชน์ ไม่มีการใช้งานมากนักเนื่องจากผู้ใช้งานกังวลเรื่องความปลอดภัยและตำแหน่งที่ตั้งห่างไกลชุมชนเป็นประเด็นหลักในการพิจารณาการใช้พื้นที่ ดังนั้น พื้นที่กิจกรรมสาธารณะระดับเมืองจึงเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการหาแนวทางออกแบบพื้นที่สาธารณะ

5.2 ด้านการระบุความเหมาะสมของพื้นที่

การสำรวจพื้นที่เพื่อนำมาสู่การระบุความเหมาะสมของพื้นที่โล่งสาธารณะ 3 พื้นที่ ได้แก่ 1) พื้นที่โล่งสระบัว 2) พื้นที่โล่งลานว้าว 3) พื้นที่โล่งสะพานดาว ตามแนวทางการออกแบบพัฒนาพื้นที่สาธารณะของ Project for Public Spaces [7]

5.2.1 สภาพแวดล้อมทางกายภาพ

จากการสำรวจพื้นที่เพื่อนำมาสู่การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อนำมาสู่การระบุความเหมาะสมของพื้นที่สาธารณะระหว่างสถานการณ์การแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-19 ทำให้ผู้ด้นกระจายการใช้พื้นที่กิจกรรมจากสนามกีฬาติณสูลานนท์และบริเวณหาดชลาทัศน์ไปยังบริเวณแหลมสนอ่อนที่เชื่อมโยง 3 พื้นที่ ได้แก่ 1) พื้นที่โล่งสระบัว 2) พื้นที่โล่งลานว้าว 3) พื้นที่โล่งสะพานดาว ผู้วิจัยได้สำรวจทางกายภาพของทั้ง 3 พื้นที่และได้กำหนดตำแหน่งลงบนแผนที่ (รูปที่ 6 และ 7)



รูปที่ 6 การกระจายพื้นที่กิจกรรมหาดชลาทัศน์ไปลานสระบัว ลานว้าว สะพานดาว



รูปที่ 7 สภาพแวดล้อมพื้นที่ลานว้าว (ซ้าย) ลานสระบัว (กลาง) สะพานดาว (ขวา)

จากการสำรวจกายภาพของทั้ง 3 พื้นที่ พบว่า ตำแหน่งพื้นที่โล่งลานว้าว ลานสระบัว และ สะพานดาว มีที่ตั้งใกล้เคียงกับบริเวณแหลมสนอ่อน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความยืดหยุ่นต่อการใช้งาน สำหรับกิจกรรมเทศกาลประจำเมืองเมืองทุก ๆ ปี เช่น งานกาชาด งานฤดูร้อน งานแข่งว้าว เป็นต้น พื้นที่สระบัวและสะพานดาวเป็นพื้นที่สีเขียวเปิดโล่งกว้างขวางมีข้อได้เปรียบที่มีการเชื่อมโยงกับ ถนนแหลมสน เข้าถึงง่าย สะดวก ร่มรื่น และพื้นที่จอดรถ ขณะที่ลานว้าวมีขนาดใหญ่เช่นเดียวกัน แต่มีข้อเสียเปรียบเรื่องสถานที่ตั้งอยู่บริเวณสี่แยกทำให้การเข้าถึงไม่สะดวก ผิวหน้าดินชำรุดมีหลุม ขนาดใหญ่กระจายทั่วไปในพื้นที่ ขาดความร่มรื่น ทำให้ลานว้าวมีผู้ใช้งานน้อยกว่าพื้นที่สระบัวและ สะพานดาว

นอกจากนี้ทั้ง 3 พื้นที่ยังมีปัญหาสะสมต่อเนื่องในประเด็นการพัฒนาพื้นที่ระดับเมือง ได้แก่ 1) การพัฒนาพื้นที่ให้มีกิจกรรมที่หลากหลายและเหมาะสมกับกลุ่มผู้ใช้งาน 2) การติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่างที่มีผลต่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้งาน 3) สิ่งอำนวยความสะดวกบริการผู้ใช้งาน ปัจจุบันสถานการณ์การแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-2019 เป็นปัจจัยผลักดันให้เมืองมีความจำเป็นต้องพัฒนาพื้นที่เปิดโล่งขนาดใหญ่รองรับการทำกิจกรรมของกลุ่มผู้คนที่หลากหลาย อย่างเพียงพอ

5.2.2 การระบุความพึงพอใจต่อพื้นที่

ผู้วิจัยใช้แบบสอบถามเพื่อระบุค่าระดับความพึงพอใจต่อพื้นที่ตามแนวคิดการออกแบบ พัฒนาพื้นที่สาธารณะ 8 ประการของ Project for Public Spaces [7] ประกอบด้วย 1) เข้าถึง สะดวก 2) มองเห็นกิจกรรมทั่วถึง 3) มีการเชื่อมต่อไปพื้นที่ภายนอก 4) ความปลอดภัย 5) สะดวกสบาย 6) การใช้ประโยชน์ 7) พื้นที่มีปฏิสัมพันธ์ทางสังคม และ 8) มีที่นั่งและร่มรื่น โดย ระบุค่าความพึงพอใจตามมาตรวัดของลิเคิร์ต (Likert scale) [2] ที่กำหนดไว้ 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 5 มีความพึงพอใจมากที่สุด ระดับ 4 มีความพึงพอใจมาก ระดับ 3 มีความพึงพอใจปานกลาง ระดับ 2

มีความพึงพอใจน้อย และระดับ 1 มีความพึงพอใจน้อยที่สุด ผู้วิจัยทำการสำรวจกลุ่มตัวอย่าง 240 ตัวอย่าง สรุปลได้ตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่ปัจจัยการพิจารณาเลือกพื้นที่

พื้นที่	ปัจจัยการเลือกพื้นที่								ค่าคะแนน	สรุปผล
	เข้าถึงสะดวก	มองเห็นกิจกรรมทั่วถึง	มีการเชื่อมต่อไปพื้นที่ภายนอก	ความปลอดภัย	ความสะดวกสบาย	มีการใช้ประโยชน์	พื้นที่มีปฏิสัมพันธ์ทางสังคม	มีที่นั่งและร่มรื่น		
ลานว้าว	1	5	5	1	1	5	1	5	3	ความพึงพอใจปานกลาง
สระบัว	5	1	5	1	5	5	5	5	4	ความพึงพอใจมาก
สะพานดาว	5	5	5	5	5	5	5	5	5	ความพึงพอใจมากที่สุด

ผลการประเมินปัจจัยเพื่อระบุความเหมาะสมของพื้นที่ตามมาตรวัดของลิเคิร์ท (Likert scale) [2] พบว่า พื้นที่โล่งสะพานดาวมีสัดส่วนระดับความพึงพอใจต่อปัจจัยการพิจารณาองค์ประกอบการออกแบบพัฒนาพื้นที่สาธารณะ 8 ตามแนวคิด Project for Public Spaces [7] มากที่สุดเนื่องจากพื้นที่มีตำแหน่งที่ตั้งที่มีศักยภาพสูง เข้าถึงได้สะดวกจากเส้นทางสัญจรถนนสายหลักและเส้นทางเดินเท้าเชื่อมหาดสมิหลาและหาดชลาทัศน์ มีการใช้พื้นที่ทำกิจกรรมต่าง ๆ เช่น งานฤดูร้อนและงานกาชาดประจำปี ด้านการมองเห็นกิจกรรมทั่วถึง

พื้นที่สะพานดาวและพื้นที่ลานว้าวมีกายภาพเป็นพื้นที่โล่งแบบเปิดตามธรรมชาติทำให้มองเห็นกิจกรรมในพื้นที่และสภาพแวดล้อมใกล้เคียงได้ทั่วถึงยอมเปิดโอกาสให้ผู้ใช้พื้นที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกันจากการมองเห็น และนำมาสู่การทำกิจกรรมร่วมกันในอนาคตได้ ขณะที่กายภาพพื้นที่สระบัวแม้จะมีลักษณะเป็นพื้นที่โล่งแบบเปิดและเข้าถึงได้สะดวก แต่ในพื้นที่กลับมีต้นไม้หนาทึบทำให้เป็นอุปสรรคด้านการมองเห็นและความปลอดภัย ซึ่งผู้วิจัยถือเป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญต่อการเลือกพื้นที่ ด้านสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นที่สะพานดาวเป็นพื้นที่เดียวที่มีที่จอดรถและพื้นที่ขายของบริการ ซึ่งมีความสอดคล้องกับข้อคิดเห็นของ Sennett [17] ในปี ค.ศ. 1980 ที่อธิบายถึงพื้นที่สาธารณะที่มีพื้นที่บริการความสะดวกให้แก่ผู้ใช้งานยอมเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ อย่างไรก็ตามปัญหาต่อเนื่องที่เป็นข้อจำกัด

เรื่องเวลาการใช้งานและความปลอดภัย คือ พื้นที่ยังไม่มีติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่าง ดังนั้น ประเด็นไฟฟ้าส่องสว่างจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่นำมาผนวกไว้ในกรอบแบบ

ด้านการใช้พื้นที่และรูปแบบกิจกรรมในรอบสัปดาห์จากคำตอบแบบสอบถามพบว่า กลุ่มคนทำงานที่ใช้เวลาก่อนและหลังเลิกงานทำกิจกรรมเดินและวิ่ง ขณะที่กลุ่มผู้สูงอายุทำกิจกรรมได้เพียงการเดินออกกำลังกายเพียงอย่างเดียวในช่วงวันเสาร์และวันอาทิตย์ เนื่องจากต้องพึ่งพาครอบครัวในการเดินทาง สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 การใช้พื้นที่และรูปแบบกิจกรรมในรอบสัปดาห์

วัน เวลา	06.00- 08.00 น.	08.00- 14.00 น.	14.00- 18.00 น.	กลุ่มผู้ใช้	พื้นที่กิจกรรม	ข้อเสนอแนะต่อ การพัฒนาพื้นที่
อาทิตย์	เดิน, วิ่ง	ไม่มีการ ใช้พื้นที่	พักผ่อน สังสรรค์ เดิน, วิ่ง พักผ่อน	เด็ก, วัยทำงาน, ผู้สูงอายุ	สะพานดาว, สระบัว	-ควรมีกิจกรรมที่ หลากหลาย -ควรมีอุปกรณ์ และเครื่องออกกำลังกาย
จันทร์	เดิน, วิ่ง		เดิน, วิ่ง	วัยทำงาน	สะพานดาว, สระบัว	กำลังกาย
อังคาร	เดิน, วิ่ง		เดิน, วิ่ง	วัยทำงาน	สะพานดาว, สระบัว	- เ ค รื่ อ ง เ ล่ น
พุธ	เดิน, วิ่ง		เดิน, วิ่ง	วัยทำงาน	สะพานดาว, สระบัว	สำหรับ เด็ก ส่ ง
พฤหัสบดี	เดิน, วิ่ง		เดิน, วิ่ง	วัยทำงาน	สะพานดาว, สระบัว	เสริมพัฒนาการ
ศุกร์	เดิน, วิ่ง		เดิน, วิ่ง	วัยทำงาน	สะพานดาว, สระบัว	และ ความ คิด
เสาร์	เดิน, วิ่ง		เดิน, วิ่ง	เด็ก, วัยทำงาน, ผู้สูงอายุ	สะพานดาว, สระบัว	สร้างสรรค์

5.3 ด้านแนวทางการพัฒนาพื้นที่กิจกรรมสาธารณะ

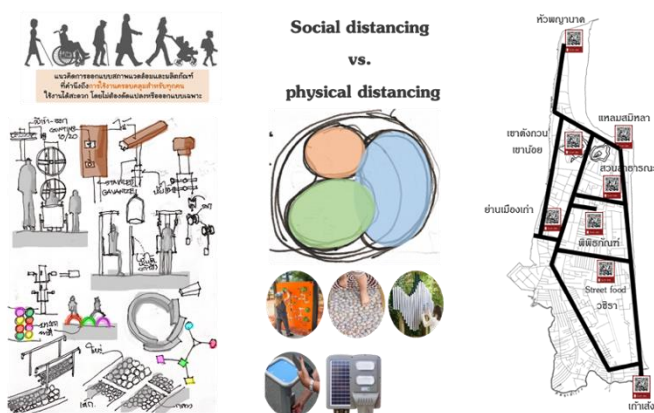
พื้นที่โล่งสะพานดาวตั้งอยู่ทางทิศเหนือในเขตเทศบาลนครสงขลา ตำบลบ่อยาง ความยาวประมาณ 65.00 เมตร ความกว้าง 42.50 เมตร พื้นที่ 2,762.50 ตารางเมตร มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกับหาดชลาทัศน์ตามแนวทิศเหนือสู่ทิศใต้ มีสระน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้าเดิมทางด้านทิศตะวันออก พื้นรอบสระน้ำมีลักษณะเอียงลาดลงสู่สระน้ำโดยรอบ ทิศเหนือเชื่อมต่อกับลานสเก็ต เชื่อมกับแนวหาดชลาทัศน์ด้านทิศตะวันออกสู่ทิศใต้ โดยมีลานจอดรถและพื้นที่ว่างตั้งอยู่ทางทิศใต้

จุดแข็งของพื้นที่ คือ เป็นพื้นที่เปิดโล่งตามธรรมชาติที่ยังไม่มีการพัฒนา มีการระบายอากาศที่ดีเหมาะแก่การใช้พื้นที่ทำกิจกรรมรูปแบบการพักผ่อน ไม่มีการปิดล้อมจากสิ่งก่อสร้าง พื้นที่ตั้งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่กิจกรรมใกล้เคียงที่ช่วยส่งเสริมการใช้พื้นที่ ได้แก่ ลานสเก็ต ลานสระบัว และ

ลานว่า ในพื้นที่ที่มีการแบ่งส่วนที่เป็นสระน้ำและพื้นที่โล่งสำหรับนำมาพัฒนาเป็นพื้นที่กิจกรรมที่
 หลากหลาย มีการเข้าถึงและทางเข้า-ออก ได้หลายทางทั้งจากเส้นทางสัญจรหลักและการเดินเท้า

จุดอ่อนพื้นที่ คือ พื้นที่ถูก เข้า-ออก ได้หลายทางมีผลให้ยากต่อการควบคุมดูแลเรื่องความปลอดภัย พื้นที่ลาดเอียงรอบสระน้ำบางส่วนผิวหน้าดินบางช่วงไม่มีการปกคลุมของพืชพันธุ์ทำให้เกิดการกัดกร่อนของหน้าดินบางช่วงในฤดูฝน จำเป็นจะต้องมีการปลูกพืชพันธุ์ใหม่ตามลักษณะของพื้นที่ ในพื้นที่ขาดสิ่งอำนวยความสะดวกและบริการพื้นฐาน เช่น ม้านั่ง ไฟฟ้าส่องสว่าง

ดังนั้น การวิเคราะห์จุดแข็งและจุดอ่อนข้างต้นนำไปสู่การวางรูปแบบการใช้ประโยชน์พื้นที่และกำหนดกิจกรรมร่วมกับประเด็นการรักษาระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) ที่จะต้องเว้นระยะห่างของผู้คนในการทำกิจกรรม 1-2 เมตร ตามข้อกำหนดองค์การอนามัยโลก [11] ผู้วิจัยได้นำเงื่อนไขดังกล่าวมาเป็นแนวคิดหลักในการออกแบบแนวทางการพัฒนาพื้นที่ร่วมกับข้อมูลแบบสอบถามข้างต้นและแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal design) (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 แนวคิดการออกแบบพื้นที่และรูปแบบกิจกรรม

5.3.1 การวางผังและรูปแบบกิจกรรม

พื้นที่สะพานดาว มีพื้นที่ 2,762.50 ตารางเมตร ได้ทำการออกแบบตามกระบวนการเก็บข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ และขั้นตอนการออกแบบให้ครอบคลุมทุกประเด็นที่เกี่ยวข้องโดยยึดหลักการออกแบบตามสภาพพื้นที่เดิม ภายในพื้นที่แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่ 1 บริเวณสระน้ำเดิมเป็นพื้นที่รองรับน้ำที่มีทิศทางการไหลตามความลาดชันเล็กน้อยโดยรอบขอบสระ บริเวณที่ไม่มีพืชปกคลุมเกิดปัญหาการกัดกร่อนหน้าดินบางช่วงในฤดูฝน ส่วนที่ 2 พื้นที่โล่งที่จะนำมาปรับปรุงเป็นพื้นที่รองรับกิจกรรมเพื่อการพักผ่อนและออกกำลังกายโดยสร้างความต่อเนื่องกิจกรรมในพื้นที่ด้วยเส้นทางสัญจรด้วยเดินเท้า (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 ผัง zoning ตำแหน่งกิจกรรมและบริเวณปัญหาในพื้นที่

ประเด็นสำคัญของการออกแบบผังในรูปแบบการจัด zoning เพื่อกำหนดการใช้พื้นที่และพัฒนาไปสู่การกำหนดกิจกรรม จากการสังเคราะห์ข้อมูลแบบสอบถามกลุ่มผู้ใช้พื้นที่ 240 ชุด ด้วยโปรแกรมทางสถิติ SPSS พบว่า รูปแบบกิจกรรมสำหรับเด็กควรมีสวนเด็กเล่นและพื้นที่เสริมพัฒนาการและความคิดสร้างสรรค์ ขณะที่กลุ่มวัยรุ่น-ผู้ใหญ่ให้ความสนใจกิจกรรมที่มีการเคลื่อนไหวและอุปกรณ์ออกกำลังกาย ส่วนกิจกรรมสำหรับผู้สูงอายุต้องการกิจกรรมที่มีการเคลื่อนไหวค่อนข้างช้าและมีความยืดหยุ่น (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 การสรุปประเด็นรูปแบบกิจกรรมของกลุ่มผู้ใช้พื้นที่

ผู้ใช้พื้นที่	ความต้องการรูปแบบกิจกรรม			ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม
เด็ก	สนามเด็กเล่น	พื้นที่ปั่นจักรยาน	พื้นที่ส่งเสริมพัฒนาการ	- เพิ่มไฟฟ้าส่องสว่างเพื่อความปลอดภัย
วัยรุ่น-ผู้ใหญ่	อุปกรณ์ออกกำลังกาย	ลานกิจกรรม	พื้นที่ปั่นจักรยาน	- สิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ห้องน้ำ
ผู้สูงอายุ	พื้นที่ออกกำลังกาย	พื้นที่ออกกำลังกาย	พื้นที่พักผ่อน	

แนวทางการออกแบบเพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการพัฒนาพื้นที่ รายละเอียดแยกเป็นประเด็น ดังนี้

(1) zone ออกกำลังกาย เป็นพื้นที่กิจกรรมหลักพื้นที่ส่วนใหญ่ใช้เพื่อออกกำลังกายและพักผ่อนหย่อนใจ แนวคิดในการวางผังกิจกรรมออกมาในรูปแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ละ 3.00 เมตร ภายในพื้นที่ติดตั้งจักรยานออกกำลังกายรอบวงกลมเว้นระยะห่าง 2.00 เมตร เพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-2019 (รูปที่ 10) กล่าวได้ว่า สถานการณ์การระบาด

ของไวรัสโควิด-2019 เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดรูปแบบการวางผังโดยสอดคล้องกับแนวคิดของ Goodsell ที่ระบุในปี ค.ศ. 2003 [18] ว่ารูปแบบชีวิตที่เปลี่ยนไปย่อมมีผลต่อพัฒนาการการออกแบบและการจัดการพื้นที่สาธารณะ



รูปที่ 10 พื้นที่ติดตั้งจักรยานรอบวงกลม zone ออกกำลังกาย

สำหรับพื้นที่กิจกรรมผู้สูงอายุ รูปแบบกิจกรรมเน้นเส้นทางเดินเป็นหลัก มีการแบ่งสัดส่วนระหว่างพื้นที่กิจกรรมผู้สูงอายุและพื้นที่กิจกรรมอื่น ๆ อย่างชัดเจน ใช้วัสดุหินแม่น้ำทรงกลมที่พื้นผิวเรียบและไม่ลื่นหินเพื่อความรู้สึกผ่อนคลาย และสามารถป้องกันอันตรายจากการลื่นล้มขณะใช้งาน (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 พื้นที่กิจกรรมผู้สูงอายุ

(2) zone ลานสร้างสรรค์ เป็นการเพิ่มรายละเอียดกิจกรรมพื้นที่ส่งเสริมพัฒนาการสำหรับผู้ใช้กลุ่มเยาวชน ได้กำหนดผังการใช้พื้นที่ตามแนวคิด “Songkhla Learning by Doing” เพื่อการเรียนรู้วัฒนธรรมท้องถิ่นด้วยการระบุลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่สำคัญเมืองสงขลาลงบนแผ่นบอร์ดในรูปแบบ QR Code โดยสามารถเลื่อนปุ่มเครื่องเล่นตามโครงข่ายถนนแต่ละจุด เป็นการออกกำลังกายกลางแจ้งและเสริมความรู้ตามรูปแบบกิจกรรม (รูปที่ 12)



รูปที่ 12 บอร์ดส่งเสริมพัฒนาการเรียนรู้

(3) การเข้าถึงและทางเข้า-ออก มองเห็นได้ง่ายและสามารถเดินเชื่อมถึงกันได้หมด โดยคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลักเน้นการเข้าถึงด้วยการเดินเท้าที่เชื่อมต่อกับชายหาดสมิหลาและชายหาดชลาทัศน์ รถยนต์เข้าถึงได้เพียงที่จอดรถจากทางสัญจรหลัก พื้นที่มีลักษณะโค้งตามธรรมชาติ ทำให้มุมมองของการมองเห็นพื้นที่กิจกรรมอย่างทั่วถึงง่ายต่อการดูแลเรื่องความปลอดภัย (รูปที่ 13)



รูปที่ 13 ผังแสดงการเข้าถึงพื้นที่กิจกรรม

(4) สิ่งอำนวยความสะดวก ติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่างในระยะที่แสงสว่างกระจายได้ทั่วถึงทั่วพื้นที่และบริเวณที่จอดรถ ดวงโคมเลือกติดตั้งชนิดที่มีโซลาเซลล์เป็นส่วนประกอบเพื่อไม่สิ้นเปลืองงบประมาณของหน่วยงานที่ดูแล (รูปที่ 14)



รูปที่ 14 การติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่าง

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพการใช้พื้นที่กิจกรรมสาธารณะเทศบาลนครสงขลา สามารถสรุปผลการศึกษา ดังนี้

1) พื้นที่สาธารณะเทศบาลนครสงขลา มี 3 ระดับ ประกอบด้วย (1) พื้นที่สาธารณะระดับเมือง มีลักษณะเป็นพื้นที่เปิดโล่งตามธรรมชาติขนาดใหญ่ทางด้านทิศตะวันออกตามแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ บริเวณหาดขลาทัศน์ต่อเนื่องหาดสมิหลา (2) พื้นที่สาธารณะระดับชุมชน จากการตั้งชุมชนรูปแบบชุมชนแออัดมีผลให้มีพื้นที่ว่างระดับชุมชนมีลักษณะพื้นที่เปิดโล่งระหว่างอาคาร ถนน และทางสัญจรในชุมชน ทำให้พื้นที่สาธารณะไม่เพียงพอรองรับกิจกรรมในชุมชน ประเด็นปัญหาการขาดแคลนพื้นที่สาธารณะในชุมชนไม่เพียงแต่ปรากฏในเทศบาลนครสงขลา หากแต่เป็นปัญหาที่ปรากฏทั่วไปในชุมชนที่มีลักษณะเป็นชุมชนแออัด (3) พื้นที่โล่งที่ไม่มีมีการใช้ประโยชน์ มีลักษณะเป็นพื้นที่รกร้างที่ยังไม่มีการพัฒนาและปรับปรุง พื้นที่ดังกล่าวข้างไกลจากชุมชนทำให้ขาดความสะดวกในการเข้าถึง ดังนั้น ประชาชนในเทศบาลสงขลานิยมใช้พื้นที่สาธารณะระดับเมืองเป็นพื้นที่ทำกิจกรรม

2) สถานการณ์การแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโควิด-2019 และมาตรการทางสาธารณสุขที่จะต้องมีการรักษาระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) เป็นเหตุผลการใช้พื้นที่สาธารณะมีการกระจายตัวไปบริเวณพื้นที่สะพานดาว พื้นที่สระบัว และพื้นที่ลานว่าง โดยพื้นที่สะพานดาวเป็นพื้นที่มีศักยภาพต่อการนำมาพัฒนาและปรับปรุง เพื่อให้มีการใช้งานที่เหมาะสมกับผู้คนทุกช่วงอายุ

3) แนวคิดหลักการออกแบบพื้นที่ร่วมกับแนวคิดความกลมกลืนกับสภาพแวดล้อมธรรมชาติเดิม ประกอบด้วย (1) การเว้นระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) (2) รูปแบบกิจกรรมที่เหมาะสมสำหรับผู้คนทุกวัย (3) การพัฒนาจะต้องไม่ทำลายสภาพแวดล้อมเดิม และ (4) เพิ่มไฟฟ้าส่องสว่าง ข้อเสนอแนะสรุปแนวทางการออกแบบทั้งส่วนการวางผังและรูปแบบกิจกรรมที่ได้เกิดจากการสะท้อนความต้องการของประชาชน รวมถึงข้อเสนอแนะเพิ่มเติมการพัฒนาและปรับปรุงพื้นที่

ข้อค้นพบจากการศึกษางานชิ้นนี้เป็นเพียงงานวิจัยเพื่อหาแนวทางการออกแบบพื้นที่สาธารณะที่มีพื้นฐานข้อมูลมาจากกลุ่มตัวอย่างประชาชน ส่วนการดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงรวมทั้งการดูแลและการบริหารจัดการพื้นที่ หน่วยงานท้องถิ่นมีบทบาทหน้าที่สำคัญที่ต้องดูแลรับผิดชอบอย่างเหมาะสม ดังนั้น การจัดสรรงบประมาณ แนวทางการดำเนินการบริหารและดูแลพื้นที่เป็นประเด็นสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการบรรจุโครงการพัฒนาพื้นที่ไว้ในแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเมือง เพื่อช่วยผลักดันการจัดสรรงบประมาณโครงการให้ปรากฏเป็นรูปธรรมตามเป้าหมายที่ท้องถิ่นได้วางไว้ และเชื่อมโยงไปสู่การเกิดประโยชน์สูงสุดแก่ประชาชน ตามเป้าหมายการพัฒนาและยกระดับคุณภาพชีวิตประชาชนของเทศบาลนครสงขลา [1]

7. ข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์จากการศึกษานี้เป็นเพียงการเสนอแนะทางการออกแบบพื้นที่กิจกรรมสาธารณะในช่วงการแพร่ระบาดของโควิด-19 โดยนำเสนอผลการศึกษาที่ได้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม คณะผู้วิจัยนำมาออกแบบเพื่อเสนอเป็นแนวทางการพัฒนาพื้นที่เพียงรูปแบบเดียว ทั้งนี้ หากมีการศึกษาเพิ่มเติมควรนำกระบวนการมีส่วนร่วมเป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนร่วมกันระหว่างผู้วิจัย ภาาีเครือข่ายภาครัฐ และภาาีเครือข่ายภาคประชาชนในทุกขั้นตอน โดยมุ่งเน้นให้ทุกภาคส่วนได้มีโอกาสแสดงความคิดเห็นรูปแบบการพัฒนาพื้นที่ตามประสบการณ์ที่มี เพื่อให้ได้ข้อสรุปและเป็นทางเลือกรูปแบบการพัฒนาพื้นที่กิจกรรมสาธารณะร่วมกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามความต้องการของประชาชน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมพัฒนางานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาพื้นที่ (บพท.) ปีงบประมาณ 2563 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

References

- [1] Songkhla Municipality. Songkhla municipality development strategic plan 2014-2019 [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 15]. Available from: <https://www.songkhla-city.go.th/2020/strategy/?cid=2> (In Thai)
- [2] Ruangrathan C. Basic statistics with sample analysis by Minitab SPSS and SAS program. Khon Kaen: Khon Kaen University. 2000. (In Thai)
- [3] Jacobs J. The death and life of great American cities. New York: Vintage Books; 1961.
- [4] Iamtrakul P. Sustainable urban mobility. Bangkok: Printing house Thammasat University; 2018. (In Thai)
- [5] Kongpunpin C, Iamtrakul P. The transition of roles of public spaces in Thailand. Journal of Faculty of Architecture, KMITL 2018;26:30-40. (In Thai)
- [6] Francis M. Control as a Dimension of Public Space Quality. In Altman I, Zube E, editors. Public Places and Spaces. New York: Plenum Press; 1989. p. 147-172.
- [7] Project for Public Spaces. What make a place great [Internet]. 2021 [cited 2021 Dec 10]. Available from: <https://www.pps.org/article/grplacefeat>
- [8] Kasetsart University. Public space. Bangkok: The graphic system; 2015. (In Thai)

- [9] Hanphichai S, Julawat T. The effects of the epidemic of the Corona Virus-2019: toward the new-normal community in Lop Buri province. *Journal of Roi Kaensarn Academi* 2021;6(9):126-41. (In Thai)
- [10] Chomchun P. The spread of COVID-19 and the use of public spaces and urbanization. *LAW for ASEAN* [Internet]. 2021 [cited 2023 August 20]. Available from: <https://lawforasean.krisdika.go.th/File/files> (In Thai)
- [11] World Health Organization. Coronavirus Disease (COVID-19): Small public gatherings [Internet]. 2019 [cited 2021 Jun 12]. Available from: <http://www.who.int/emergencies/diseases/Novel-coronavirus-2019>.
- [12] Siamrath Online. Anutin asks Thai Health Promotion Foundation to raise the level of communication about COVID-19 to create understanding "social distance" [Internet]. 2020 [cited 2022 Dec 10]. Available from: <https://today.line.me/th/v2/article/LYKY2>. (In Thai)
- [13] Horrayangkul V. Human behavior and environment behavioral basis for design and planning. 6th ed. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House; 2006. (In Thai)
- [14] Songkhla Municipality. Local development plan, Songkhla Municipality 2018-2022 [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 15]. Available from: https://www.songkhla-city.go.th/2020/files/com_strategy/2019-10_01b791085f96a3b.pdf (In Thai)
- [15] Jaruthat T. The universal design guide book [Internet]. 2017 [cited 2023 May 13]. Available from: <http://123.242.157.9/document/fpdf-2032560-64.pdf> (In Thai)
- [16] Songkhla Municipality. Basic information of Songkhla Municipality [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 15]. Available from: <https://www.songkhla-city.go.th/2019/content/general> (In Thai)
- [17] Sennett R. Authority. New York: Alfred A. Knopf; 1980.
- [18] Goodsell C. The Concept of public space and its democratic manifestations. *The American Review of Public Administration* 2003;33(4):361-83.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐณีภรณ์ น้อยแสงรัมย์ สาขาวิชาการผังเมือง
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ที่อยู่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัด
สงขลา 90000 เบอร์ติดต่อ 084 160 9127

E-mail: nattaneeporn.n@rmutsv.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: งานอนุรักษ์สถาปัตยกรรมและชุมชน, การมีส่วนร่วม, การ
ออกแบบพื้นที่สาธารณะ และการจัดการสิ่งแวดล้อมเมือง



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ สาขาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ที่อยู่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัด
สงขลา 90000 เบอร์ติดต่อ 088 340 3799 E-mail: chalat.t@rmutsv.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมความปลอดภัยทางถนน, วิศวกรรมจราจรและ
วางแผนการขนส่ง และงานด้านวัสดุวิศวกรรม

Article History:

Received: November 24, 2022

Revised: August 11, 2023

Accepted: August 11, 2023

อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาต่อการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง กรณีศึกษา: เหล็กหัวสียฟ้า

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND TIME ON PLASMA NITRIDING HARDENING OF BLUE HEAD STEEL

นภนต์ เกื่อน้อย¹ จอมภพ ละออ² จีรวรรณ ปลั่งใหม่³ ประจักษ์ ลำจวน⁴

และ อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ⁵

^{1,2,3,4,5}อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต, 1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250,

¹t.naphon@gmail.com, ²jomphopl@gmail.com, ³jeerawat2556@gmail.com,

⁴prajakl@gmail.com, ⁵ubonrat.war@kbu.ac.th

Naphon Keanoi¹, Jomphop La-or², Jeerawat Plongmai³, Prajak lamjuan⁴

and Ubonrat Warichwattana⁵

^{1,2,3,4,5}Lecturer, Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Engineering

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

¹t.naphon@gmail.com, ²jomphopl@gmail.com, ³jeerawat2556@gmail.com,

⁴prajakl@gmail.com, ⁵ubonrat.war@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับ อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาต่อการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิงของเหล็กหัวสียฟ้า วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสียฟ้า ก่อน-หลังจากการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง เหล็กที่นำมาทดลองเป็นเหล็กหัวสียฟ้า ซ้อมาจำนวน 10 บริษัทและร้านค้าที่จำหน่าย ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหัวสียฟ้า จัดอยู่เหล็กกล้าผสมต่ำ (AISI 4140 หรือ JIS SCM 440) โครงสร้างจุลภาคเป็นเพิร์ลไลต์และเฟอร์ไรต์ หลังการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง โครงสร้างจุลภาคขอบด้านนอกเป็น γ' -Compound (Fe_4N) ชั้นในเป็นเพิร์ลไลต์ละเอียด และเฟอร์ไรต์ละเอียด ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสียฟ้าก่อนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิงวัดได้ 230 HV ผลการทดลองเวลาอบแช่ที่เหมาะสมคือ 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเผา 550 °C มีความแข็งที่ผิว 1,450 HV

คำสำคัญ: การชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง, เหล็กหัวสียฟ้า, AISI 4140, JIS SCM 440

ABSTRACT

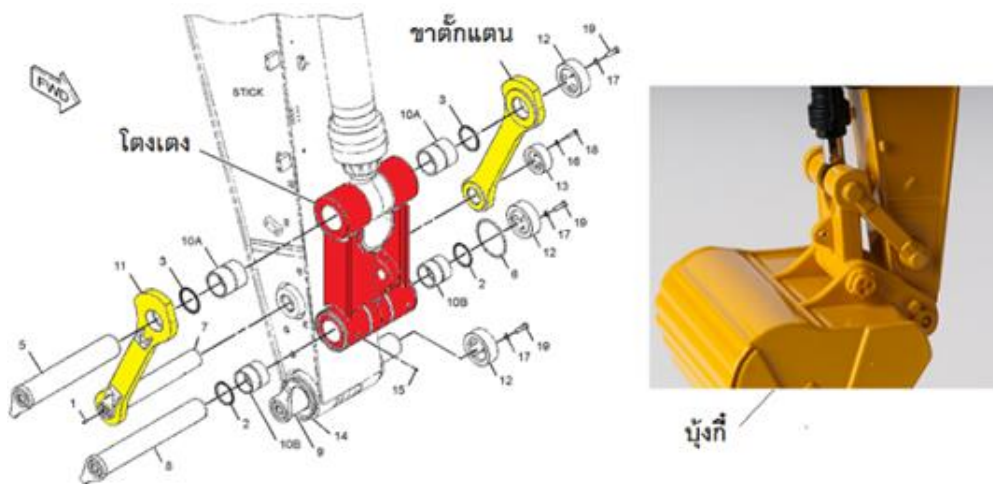
In this research, Influence of temperature and time in surface hardening on plasma nitriding of blue head steel. Objectives to study the chemical composition microstructure and surface hardness of blue head steel before and after plasma nitriding treatment. Steel used in the experiment is a blue head steel so bought in the amount of 10 companies and stores that sell it. The results of a study on the chemical composition of blue head steel classified as low alloy steel (AISI 4140 or JIS SCM 440). It has a microstructure of pearlite and ferrite. After plasma nitriding treatment. The microstructure of the outer surface is γ' -Compound (Fe_4N) inner layer is fine pearlite and fine ferrite. The result of surface hardness before plasma nitriding treatment is 230 HV. A result of good condition is sintering time 20 hour at 550 °C outer surface hardness measured 1,450 HV.

KEYWORDS: Plasma nitriding hardening, blue head steel, AISI 4140, JIS SCM 440

1. บทนำ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆของประเทศไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ ผลิตจากพลาสติกและโลหะเป็นประกอบที่สำคัญ ดังนั้นการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ดังเช่น ชิ้นส่วนตักดินของรถขุดแบ็คโฮ ในปัจจุบันรถขุดแบ็คโฮที่ใช้ในงานก่อสร้างซึ่งประกอบด้วย ตัวรถ ช่วงล่างของเครื่องยนต์ แขนยก ส่วนจับบังคับที่ขุด และบังคับขุด ช่วงล่างของเครื่องยนต์ประกอบไปด้วยเครื่องยนต์และเฟืองที่ช่วยขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ ตัวรถประกอบไปด้วยเครื่องจักร น้ำมันและกระบอกเชื้อเพลิง ตัวรถจะติดอยู่กับช่วงล่างของเครื่องยนต์โดยมีเฟืองศูนย์กลางเป็นตัวเชื่อมเพื่อให้ตัวรถสามารถหมุนได้ 360° หรือแม่พิมพ์ ไม่ว่าจะเป็นแม่พิมพ์โลหะหรือแม่พิมพ์พลาสติก ชิ้นส่วนที่ประกอบเข้าด้วยกันจะต้องมีการเสียดสี ทำให้ชิ้นส่วนบริเวณนั้นเกิดการสึกหรอ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในชิ้นส่วนของรถขุดแบ็คโฮ คือ สลักชิ้นส่วนที่ 5 และ 7 ดังรูปที่ 1 บางครั้งอาจมีการเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวเฉพาะบริเวณผิว เพื่อยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนนั้น ๆ ให้นานขึ้น กระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้ามีหลายกระบวนการเกี่ยวกับการชุบแข็ง การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรนั้น นอกจากจะต้องมีความละเอียดถูกต้องตามแบบกำหนดไว้แล้ว ยังมีปัจจัยต้องพิจารณาถึงความทนทานในการใช้งานด้วย โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องประกอบเข้าด้วยกันมีการสัมผัสเสียดสีกันในขณะที่เคลื่อนที่ ต้องมีผิวที่แข็งแรงทนทานต่อการสึกหรอ และยังมีความทนทานต่อการใช้งานได้ดีด้วย จึงมีกรรมวิธีนำเหล็กปรับปรุงคุณสมบัติที่ทนทาน ทนการเสียดสีต่อการใช้งานหนัก ซึ่งเรียกว่า การชุบผิวแข็ง [1-3] ซึ่งพลาสมาไนไตรดิงเป็นกรรมวิธี Surface Treatment ชนิดหนึ่งเพื่อให้ทนทานต่อการสึกหรอและทนทานต่อ

Dynamic Stresses โดยเป็นการให้ไนโตรเจนแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับอัลลอยของธาตุโลหะหลักของโลหะนั้น ๆ ที่บริเวณผิวของโลหะ ซึ่งจะทำให้ผิวมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นจากโลหะไนไตรด์ ซึ่งเป็นเฟสธรรมชาติทำให้ผิวแข็งประมาณ 1050-1100 HV ที่ความลึก 0.25-0.90 มม. รวมทั้งยังทำให้สามารถเพิ่มอายุการใช้งานจากการเพิ่มความต้านทานต่อความล้าได้เพิ่มมากขึ้น โดยวิธีพลาสมาไนไตรดิงนี้จะนำมาเพิ่มความแข็งที่ผิวให้กับชิ้นงานโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้ว ซึ่งมักจะนำมาเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ พลาสมาไนไตรดิงจะทำในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก (ประมาณ 450-600 °C) ซึ่งยังไม่ถึงอุณหภูมิที่จะทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟส Austenite ทำให้สามารถลดปัญหาด้านการงอและโก่งตัวระหว่างกระบวนการได้ เวลาที่ใช้ในการทำพลาสมาไนไตรดิงอยู่ที่ 20-100 ชั่วโมง ส่วนมากในงานวิจัยใช้อุณหภูมิ 450 °C และนิยมใช้กับเหล็กสแตนเลส วัตถุประสงค์การวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสีฟ้าหลังจากการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง และเหตุผลของผู้วิจัยอีกประการหนึ่งคือ พลาสมาไนไตรดิงมีความแข็งผิว 1050-1100 HV และบริเวณที่อยู่ลึกลงไปประมาณ 0.03-0.08 มม. จะแข็งมากที่สุด และทนทานต่อการกัดกร่อนต่าง ๆ ได้ดีมาก [4-14]



รูปที่ 1 กลไกกันต่อสำหรับปั๊ม [15]

จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยมีความสนใจเหล็กที่วางจำหน่ายในท้องตลาด โดยเฉพาะจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นจังหวัดที่เจริญด้วยอุตสาหกรรม โดยจัดหาจากบริษัทและร้านจำหน่ายเหล็กในจังหวัดสมุทรปราการจำนวน 10 ร้าน ผู้วิจัยมีความสนใจเหล็กโดยเฉพาะเหล็กหัวสีฟ้า และกระบวนการที่นำมาใช้ในการชุบผิวแข็งคือ การชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสียฟ้า ก่อน-หลังจากการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ เหล็กหัวสียฟ้า

3.2 การเทียบมาตรฐานใช้มาตรฐาน AISI, JIS

3.3 เวลาอบแช่คงที่ 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิเผา 520 °C 550 °C และ 570 °C และ อุณหภูมิเผา คงที่ 550 °C ที่เวลาอบแช่ 15 20 และ 40 ชั่วโมง

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 จัดซื้อเหล็กหัวสียฟ้า จำนวน 10 ร้าน เป็นบริษัทและร้านจำหน่ายเหล็กในจังหวัดสมุทรปราการ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มม. ยาว 1 เมตร แล้วนำตัดซอยยาว 25 มม. จำนวน 20 ชิ้น ตัดด้วยเครื่องตัดเหล็กแล้วกลึงปาดหน้าให้ผิวเรียบ ต่อจากนั้นนำไปขัดกระดาษทรายจากเบอร์ 100 400 600 และ 1,000 ทั้ง 2 ด้าน โดยขึ้นทดลองจำนวน 10 ชิ้นแรก นำไปทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องทดสอบส่วนผสมทางเคมี แบบ Optical Emission Spectrometer ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 อีก 10 ชิ้นที่เหลือ นำไปขัดผ้าสักหลาด แล้วนำไปจุ่มชุบด้วยกรดไนตริก (HNO₃) แล้วนำส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ OLYMPUS CX23 ใช้กำลังขยาย 10X 40X และ 60X เพื่อตรวจดูโครงสร้างจุลภาค และวัดความแข็งที่ผิว

4.2 ตัดเหล็กหัวสียฟายาว 25 มม. จำนวน 60 ชิ้น ด้วยเครื่องตัดเหล็กแล้วนำไปกลึงปาดหน้าให้ผิวเรียบต่อจากนั้นนำไปขัดกระดาษทรายจากเบอร์ 100 400 600 และ 1,000 แล้วนำขึ้นทดลองจำนวน 30 ชิ้น ไปผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง ซึ่งใช้อุณหภูมิเผา 520 °C 550 °C และ 570 °C โดยใช้เวลาอบแช่คงที่ 20 ชั่วโมง และอีกจำนวน 30 ชิ้น ใช้อุณหภูมิเผาคงที่ 550 °C ใช้เวลาอบแช่นาน 15 20 และ 40 ชั่วโมง เมื่อได้อุณหภูมิและเวลาตามกำหนดแล้วนำขึ้นทดลองจุ่มลงในน้ำ ต่อจากนั้นนำขึ้นทดลองทั้งหมดไปขัดกระดาษทรายจากเบอร์ 100 400 600 และ 1,000 ทั้ง 2 ด้าน ด้านหนึ่งนำไปวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ยี่ห้อ TORSEE TDMH-1 อีกด้านหนึ่งนำไปขัดผ้าสักหลาด แล้วนำไปจุ่มชุบด้วยกรดไนตริก (HNO₃) แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้กำลังขยาย 10X 40X และ 60X เพื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาค

4.3 การทดสอบส่วนผสมเคมีได้นำขึ้นทดลองไปทดสอบโดยใช้เครื่องมือในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยใช้ แบบ Optical Emission Spectrometer

5. ผลการวิจัย

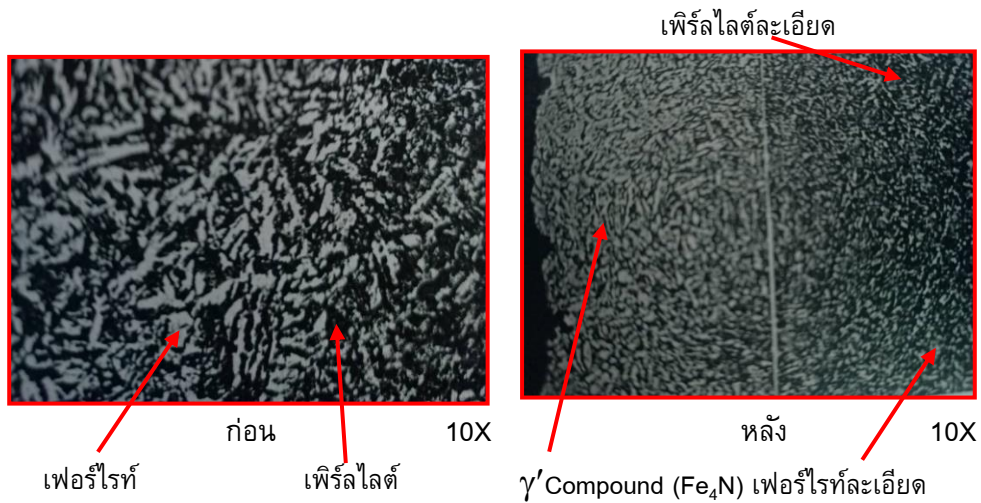
ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหัวสียฟ้าก่อนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง เทียบกับมาตรฐานเหล็กกล้า ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหัวสียฟ้าเทียบมาตรฐาน AISI 4140 และ JIS SCM 440

รหัสฐาน	ส่วนผสมทางเคมี % โดยน้ำหนัก				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
1S	0.42	0.30	0.64	0.97	0.17
2S	0.40	0.27	0.64	0.91	0.17
3S	0.35	0.21	0.83	1.05	0.21
4S	0.37	0.34	0.64	0.93	0.19
5S	0.42	0.30	0.72	0.982	0.16
6S	0.35	0.24	0.59	1.01	0.23
7S	0.38	0.27	0.66	0.90	0.16
8S	0.39	0.35	0.64	1.02	0.17
9S	0.40	0.27	0.73	0.82	0.18
10S	0.37	0.28	0.72	0.92	0.17
ค่าเฉลี่ย	0.39	0.28	0.70	0.90	0.17
มาตรฐาน	ส่วนผสมทางเคมี % โดยน้ำหนัก				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
AISI 4140	0.38-0.45	0.10-0.40	0.60-0.90	0.90-1.20	0.12-0.30
JIS SCM 440					

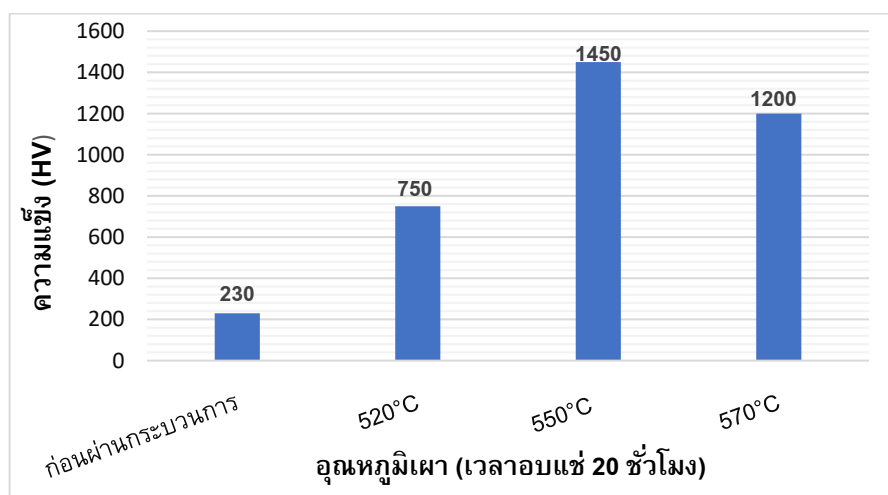
จากตารางที่ 1 การวิเคราะห์ธาตุหลักที่ผสมมี C = 0.38-0.45 % Si = 0.10-0.40 % Mn = 0.60-0.90% Cr = 0.90-1.20 % และ Mo = 0.12-0.30 % ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน AISI 4140 [16] และ JIS SCM 440 [17] จัดอยู่ชนิดเหล็กกล้าผสมต่ำ

เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหัวสียฟ้าก่อนและหลังการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง ได้ผลโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 2



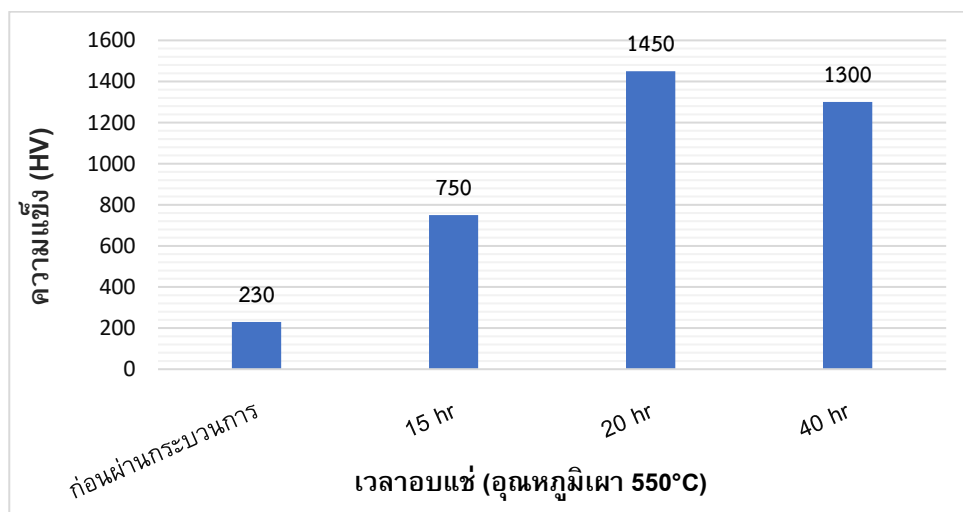
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง

จากรูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคก่อนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง เหล็กหัวสียามีโครงสร้างจุลภาคเป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และหลังการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง ขอบด้านนอกจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็น γ' -Compound (Fe_4N) ชั้นในเป็นโครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลต์ละเอียด (Fine Pearlite) และเฟอร์ไรท์ละเอียด (Fine Ferrite) เมื่อนำไปทดสอบความแข็งหลังผ่านการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง โดยใช้เวลาอบแช่คงที่ 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเผา 520 °C 550 °C และ 570 °C แล้วนำมาเปรียบเทียบบ้างดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบความแข็งที่ผิว ที่อุณหภูมิเผา 520 °C 550 °C และ 570 °C เวลาอบแช่คงที่ 20 ชั่วโมง

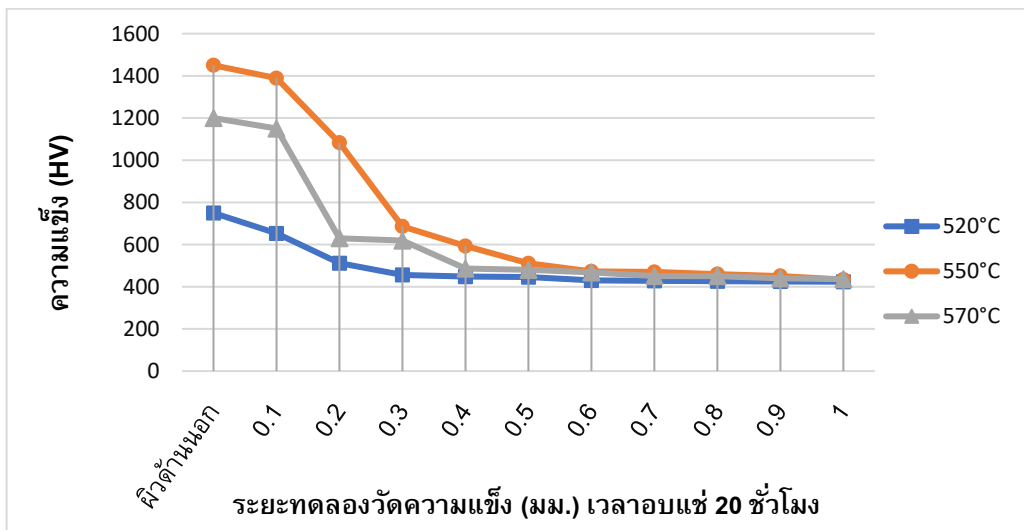
จากรูปที่ 3 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสีฟ้าก่อนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิงโดยใช้แรงกด 120 kgf วัดความแข็งที่ผิวได้ 230 HV ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสีฟ้าหลังผ่านการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง ณ เวลาอบแช่คงที่ 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิเผา 520 °C 550 °C และ 570 °C ตามลำดับ วัดความแข็งที่ผิวได้ 750 HV 1,450 HV และ 1,200 HV ตามลำดับ และอุณหภูมิเผาที่ได้ความแข็งสูงสุดคือ 550 °C



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบความแข็งที่ผิว ณ เวลาอบแช่ 15 20 และ 40 ชั่วโมง อุณหภูมิเผาคงที่ 550 °C

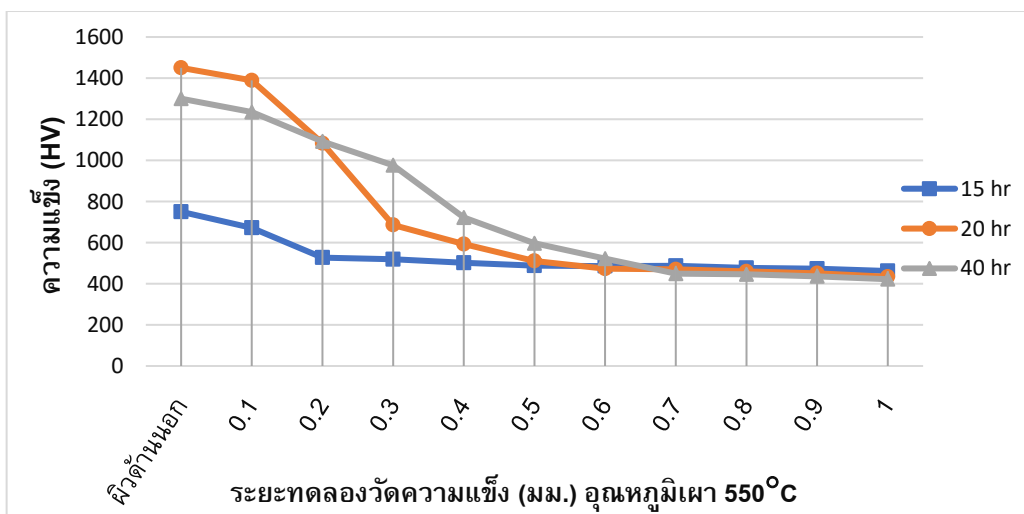
จากรูปที่ 4 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสีฟ้าก่อนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง โดยใช้แรงกด 120 kgf วัดความแข็งที่ผิวได้ 230 HV ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสีฟ้าหลังผ่านการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง ณ อุณหภูมิเผาคงที่ 550 °C เวลาอบแช่ 15 20 และ 40 ชั่วโมง ตามลำดับ วัดความแข็งที่ผิวได้ 750 HV 1,450 HV และ 1,300 HV ตามลำดับ และเวลาอบแช่ที่ได้ความแข็งสูงสุดคือ 20 ชั่วโมง

เมื่อนำชิ้นทดลองมาทดสอบความแข็ง โดยวัดระยะห่างจากผิวด้านนอกของชิ้นทดลองห่างกันครั้งละ 0.1 มม. ถึง ระยะ 1 มม. ผลปรากฏดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6



รูปที่ 5 การทดสอบความแข็งที่ผิวด้านนอกห่างกันครั้งละ 0.1 มม. ถึง ระยะ 1 มม. ณ เวลาอบแห้งที่ 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเผา 520°C 550°C และ 570°C

จากรูปที่ 5 นำเหล็กหัวสัฟไฟหลังผ่านการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง ณ เวลาอบแห้งที่ 20 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิเผา 520 °C 550 °C และ 570 °C เมื่อนำมาทดสอบความแข็งที่ผิว โดยมีระยะห่างจากผิวด้านนอกของชิ้นทดลองห่างกันครั้งละ 0.1 มม. ถึงระยะ 1 มม. ผลการทดสอบอุณหภูมิเผา 550 °C วัดความแข็งที่ผิวได้สูงสุด 1,450 HV



รูปที่ 6 การทดสอบความแข็งที่ผิวด้านนอกห่างกันครั้งละ 0.1 มม. ถึง ระยะ 1 มม. ณ อุณหภูมิเผาที่ 550 °C เวลาอบแห้ง 15 20 และ 40 ชั่วโมง

จากรูปที่ 6 เมื่อนำเหล็กหัวสียฟ้าหลังผ่านการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง ณ อุณหภูมิเผาครั้งที่ 550 °C เวลาอบแช่ 15 20 และ 40 ชั่วโมง นำมาทดสอบความแข็งที่ผิว โดยมีระยะห่างจากผิวด้านนอกของชั้นทดลองห่างกันครั้งละ 0.1 มม. ถึงระยะ 1 มม. ผลการทดสอบ เวลาอบแช่ 20 ชั่วโมง วัดความแข็งที่ผิวได้สูงสุด 1,450 HV

6. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบส่วนผสมเคมีของเหล็กหัวสียฟ้าตามเกณฑ์มาตรฐานของเหล็กกล้า จัดอยู่ในชนิดเหล็กกล้าผสมต่ำ ตรงกับมาตรฐานเหล็กของอเมริกา (AISI) เกรด AISI 4140 [16] และ มาตรฐานญี่ปุ่น (JIS) เกรด SCM 440 [17] ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหัวสียฟ้าก่อนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และหลังการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง มีโครงสร้างจุลภาคขอบด้านนอกเป็น γ' -Compound (Fe_4N) ชั้นในของชั้นทดลองมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเพิร์ลไลต์ละเอียด (Fine Pearlite) และเฟอร์ไรท์ละเอียด (Fine Ferrite) [6-8] ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของเหล็กหัวสียฟ้าก่อนการชุบผิวแข็งแบบพลาสมาไนไตรดิง วัดความแข็งที่ผิวได้ 230 HV

ผลการทดลองเวลาอบแช่ครั้งที่ 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเผา 520 °C 550 °C และ 570 °C มีความแข็งที่ผิว 750 HV 1,450 HV และ 1,200 HV ความแข็งจากผิวด้านนอกของชั้นทดลอง 1 มม. มีความแข็ง 424 HV 436 HV และ 436 HV ตามลำดับ ผลการทดลองอุณหภูมิเผาครั้งที่ 550 °C เวลาอบแช่ 15 20 และ 40 ชั่วโมง มีความแข็งที่ผิว 750 HV 1,450 HV และ 1,300 HV ความแข็งจากผิวด้านนอกของชั้นทดลอง 1 มม. มีความแข็ง 424 HV 434 HV และ 436 HV ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Wattanasriyakul [14] และ Kaewnisai [18] และประโยชน์ที่ได้รับคือ สามารถพัฒนาวิธีการทำพลาสมาไนไตรดิงและทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำพลาสมาไนไตรดิงบนเหล็กกล้าผสมต่ำและผสมสูง ในอุตสาหกรรมที่ใช้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องความแข็งผิวและความเหนียว และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผิวทนต่อการสึกหรอ ข้อดีของการชุบผิวแข็งโดยวิธีพลาสมาไนไตรดิงคือ ชิ้นงานได้ผ่านการทำ Heat-treatment มาก่อนทำ Nitriding จึงไม่มีโอกาสที่ชิ้นงานจะบิดงอหรือแตกร้าว และหลังจากผ่านการทำ Nitriding แล้วจะไม่มีผิวนูนหรือรอยขีดข่วนในเนื้อโลหะ ในขณะที่ผิวชิ้นงานมีลักษณะแข็งมาก คือประมาณ 1050-1100 HV และบริเวณที่อยู่ลึกลงไปประมาณ 0.03-0.08 มม. จะแข็งมากที่สุด และทนทานต่อการกัดกร่อนต่าง ๆ ได้ดีมาก

References

- [1] Ponsorn S, Kongseng P. The effect of hardening factor on microstructure and hardness in water, oil and air quenched AISI 4140 and AISI 1045. [Thesis]. Phitsanulok: Naresuan University; 2009. (In Thai)
- [2] Runraksa K, Hirunkerd C, Chapchaimoh K. Improvement on preventive maintenance of AISI 4140 Rim-Sprocket part by heat treatment process. A study of the heat treatment process of excavated nails manufactured with grade 4140 steel. Proceedings of the 8th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference (ESTACON 2017); 2017 Jul 21, Khon Kaen, Thailand. pp.514-18. (In Thai)
- [3] Hanwirotkul T. Low alloy steel for machine work. MTEC Journal 2011;62:8-12. (In Thai)
- [4] Callister WD, Rethwisch DG. Fundamentals of materials science and engineering. 4thed. Singapore: John Wiley & Sons; 2013.
- [5] Smith WF. Structure and Properties of Engineering Alloys. 2nded. USA: McGraw-Hill; 2006.
- [6] Zagonel LF, Figueroa CA, Droppa R, Alvarez F. Influence of the process temperature on the steel microstructure and hardening in pulsed plasma nitriding. Surface and Coatings Technology 2006;201(1-2):452-7.
- [7] Liu Y, Liu D, Zhang X, Li W, Ma A, Fan K, et al. Effect of alloying elements and low temperature plasma nitriding on corrosion resistance of stainless steel. Materials 2022;15:6575.
- [8] Yakita K, Ohki C. Plasma Nitriding Treatment of High Alloy Steel for Bearing Components. NTN Technical review 2010;78:33-40.
- [9] Berg M, Budtz-Jørgensen CV, Reitz H, Schweitz KO, Chevallier J, Kringhøj P, et al. On plasma nitriding of Steels. Surface and Coatings Technology 2000;124(1):25-31.
- [10] Kunz C, Georges J, Collignon P. Active screen plasma nitriding - an efficient, new plasma nitriding technology. Industrial Heating 2012;80:28.
- [11] Rembges W, Oppel W. Process control of plasma nitriding and plasma nitrocarburizing in industry. Surface and Coatings Technology 1993;59(1-3):129-34.
- [12] Kaewploy S. Optimal parameter in tempering of alloy steels using response surface methodology. Thai Industrial Engineering Network Journal 2016;2(2):53-7. (In Thai)
- [13] Thammachot N. Engineering materials. Bangkok, Thailand: SE-ED Publisher; 2015. (In Thai)

- [14] Wattanasriyakul S. The use of reverse engineering for the determination of thermal properties of mechanical parts. MTEC journal 2001;25:37-42. (In Thai)
- [15] Hydraulikgarten.wordpress.com. Parts of backhoe [Internet]. 2018 [cited on 2022 Dec 11] Available from: <https://hydraulikgarten.wordpress.com/author/hydraulikgarten/> (In Thai)
- [16] Bringas JE, editor. Handbook of comparative world steel standards. 3rd ed. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2004.
- [17] Japanese Standard Association. JIS G 4053. Low-alloyed steels for machine Structure Use. Tokyo, Japan: Japanese Standard Association; 1979.
- [18] Kaewnissai S. Surface hardening of tool steel using low-temperature plasma nitriding [Thesis]. Mahasarakham: Mahasarakham University; 2021. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



นภนต์ เกื้อน้อย ปัจจุบันตำแหน่งอาจารย์พิเศษ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต การศึกษาระดับปริญญาตรี ค.อ.บ.วิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน การศึกษาระดับปริญญาโท วศ.ม.เทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การศึกษาระดับปริญญาเอก ปร.ด.เทคโนโลยีพลังงาน และการจัดการสิ่งแวดล้อมแบบยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

E-mail: t.naphon@gmail.com



จอมภพ ละออ ปัจจุบันตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต การศึกษาระดับปริญญาตรี อส.บ.เทคโนโลยีการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การศึกษาระดับปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: jomphopl@gmail.com



จิรวัดณ์ ปล้องใหม่ ปัจจุบันตำแหน่งหัวหน้าสาขาวิชาเทคโนโลยี วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต การศึกษาระดับปริญญาตรี อส.บ.วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต การศึกษาระดับปริญญาโท บธ.ม.การจัดการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และ วศ.ม.วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-Mail: jeerawat2556p@gmail.com



ประจักร ลำจวน ปัจจุบันตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยี วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต การศึกษาระดับปริญญาตรี อส.บ. เทคโนโลยีเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การศึกษาระดับปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-Mail: prajakl@gmail.com



อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ ปัจจุบันตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล การศึกษาระดับปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-Mail: ubonrat.war@kbu.ac.th

Article History:

Received: July 18, 2022

Revised: August 18, 2023

Accepted: August 21, 2023

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดฝาเกลียวพลาสติกประเภท
วัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพื่อลดปัญหาการหดตัว: กรณีศึกษา
**OPTIMAL FACTOR ANALYSIS IN THE INJECTION PROCESS OF
HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PLASTIC SCREW CAPS TO REDUCE
SHRINKAGE PROBLEMS: A CASE STUDY**

ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง^{1*} และ อติเรก ชัยนวกุล²

^{1,2}อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมืองเชียงใหม่
จังหวัดเชียงใหม่ 50300,

¹supasit.m@rmutl.ac.th, ²adirake@rmutl.ac.th

Supasit Manokruang¹ and Adirake Chainawakul²

^{1,2}Lecturer, Tools and Die Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang Chiang Mai 50300, Thailand

¹supasit.m@rmutl.ac.th, ²adirake@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมพลาสติกมีบทบาทที่สำคัญกับอุตสาหกรรมทั้งภายในและภายนอกของประเทศ คุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงสิ่งสำคัญของการผลิตโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีการประกอบเข้าด้วยกัน (Assembly) ปัญหาของผลิตภัณฑ์ที่เกิดมีหลากหลายสาเหตุ การหดตัว (Shrinkage) เป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยงานวิจัยนี้เป็นการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำพลาสติกประเภทวัสดุไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High-Density Polyethylene : HDPE) ซึ่งการหดตัวของชิ้นงานส่งผลต่อการประกอบระหว่างฝาเกลียวขวดน้ำกับขวดน้ำ งานวิจัยนี้จึงใช้หลักการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การหดตัวของชิ้นงาน คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm), อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Tw), และอุณหภูมิการหล่อเย็น (Tc) ทำการทดลอง $8+1 = 9$ การทดลอง และทดลองจำนวน 2 ขั้ว ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ (α) 95% รวมทั้งหมด 18 การทดลอง ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ อยู่ที่ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm) เท่ากับ 190 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Tw)

เท่ากับ 60°C และอุณหภูมิหล่อเย็น (T_c) เท่ากับ 45°C ซึ่งมีค่าการหดตัวน้อยที่สุดคือ 1.39% และพบว่าปริมาณของเสียลดลงเหลือ 12.08% ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการนำทฤษฎีหลักการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เข้ามาช่วยหาปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อการหดตัวนั้นส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานนั้นเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ทั้งนี้ยังพบว่าสามารถลดต้นทุนและเวลาในการผลิตลง

คำสำคัญ: ปัจจัยที่ส่งผล, พื้นผิวตอบสนอง, การหดตัว, โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง

ABSTRACT

Nowadays, the plastics industry plays an essential role in the country's internal and external industries. Especially assembled products, product quality is an essential aspect of production. There are various product problems. Shrinkage is an inevitable problem with plastic products. This research is to determine the factors that affect the shrinkage of the screw cap of the plastic bottle made of High-Density Polyethylene (HDPE) material, where the shrinkage of the workpiece affects the assembly between the screw cap of the water bottle and the water bottle. Therefore, Response Surface Methodology (RSM) experimental design principles was used to determine the factor affecting the shrinkage of the workpiece, namely the melt temperature of plastic (T_m), mold temperature (T_w), and cooling temperature (T_c). The 9 (8+1) experiments were performed with 2 replications at a confidence level of (α) 95 %. A total of 18 experiments found that the significant relevant factor affecting the shrinkage of the bottle cap specimens was the melting temperature of plastic (T_m) of 190°C , the mold temperature (T_w) of 60°C and cooling temperature (T_c) is 45°C , with a minimum shrinkage of 1.39% and can be found that defects decreasing were 12.08%. Therefore, it can be concluded that applying the Responsive Surface Method (RSM) experimental design principles to help determine the appropriate factor that transmits the minimal shrinkage effect affects the quality and reduce production costs of the bottle cap.

KEYWORDS: Factor; Response surface; Shrinkage; High-Density Polyethylene

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก โดยการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนมากเกิดขึ้นจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เนื่องจากให้อัตราการผลิตได้ปริมาณมาก และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างดี [1, 2]

การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลาสติกจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและลดต้นทุนการผลิตเป็นเป้าหมายหลัก แต่สิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือการเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ที่เกิดกับผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น การหดตัว (Shrinkage) [2-4] การเกิดรอยพ่น (Jetting) [5] การเกิดครีบ (Flashing) [6-8] การเกิดรอยไหม้ (Burn mark) [7, 8] การเกิดรอยแห้ว (Shot shot) [8] การเกิดรอยยุบ (Sink mark) [7-9] รอยเชื่อมชน (Weld line) [7] และการเกิดการโก่งงอ (Warping) [7, 8, 10] เป็นต้น ซึ่งแต่ละข้อบกพร่องมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้เน้นไปที่ข้อบกพร่องการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำด้วยวัสดุ วัสดุไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High-Density Polyethylene: HDPE) [2] เนื่องจากเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการประกอบเข้ากับขวดน้ำ ที่ไม่สามารถประกอบเข้าด้วยกันได้ เมื่อเกิดการหดตัว ขนาดของฝาเกลียวขวดน้ำไม่ตรงตามที่แบบกำหนด [4] จึงเป็นที่มาของการหาสาเหตุการเกิดปัญหานี้ ทั้งนี้การหดตัว (Shrinkage) มีสาเหตุหลักเกิดจากการออกแบบแม่พิมพ์ ชนิดวัสดุ และพารามิเตอร์ของการฉีด เมื่อพิจารณาสาเหตุข้างต้น พารามิเตอร์ของการฉีด เป็นสาเหตุที่ส่งผลโดยตรงกับคุณภาพฝาเกลียวขวดน้ำโดยพารามิเตอร์ของการฉีดประกอบไปด้วย อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (T_m) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (T_w) และอุณหภูมิการหล่อเย็น (T_c) [11]

ดังนั้น จึงนำแนวคิดออกแบบหลักการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) [12] เข้ามาช่วยหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ เพื่อลดปัญหาที่เกิดข้อบกพร่องของการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพของการฉีดให้ดีขึ้นด้วย

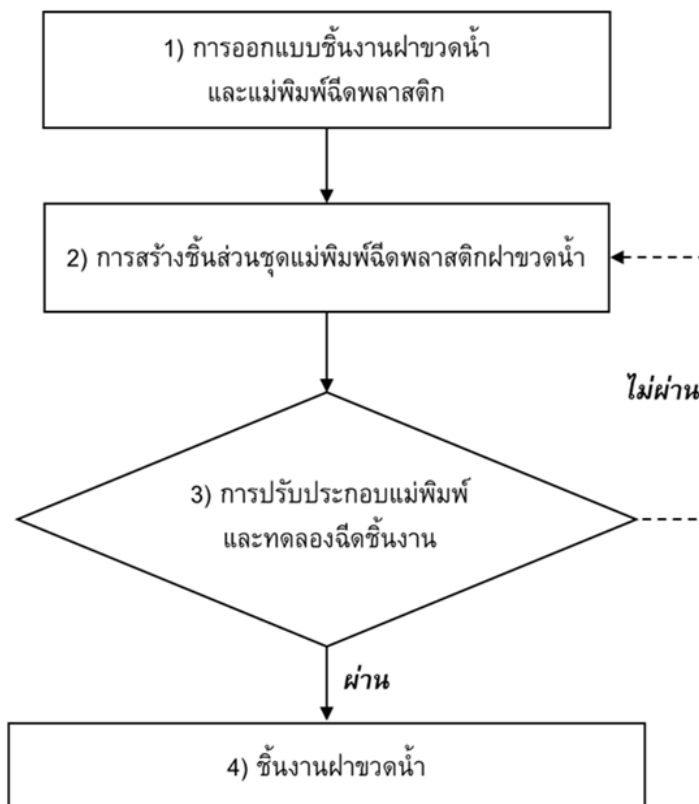
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุฝาเกลียวขวดน้ำ ไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High density polyethylene: HDPE)

พลาสติกชนิดไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High density polyethylene: HDPE) จัดอยู่ในกลุ่ม Semi crystalline โครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งสาขา (Branching) และมีการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง เป็นพลาสติกที่มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัวเอง ยืดหยุ่นได้ดี และที่สำคัญ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความเหนียว แต่ทนความร้อนได้ไม่มากนัก ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี (Chemical) เป็นฉนวนไฟฟ้า และการหดตัวสูง [2-4] เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ โดยสมบัติของวัสดุที่ควรคำนึงถึง คือ หนาแน่นของวัสดุ 0.96 g/cm^3 อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เป็นปัจจัยหลัก โดยมีพารามิเตอร์ของวัสดุ HDPE อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) อยู่ที่ $190\text{--}240\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature, T_w) อยู่ที่ $30\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13]

2.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฝากล้วยขวิดน้ำ

การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกฝากล้วยขวิดน้ำ โดยเริ่มจากการออกแบบชิ้นงานฝากล้วยขวิดน้ำและแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer aided design: CAD) [14] จากนั้นผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer aided manufacturing: CAM) [15] การปรับประกอบชุดแม่พิมพ์ฝากล้วยขวิดน้ำ การทดลองการฉีดชิ้นงานฝากล้วยขวิดน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการปรับตั้งพารามิเตอร์การฉีด คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (T_m) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (T_w) และอุณหภูมิการหล่อเย็น (T_c) และได้รับชิ้นงานฝากล้วยขวิดน้ำตามที่ต้องการแบบ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฝากล้วยขวิดน้ำ

2.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ที่ต้องการศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design) [16] เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หลาย ๆ

ปัจจัยของ (Factor) ร่วมกันจึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆในแต่ละครั้งได้ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ อิทธิพลหลัก (Main effect) และ อิทธิพลร่วม (Interaction effect) [17] โดยมีงานวิจัยดังต่อไปนี้ กล่าวถึงการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ABS โดยการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเข้ามาช่วย มีปัจจัยที่ได้ทำการศึกษา ทั้งหมด 8 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการฉีด แรงดันฉีด ระยะการเปลี่ยนแปลงฉีดอัดย้า เวลาฉีดย้า อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น จากผลการจำลองกระบวนการฉีดพบว่าปัจจัยที่ส่งผลอิทธิพลต่อการเสียรูปของชิ้นงาน ได้แก่ เวลาหล่อเย็น อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก เวลาฉีดย้า และอัตราการฉีด ทำให้งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีด เพื่อลดต้นทุนและเวลาการผลิตได้อย่างเหมาะสม

2.4 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM)

วิธีการรวบรวมนำเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา ในปัญหาผิวตอบสนองส่วนมากจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้จะใช้ ดังแสดงสมการที่ 1 [18]

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Oliaei, et al [19] กล่าวถึงการหาการหดตัว และการบิดตัวของชิ้นงานขึ้นรูปพลาสติกที่เหมาะสม โดยใช้การออกแบบการทดลอง Taguchi ANOVA และ Artificial neural Network เข้ามาวิเคราะห์ปัญหา 5 ปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิหล่อเย็น เวลาฉีดย้า แรงดันฉีดย้า อุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิในการหลอมเหลว สามารถสรุปอิทธิพลที่มีผลต่อการหดตัว และการบิดตัวของชิ้นงานขึ้นรูปพลาสติก สรุปความสัมพันธ์ของปัจจัย อุณหภูมิหล่อเย็น เวลาฉีดย้า และอุณหภูมิในการหลอมเหลว ของวัสดุ Polylactic acid / Polyurethane (PLA-TPU)

Wang, et al [20] กล่าวถึงระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบระบบหล่อเย็น ร้อน และเย็น โดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) หาอุณหภูมิที่เหมาะสมบริเวณคาร์วิตซ์ของแม่พิมพ์ เพื่อให้เกิดความเค้นต่อชิ้นงานน้อยที่สุด และเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

Ruennareenard [21] การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นเพลทยัดติดกระดูกจากวัสดุประสมของไฮดรอกซีอะปะไทต์ และแก้วชีวภาพ โดยใช้แนวทางในการศึกษาการขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูปตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนกลาง โดยมีปัจจัยที่

สำคัญในการขึ้นรูป คือ ส่วนผสมของแก้วชีวภาพ ความดันในการอัดขึ้นรูป และเวลาในการอัดขึ้นรูป เพื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน และลดเวลาในการผลิต

Sudsawat [22] ศึกษาพารามิเตอร์ของการฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานของการโก่งงอ (Warpage) และการหดตัว (Shrinkage) การออกแบบการทดลองด้วยพื้นผิวตอบสนอง (Respond surface method: RSM) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์การฉีด คือ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) อัตราการไหลของวัสดุ (Flow rate) แรงดันฉีด (Injection pressure) เวลาฉีดเข้า (Packing time) แรงดันฉีดเข้า (Packing pressure) และเวลาการหล่อเย็น (Cooling time) ผลการทดลองสรุปได้ว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) และเวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องด้านการโก่งงอ (Warpage) และการหดตัว (Shrinkage)

3. วิธีการทดลอง

จากที่ได้กล่าวในส่วนข้างต้นถึงสาเหตุที่ส่งผลโดยตรงกับคุณภาพฝาเกลียวขวดน้ำ โดยพารามิเตอร์ของการฉีดประกอบไปด้วย อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (T_m) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (T_w) และอุณหภูมิการหล่อเย็น (T_c) ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้ทำให้เกิดปัญหาการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำจึงเป็นที่มาในการกำหนดปัจจัยการออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 การกำหนดปัจจัยการทดลอง

เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปฝาเกลียวขวดน้ำวัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) จึงกำหนดปัจจัยการทดลองออกเป็น 3 ปัจจัย และ 2 ระดับ โดยกำหนดให้ response (Y) คือ การหดตัวของชิ้นงานฉีด (Shrinkage) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานน้อยที่สุด (Minimize) การทดลองในการฉีดขึ้นรูปฝาเกลียวขวดน้ำ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับการทดลองในการฉีดขึ้นรูปฝาเกลียวขวดน้ำ [13]

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับ (°C)	
		ต่ำ	สูง
อุณหภูมิหลอมเหลวของ HDPE	T_m	190	240
อุณหภูมิแม่พิมพ์	T_w	30	60
อุณหภูมิหล่อเย็น	T_c	25	45

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design: CCD) [23] โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองออกเป็น 3 ปัจจัย และระดับ 2 การทดลองที่จุดกึ่งกลางจำนวน 1 จุด ดังนั้นมีจำนวนการทดลองเท่ากับ $8+1 = 9$ การทดลอง และทดลองจำนวน 2 ซ้ำ ดังนั้นการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง และค่าความเชื่อมั่นที่ (α) 95 % แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองด้วยผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง

ครั้งที่	Tm (°C)	Tw (°C)	Tc (°C)
1	190	60	45
2	190	60	45
3	240	60	45
4	240	30	45
5	190	60	25
6	215	45	35
7	240	30	25
8	240	60	45
9	190	30	45
10	190	60	25
11	190	30	45
12	240	30	25
13	240	60	25
14	190	30	25
15	240	60	25
16	190	30	25
17	240	30	45
18	215	45	35

3.2 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ทดสอบชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ

เครื่องฉีดพลาสติก (Plastic injection machine) ที่สำหรับการทดสอบ รุ่น HYF-1000 แสดงดังรูปที่ 2 และรายละเอียดของเครื่องฉีดพลาสติก แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 2 เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น HYF-1000

ตารางที่ 3 รายละเอียดของเครื่องฉีดพลาสติก รุ่น HYF-1000

รายการ	ลักษณะ	หน่วย
ระบบฉีด	Ø สกรู	35 mm
	ปริมาตรชิ้นงานสูงสุด	160 cm ³
	แรงดันฉีด	1,835 kg/cm ²
	อัตราการฉีด	90 cm ³ /s
	ความเร็วรอบ	0-200 rpm
ระบบยึดแม่พิมพ์	ขนาดแม่พิมพ์	360 x 315 mm
	กำลังยึดแม่พิมพ์สูงสุด	100 t
	ระยะเปิดแม่พิมพ์สูงสุด	305 mm

3.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติกชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ

พารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก HYF-1000 ปรับตั้งค่าคือ แรงดันฉีด แรงบิดแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น แสดงดังตารางที่ 4

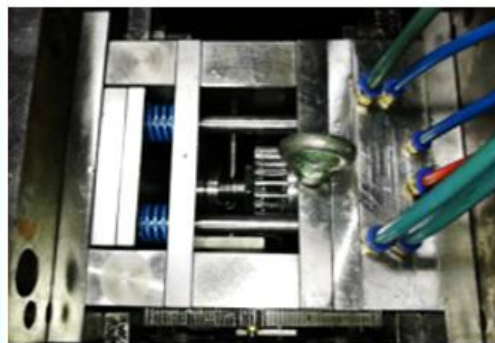
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก (คงที่)

รายการ	ค่า	หน่วย
แรงดันฉีด	64.83	kg/cm ²
แรงปิดแม่พิมพ์	68	t
เวลาหล่อเย็น	18.59	s

และทำการทดลองในการฉีดขึ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ โดยแสดงการติดตั้งแม่พิมพ์ฝาเกลียวขวดน้ำกับเครื่องฉีดพลาสติก HYF-1000 แสดงดังรูปที่ 3



ด้านหน้าเครื่องฉีด

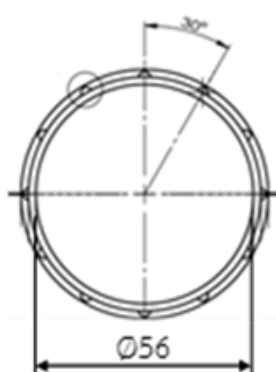


ด้านบนเครื่องฉีด

รูปที่ 3 ทดลองในการฉีดขึ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ

3.4 ตำแหน่งจุดตรวจสอบ

ตำแหน่งจุดตรวจสอบขึ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำบริเวณภายในฝาขวดขนาด Ø56 mm เป็นจุดที่สำคัญเพราะมีการประกอบเข้ากับฝาเกลียวขวดน้ำ ดังนั้นจุดที่สำคัญในการตรวจสอบในครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 4



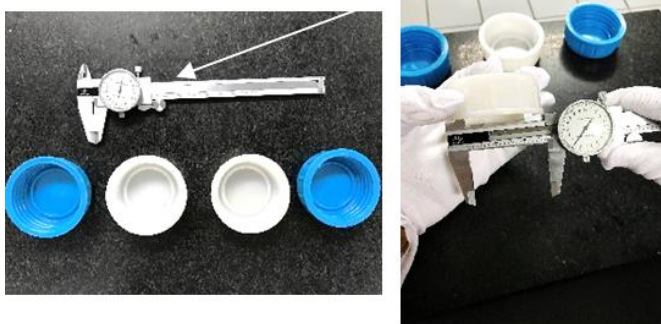
รูปที่ 4 ตำแหน่งจุดตรวจสอบตำแหน่ง ขนาด $\varnothing 56$ mm ฝาเกลียวใน

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 การตรวจสอบชิ้นงาน

ผลการตรวจสอบชิ้นงานหลังจากการทดลองฉีดตามตารางที่ 3 โดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ที่ความละเอียด 0.02 mm สำหรับการตรวจสอบขนาดของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ จุดตรวจสอบตำแหน่ง ขนาด $\varnothing 56$ mm โดยเกณฑ์ในการพิจารณาหากชิ้นงานมีขนาดโตกว่าหรือหดตัวลงน้อยกว่าขนาดที่ออกแบบ ($\varnothing 56$ mm) ถือว่าชิ้นงานไม่ได้ขนาดซึ่งส่งผลกระทบต่อประกอบต่อไป รูปที่ 5 แสดงการตรวจวัดขนาดฝาเกลียว

เวอร์เนียคาลิปเปอร์ 0.02 mm



รูปที่ 5 ตำแหน่งจุดตรวจสอบตำแหน่ง ขนาด $\varnothing 56$ mm ฝาเกลียวใน

4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง

ผลวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของระดับการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ โดยใช้โปรแกรม Minitab® 21.4.1 (64-bit) บน Microsoft Window 11-64 bit AMD Ryzen 7 ดังแสดงรูปที่ 6

Fatorial Regresssion: Total Stress Displacment vs Melt temp., Mold temp. and Cooling temp. Analysis of variance

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.273892	0.039127	12.180000	0.000
Linear	3	0.245437	0.081812	25.470000	0.000
Melt temp. (Tm)	1	0.215760	0.215760	67.170000	0.000
Mold temp. (Tw)	1	0.006724	0.006724	2.090000	0.179
Cooling temp. (Tc)	1	0.022952	0.022952	7.140000	0.023
2-Way interactions	3	0.028014	0.009338	2.910000	0.088
Melt temp. (Tm) * Melt temp. (Tw)	1	0.011130	0.011130	3.460000	0.092
Melt temp. (Tm) * Cooling temp. (Tc)	1	0.010404	0.010404	3.240000	0.102
Mold temp. (Tw) * Cooling temp. (Tc)	1	0.006480	0.006480	2.020000	0.186
3-Way interactions	1	0.000441	0.000441	0.140000	0.719
Melt temp. (Tm) * Mold temp. (Tw) * Cooling temp. (Tc)	1	0.000441	0.000441	0.140000	0.719
Error	10	0.032124	0.003212		
Curvature	1	0.001995	0.001995		0.460
Pure reeor	9	0.030128	0.003348		
Total	17	0.306016			

Model summary

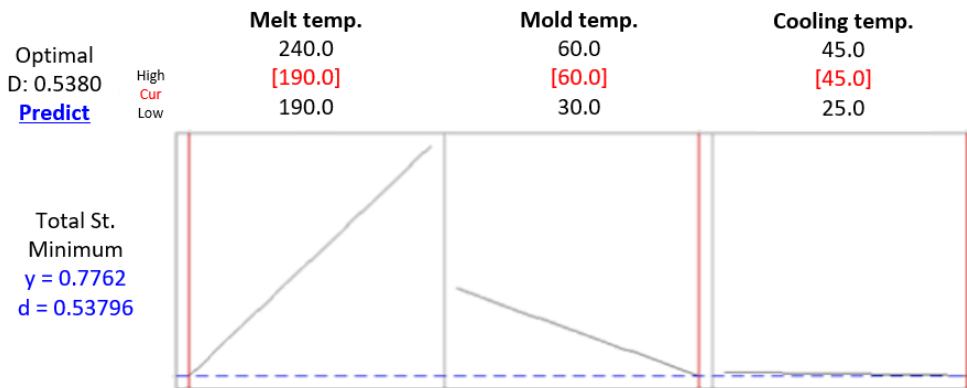
S	R-sq	R-sq (adj.)	R-sq(predX)
0.0566777	89.50%	82.15%	60.18%

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของระยะการหดตัวของชิ้นงาน ฝาเกลียวขวดน้ำ

จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยมี 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) ปัจจัย คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm) และอุณหภูมิการหล่อเย็น (Tc) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวแสดงผลการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) ของการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำมีค่าเท่ากับ 89.50 % เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า Adjusted R-Square (82.15%) มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้พบว่าค่า R-Square Predicted มีค่าเท่ากับ 60.81% ซึ่งน้อยกว่าค่า R-Square ดังนั้นขนาดของข้อมูลถือว่าเป็นปกติ จึงซึ่งสามารถแสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลได้

4.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัจจัย

ค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดพลาสติกแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm) เท่ากับ 190 °C, (Tw) เท่ากับ 60 °C และอุณหภูมิการหล่อเย็น (Tc) เท่ากับ 45 °C และมีค่าการทำนายการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ (Predicted Responses) ที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 1.39% จากขนาดที่ออกแบบ ค่าทำนายผลตอบของการหดตัว (Y) อยู่ที่ 0.7762 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) = 0.53796 ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าเหมาะสมที่สุดของปัจจัย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Melt temperature: T_m) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature: T_w) และอุณหภูมิหล่อเย็น (Cooling temperature: T_c) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ เมื่อทำการศึกษาพบว่า ปัญหาการปรับตั้งก่อนการฉีดนั้นมีช่วงการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ซึ่งส่งผลให้เพิ่มเวลา กระบวนการทำงาน และต้นทุนการผลิตจึงได้นำทฤษฎีการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เข้ามาช่วยออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัย และระดับ 2 ระดับ ทดลองที่จุดกึ่งกลางจำนวน 1 จุด เท่ากับการทดลอง $8+1 = 9$ การทดลอง และทดลองจำนวน 2 ขั้ว รวมการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง เมื่อทำการตรวจวัดและตรวจสอบบริเวณจุดตรวจสอบพบว่า มีการหดตัวของชิ้นงานที่น้อยที่สุด เท่ากับ 1.39% โดยที่ใช้ปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ต้องปรับมีค่าของอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (T_m) เท่ากับ 190°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ (T_w) เท่ากับ 60°C และอุณหภูมิการหล่อเย็น (T_c) เท่ากับ 45°C เหมาะสมที่สุดในการฉีดชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ โดยลดปริมาณของเสียลงเหลือ 29 ชิ้น คิดเป็น 12.08% จากเดิมในกระบวนการผลิต 240 ชิ้น/ชั่วโมง (8 ชั่วโมง/วัน จำนวนชิ้นงาน 2 ชิ้น/รอบการผลิต และ 1 รอบการผลิต เท่ากับ 25 วินาที) พบว่าเกิดของเสียขึ้นถึง 67 ชิ้น คิดเป็น 27.92% ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตค่อนข้างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ต่องานฉีดชิ้นงานพลาสติกในด้านการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมที่ช่วยปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เห็นจากจำนวนของเสียที่ลดลง

References

- [1] Phathom H, Jakkapan K. Design of experiment (DOE) to reduce waste in plastic injection process of automotive parts. *Kasem Bundit engineering journal* 2013;3:73-95. (In Thai)
- [2] Phrasang K. The study of shrinkage percentage HDPE based on the ATSM D955 standard test method. *RMUTP Research Journal Special Issue The 5th Rajamangala University of Technology National Conference* 2013:642-51. (In Thai)
- [3] Nagahanumaiah, Ravi B. Effects of injection molding parameters on shrinkage and weight of plastic part produced by DMLS mold. *Rapid prototyping journal* 2009;15(3): 179-86.
- [4] Kurt M, Kaynak Y, Kamber OS, Mutlu B, Bakir B, Koklu U. Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts. *The international journal of advanced manufacturing technology* 2010;46:571-78.
- [5] Tosello G, Costa F. High precision validation of micro injection molding process simulations. *Journal of manufacturing processes* 2019;48:236-48.
- [6] Chacinski T, Sutowski P. Common defect injection molding of plastic products and their influence on product quality. *Journal of mechanical and energy engineering* 2012;5(45):7-14.
- [7] Li J, Liu W, Xia X, Zhou H, Jing L, Peng X, et al. Reducing the burn marks on injection-molded parts by external gas-assisted injection molding. *Polymers* 2021;13:4087.
- [8] Mansur A, Alim M, Sunaryo. Plastic injection quality controlling using the lean six sigma and FMEA method. *Materials science and engineering* 2016;105:012006.
- [9] Gruber DP, Berger G, Pacher G, Friesenbichler W. Novel approach to the measurement of the visual perceptibility of sink marks on injection molding parts. *Polymer Testing* 2011;30(6):651-6.
- [10] Berihun EA, Bogale TM. Parameter optimization of PET plastic preform bottles in injection molding process using grey-based Taguchi method. *Advances in materials science and engineering* 2022:4416602.
- [11] Yemenici O, Ardagnhey A. An analysis of cooling time in plastic injection moulding with influence of inlet temperature of cooling fluid. *International journal of mechanical and production engineering* 2016;4(6):76-9.

- [12] Ch'ng SQ, Nasir SM, Fathullah M, Norman NZ, Hazwan MHM. Warpage analysis on thick shell part using response surface methodology (RSM) to optimize parameter setting in injection molding process. AIP conference proceedings 2018; 2030(1):020167.
- [13] Karel R, Martin Z. Analysis of temperature influence on injection molding process. Proceeding in Manufacturing Systems 2016;11(2):95-100.
- [14] Hott ME, Megerian CA, Beane R, Bonassar L. Fabrication of tissue engineered tympanic membrane patches using computer-aided design and injection molding. The Laryngoscope 2004;114(7):1290-5.
- [15] Wang J, Yang W. Differential injection molding method and equipment for micro-plastic products. Polymeric materials science and engineering 2012;28(7):83-6.
- [16] Jaya H, Zulkepli N, Omar M. Optimization of injection Moulding process via design of experiment (DOE) method based. Archives of Metallurgy and Materials 2022; 67(2):719-27.
- [17] Jitaree A. Design of experiment for analyzing factors affecting to varied deformation in the simulation of ABS plastic injection molding process [Master thesis]. Pathum Thani, Thailand: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2012. (In Thai)
- [18] Park HS, Dang XP. Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. Procedia Manufacturing 2017;10:48-59.
- [19] Oliaei E, Heidari BS, Davachi SM, Bahrami M, Davoodi S. Warpage and shrinkage optimization of injection-molded plastic spoon parts for biodegradable polymers using Taguchi, ANOVA and artificial neural network methods. Journal of Materials Science & Technology 2016;32(8):710-20.
- [20] Wang G, Zhao G, Huiping L, Guan Y. Research on optimization design of the heating/cooling channels for rapid heat cycle molding based on response surface methodology and constrained particle swarm optimization. Expert Systems with Applications 2011;38:6705-19.
- [21] Ruennareenard J. Appropriate parameters of bone fixation plate forming from hydroxyapatite and bioactive glass composite [Master thesis]. Chiang Mai, Thailand: Chiang Mai University; 2014. (In Thai)
- [22] Sudsawat S. Optimized plastic injection molding process and minimized the warpage and volume shrinkage by response surface methodology with genetic algorithm and firefly algorithm techniques. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences 2017;24:228-38.

- [23] Raymond HM, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 4th ed. New jersey: John Wiley & Sons; 2016.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Email: supasit.m@rmutl.ac.th

งานวิจัย: Plastic mold design, Product design, Additive Manufacturing, Wire and Additive Manufacturing



ดร.อดิเรก ชัยนาวงศ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Email: adirake@rmutl.ac.th

งานวิจัย: Plastic mold design, Machining Error, Design of Experiments (DoE)

Article History:

Received: March 31, 2023

Revised: August 16, 2023

Accepted: August 23, 2023

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

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

รศ.ดร.ธนุ ญฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภูวโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	รองอธิการบดี สายงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์ รศ.ดร. ระพี กาญจนะ	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลชัยบุรี
รศ.ดร.วรนุช แจ้งสว่าง รศ.ดร.วรพจน์ กริสุระเดช	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ รศ.ดร.วัชระ เพียรสุภาพ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ โลกิสิกส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิรักษ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต

รศ.ดร.อรจักร จิตต์โสภาคย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงษ์ ชัยสายันห์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.วิญญู แสงวสินกสิกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจิระประวดี	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสารณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วรินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณ ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เขมพัฒน์ ดันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จรรุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ่นเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจียรโนวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าฤทธิธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุญนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ แตะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พงษ์สัณฐ์ ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ. ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันนุ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ฐัแทนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรัญญู วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ไฉกล้ำ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิรฉล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนกร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลย์หล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สิริพร ไรจนันต์	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.สิรวงศ์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สมล แสงเฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ขาติปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญา ภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษชัย วิถีพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์หิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณณา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐกรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.คุณหญิง สติระเศรษฐทวี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะกรรมการจัดการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ปรารธนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชิตต์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ภักพัฒน์ แสงเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอนต์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.ดร.วาทัญญู รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก
อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติ แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณี 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 เหล็กรัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศพรพัฒน์ สว่างสุริย์	วิศวกรรมโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวรรณ ปลั่งใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนนท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทรเรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
อ.ว่าที่ ร.ต.สรวิชัย ดาแก้ว	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
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

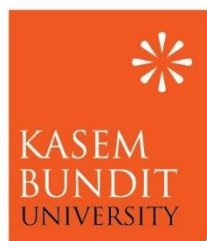
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

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